

Phan Quốc Phô (chủ biên) - Nguyễn Đức Chiến

Giáo
trình

?

**CẢM
BIẾN**

EBOOKBKMT.COM

HỖ TRỢ TÀI LIỆU HỌC TẬP



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI
PHAN QUỐC PHỒ (chủ biên) - NGUYỄN ĐỨC CHIẾN

GIÁO TRÌNH CẢM BIẾN

In lần thứ năm có sửa chữa

Sách chào mừng 50 năm thành lập Trường ĐHBK Hà Nội

EBOOKBKMT.COM

HỖ TRỢ TÀI LIỆU HỌC TẬP



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2006

LỜI NÓI ĐẦU

“Cảm biến” trong tiếng Anh gọi là *sensor* xuất phát từ chữ *sense* theo nghĩa la tinh là cảm nhận. Từ ngàn xưa người tiền sử đã nhờ vào các giác quan xúc giác để cảm nhận, tìm hiểu đặc điểm của thế giới tự nhiên và học cách sử dụng những hiểu biết đó nhằm mục đích khai thác thế giới xung quanh phục vụ cho cuộc sống của họ. Trong thời đại phát triển của khoa học và kỹ thuật ngày nay con người không chỉ dựa vào các cơ quan xúc giác của cơ thể để khám phá thế giới. Các chức năng xúc giác để nhận biết các vật thể, hiện tượng xảy ra trong thiên nhiên được tăng cường nhờ phát triển các dụng cụ dùng để đo lường và phân tích mà ta gọi là cảm biến. Cảm biến được định nghĩa như những thiết bị dùng để biến đổi các đại lượng vật lý và các đại lượng không điện cần đo thành các đại lượng điện có thể đo được (như dòng điện, điện thế, điện dung, trở kháng v.v...). Nó là thành phần quan trọng nhất trong các thiết bị đo hay trong các hệ thống điều khiển tự động. Có thể nói rằng nguyên lý hoạt động của một cảm biến, trong nhiều trường hợp thực tế, cũng chính là nguyên lý của phép đo hay của phương pháp điều khiển tự động.

Đã từ lâu cảm biến được sử dụng như những bộ phận để cảm nhận và phát hiện, nhưng chỉ từ vài chục năm trở lại đây chúng mới thể hiện rõ vai trò quan trọng trong các hoạt động của con người. Nhờ những thành tựu mới của khoa học và công nghệ trong lĩnh vực vật liệu, thiết bị điện tử và tin học, các cảm biến đã được giảm thiểu kích thước, cải thiện tính năng và ngày càng mở rộng phạm vi ứng dụng. Giờ đây không có một lĩnh vực nào mà ở đó không sử dụng các cảm biến. Chúng có mặt trong các hệ thống tự động phức tạp, người máy, kiểm tra chất lượng sản phẩm, tiết kiệm năng lượng, chống ô nhiễm môi trường. Cảm biến cũng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực giao thông vận tải, hàng tiêu dùng, bảo quản thực phẩm, ô tô, trò chơi điện tử v.v...

Trong những năm gần đây cảm biến đã trở thành môn học bắt buộc của sinh viên vật lý kỹ thuật, những kỹ sư vật lý tương lai, những người sẽ đóng vai trò ứng dụng tiến bộ của khoa học vật lý vào kỹ thuật, công nghệ, sản xuất và đời sống. Cảm biến cũng là lĩnh vực nghiên cứu ứng dụng của sinh viên đại học, sau đại học và cán bộ thuộc nhiều ngành khoa học kỹ thuật khác. Vì vậy, sau khi xuất bản vào tháng 1/2000 và in lại năm 2001, 2002, 2005 chúng tôi tiếp tục tái bản “giáo trình cảm biến” này nhằm đáp ứng nhu cầu của đông đảo bạn đọc muốn tìm hiểu về các loại cảm biến khác nhau sử dụng trong các phòng thí nghiệm và trong môi trường công nghiệp. Nội dung của

giáo trình được chia thành các chương, trong đó mỗi chương đề cập đến một hoặc một số loại cảm biến (như cảm biến quang, cảm biến nhiệt độ, cảm biến vị trí và dịch chuyển, cảm biến đo vận tốc, lưu lượng và mức chất lưu, cảm biến chân không, cảm biến điện hóa, cảm biến đo thành phần khí v.v...). Trong chừng mực giới hạn của tài liệu tham khảo cho phép, đối với từng loại cảm biến, chúng tôi giới thiệu nguyên lý cấu tạo, cơ chế hoạt động, các thông số đo lường, và đặc biệt là phạm vi ứng dụng để tiện cho việc lựa chọn cảm biến thích hợp cho từng ứng dụng cụ thể trong thực tế.

Với nội dung trình bày trong hơn 300 trang, giáo trình này được viết để sử dụng cho sinh viên ngành kỹ sư vật lý và các ngành kỹ thuật khác có liên quan như tự động hóa, điện tử dân dụng, thủy lực v.v... Những kiến thức đề cập đến trong giáo trình cũng rất bổ ích cho các kỹ sư trẻ làm việc trong những lĩnh vực có sử dụng cảm biến trong các hệ thống thiết bị điều khiển tự động, đo lường tiêu chuẩn và đánh giá chất lượng sản phẩm, kiểm tra môi trường làm việc và an toàn lao động...

Do hạn chế về tài liệu tham khảo, giáo trình này chắc chắn còn có những khiếm khuyết cần được bổ sung. Chúng tôi hy vọng sẽ nhận được nhiều ý kiến đóng góp của độc giả để nội dung của giáo trình ngày càng được hoàn thiện hơn nhằm đáp ứng những nhu cầu đa dạng của việc đo lường trong các phòng thí nghiệm và trong môi trường công nghiệp.

Hà nội, ngày 25 tháng 4 năm 2006.

CÁC TÁC GIẢ

MỤC LỤC

Lời nói đầu.....	3
Mục lục.....	5
Chương 1: Những nguyên lý cơ bản và các đặc trưng đo lường	14
1.1. Các định nghĩa và đặc trưng chung	14
1.2. Cảm biến tích cực	16
1.3. Cảm biến thụ động	20
1.4. Các đại lượng ảnh hưởng	21
1.5. Mạch đo.....	22
1.6. Sai số của phép đo	23
1.6.1. Sai số hệ thống.....	24
1.6.2. Sai số ngẫu nhiên	25
1.6.3. Tính trung thực, tính đúng đắn và độ chính xác	27
1.7. Chuẩn cảm biến	28
1.7.1. Chuẩn đơn giản.....	29
1.7.2. Chuẩn nhiều lần.....	29
1.8. Độ nhạy	30
1.8.1. Định nghĩa	30
1.8.2. Độ nhạy trong chế độ tĩnh	31
1.8.3. Độ nhạy trong chế độ động	32
1.9. Độ tuyến tính.....	33
1.9.1. Điều kiện có tuyến tính.....	33
1.9.2. Đường thẳng tốt nhất - độ lệch tuyến tính	33
1.10. Độ nhanh - thời gian đáp ứng	34
1.11. Giới hạn sử dụng cảm biến	35
Chương 2: Cảm biến quang	37
2.1. Ánh sáng và phép đo quang.....	37
2.1.1. Tính chất của ánh sáng	37
2.1.2. Các đơn vị đo quang	39
2.1.2.1. Các đơn vị đo năng lượng.....	39
2.1.2.2. Đơn vị đo thị giác	40

2.1.3. Nguồn sáng	42
2.1.3.1. Đèn sợi đốt wonfram	42
2.1.3.2. Diot phát quang	42
2.1.3.3. Laze.....	43
2.2. Tế bào quang dẫn.....	43
2.2.1. Vật lý quang dẫn.....	43
2.2.2. Vật liệu để chế tạo cảm biến.....	45
2.2.3. Các đặc trưng	46
2.2.3.1. Điện trở.....	46
2.2.3.2. Độ nhạy.....	47
2.2.4. Ứng dụng của tế bào quang dẫn.....	50
2.3. Photodiot.....	51
2.3.1. Nguyên lý hoạt động.....	51
2.3.2. Chế độ hoạt động	53
2.3.2.1. Chế độ quang dẫn	53
2.3.2.2. Chế độ quang thế	55
2.3.3. Độ nhạy	57
2.3.4. Sơ đồ sử dụng photodiot.....	58
2.3.4.1. Chế độ quang dẫn	58
2.3.4.2. Chế độ quang thế	59
2.4. Phototranzito.....	60
2.4.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.....	60
2.4.2. Độ nhạy.....	61
2.4.3. Sơ đồ dùng phototranzito	62
2.4.3.1. Phototranzito chuyển mạch.....	62
2.4.3.2. Phototranzito trong chế độ tuyến tính.....	63
2.4.3.3. Phototranzito hiệu ứng trường (photoFET).....	64
2.5. Cảm biến quang phát xạ.....	65
2.5.1. Cơ chế hoạt động và vật liệu chế tạo.....	65
2.5.2. Tế bào quang điện chân không.....	66
2.5.3. Tế bào quang điện dạng khí	68
2.5.4. Thiết bị nhân quang.....	68
2.6. Cáp quang	70
2.6.1. Cấu tạo và các tính chất chung.....	70
2.6.2. Ứng dụng	71
2.6.2.1. Truyền thông tin	71
2.6.2.2. Quan sát và đo bằng phương tiện quang học	72

Chương 3: Cảm biến nhiệt độ.....	74
3.1. Thang nhiệt độ	75
3.2. Nhiệt độ đo được và nhiệt độ cần đo.....	77
3.2.1. Nhiệt độ đo được	77
3.2.2. Đo nhiệt độ trong lòng vật rắn	77
3.3. Đo nhiệt độ bằng điện trở	77
3.3.1. Độ nhạy nhiệt.....	77
3.3.2. Điện trở kim loại	79
3.3.2.1. Chọn kim loại	79
3.3.2.2. Chế tạo nhiệt kế	81
3.3.3. Nhiệt điện trở	83
3.3.3.1. Đặc điểm chung.....	83
3.3.3.2. Độ dẫn của nhiệt điện trở.....	84
3.3.3.3. Quan hệ điện trở - nhiệt độ	85
3.3.4. Điện trở silic.....	86
3.4. Đo nhiệt độ bằng cặp nhiệt	87
3.4.1. Đặc trưng chung - độ nhạy nhiệt.....	87
3.4.2. Các hiệu ứng nhiệt điện.....	90
3.4.2.1. Hiệu ứng Peltier	90
3.4.2.2. Hiệu ứng Thomson	91
3.4.2.3. Hiệu ứng Seebeck	91
3.4.3. Phương pháp chế tạo và sơ đồ đo	92
3.4.3.1. Chế tạo cặp nhiệt và vỏ bảo vệ.....	92
3.4.3.2. Sơ đồ đo	93
3.4.3.3. Phương pháp đo	94
3.4.4. Các loại cặp nhiệt điện thường dùng trong thực tế.....	96
3.5. Đo nhiệt độ bằng diot và tranzito.....	97
3.5.1. Đặc điểm chung - độ nhạy nhiệt	97
3.5.2. Quan hệ điện áp - nhiệt độ	99

Chương 4: Cảm biến vị trí và dịch chuyển..... 100

4.1. Điện thế kế điện trở	101
4.1.1. Cấu tạo của cảm biến	101
4.1.1.1. Các dạng hình học	101
4.1.1.2. Điện trở.....	101
4.1.1.3. Con chạy	103
4.1.2. Các đặc trưng	103

4.1.3. Điện thế kế không dùng con chạy cơ học	105
4.2. Cảm biến cảm ứng	107
4.2.1. Nguyên lý và tính chất	107
4.2.2. Tự cảm biến thiên.....	108
4.2.2.1. Mạch từ có khe từ biến thiên	108
4.2.2.2. Cuộn dây có lõi từ.....	110
4.2.3. Biến thế vi sai.....	111
4.3. Cảm biến tụ điện.....	113
4.3.1. Nguyên lý và các đặc trưng.....	113
4.3.2. Tụ điện có diện tích bản cực biến thiên	114
4.3.2.1. Tụ đơn.....	114
4.3.2.2. Tụ kép vi sai.....	115
4.3.3. Tụ điện có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên	115
4.3.3.1. Tụ đơn.....	116
4.3.3.2. Tụ kép vi sai.....	116
4.3.4. Phương pháp đo độ biến thiên điện dung	117
4.3.4.1. Cầu Sauty và tụ vi sai	117
4.3.4.2. Sơ đồ R-C chế độ động	118
4.4. Cảm biến truyền sóng đàn hồi	119
4.4.1. Nguyên tắc đo	119
4.4.2. Cấu tạo của cảm biến	120
4.4.2.1. Cảm biến âm từ.....	122
4.4.2.2. Cảm biến hai chiều dùng sóng bề mặt	123

Chương 5: Cảm biến biến dạng..... 125

5.1. Các định nghĩa và nguyên lý chung.....	126
5.1.1. Định nghĩa một số đại lượng cơ học	126
5.1.2. Nguyên lý chung	127
5.2. Đầu đo điện trở kim loại	129
5.2.1. Vật liệu và phương pháp chế tạo	129
5.2.2. Các đặc trưng chủ yếu	130
5.3. Đầu đo điện trở bán dẫn - áp điện trở	132
5.3.1. Hiệu ứng áp trở trong chất bán dẫn	132
5.3.2. Cấu tạo của đầu đo bán dẫn.....	134
5.3.3. Các đặc trưng chủ yếu của đầu đo bán dẫn	135
5.3.3.1. Điện trở.....	135
5.3.3.2. Hệ số đầu đo	137
5.4. Đầu đo trong chế độ động.....	138

5.4.1. Tần số sử dụng tối đa	138
5.4.2. Giới hạn mỗi	139
5.5. Phương pháp đo	140
5.6. Ứng suất kế dây rung.....	141

Chương 6: Cảm biến vận tốc 143

6.1. Tốc độ kế điện từ đo vận tốc góc	144
6.1.1. Tốc độ kế dòng một chiều	144
6.1.2. Tốc độ kế dòng xoay chiều	146
6.1.2.1. Máy phát đồng bộ	146
6.1.2.2. Máy phát không đồng bộ	148
6.2. Tốc độ kế điện từ đo vận tốc dài	148
6.3. Tốc độ kế xung đo tốc độ quay	150
6.3.1. Cảm biến từ trở biến thiên	151
6.3.2. Tốc độ kế quang	152
6.4. Đổi hướng kế	153
6.4.1. Đổi hướng kế dùng con quay hồi chuyển	153
6.4.2. Đổi hướng kế quang	154

Chương 7: Cảm biến lực 157

7.1. Cảm biến áp điện	158
7.1.1. Hiệu ứng áp điện	158
7.1.1.1. Định nghĩa	158
7.1.1.2. Vai trò của đối xứng tinh thể	158
7.1.2. Vật liệu áp điện	159
7.1.3. Cấu tạo của cảm biến	160
7.1.4. Sơ đồ đo	164
7.2. Cảm biến từ giảo	167
7.3. Cảm biến lực dựa trên phép đo độ dịch chuyển	170
7.4. Cảm biến xúc tác - đa nhân tạo	171

Chương 8: Cảm biến gia tốc và rung 173

8.1. Khái niệm chung	173
8.1.1. Dải gia tốc	173
8.1.2. Chuyển động rung	174
8.1.3. Nguyên lý cảm biến rung động	175
8.2. Các đặc trưng của máy đo gia tốc áp điện và áp trở	178

8.2.1. Độ nhanh.....	178
8.2.2. Độ tinh tế.....	179
8.3. Máy đo gia tốc áp điện.....	180
8.3.1. Nguyên tắc hoạt động.....	180
8.3.2. Các đặc trưng đo lường.....	181
8.4. Máy đo gia tốc áp trở.....	182
Chương 9: Cảm biến đo vận tốc, lưu lượng và mức chất lưu	184
9.1. Đặc trưng của dòng chảy.....	184
9.2. Cảm biến và phương pháp đo vận tốc của chất lưu.....	186
9.2.1. Phong kế dây và phong kế màng mỏng.....	187
9.2.1.1. Nguyên tắc hoạt động.....	187
9.2.1.2. Sơ đồ đo.....	188
9.2.2. Phong kế ion.....	190
9.2.3. Phong kế dùng chén bán cầu và cánh quạt.....	191
9.2.4. Máy đo tốc độ gió dùng siêu âm.....	193
9.3. Đo lưu lượng.....	194
9.3.1. Lưu lượng kế điện từ.....	194
9.3.2. Lưu lượng kế cơ dùng chuyển đổi điện.....	197
9.3.2.1. Lưu lượng kế tuabin.....	197
9.3.2.2. Lưu lượng kế phao nổi.....	198
9.3.2.3. Lưu lượng kế lá chắn.....	199
9.3.3. Lưu lượng kế khối lượng nhiệt.....	200
9.4. Đo và phát hiện mức chất lưu.....	201
9.4.1. Phương pháp thủy tĩnh.....	202
9.4.2. Phương pháp điện.....	203
9.4.2.1. Cảm biến độ dẫn.....	203
9.4.2.2. Cảm biến tụ điện.....	204
9.4.3. Phương pháp dùng bức xạ.....	204
9.4.3.1. Phương pháp đo bằng hấp thụ tia γ	204
9.4.3.2. Phương pháp đo bằng sóng siêu âm.....	206
Chương 10: Cảm biến đo áp suất chất lưu.....	207
10.1. Áp suất và đơn vị đo áp suất.....	208
10.2. Nguyên tắc đo.....	209
10.2.1. Chất lưu không chuyển động.....	209
10.2.2. Chất lưu chuyển động.....	212
10.3. Vật trung gian.....	213

10.4. Phương pháp chuyển đổi tín hiệu.....	214
10.4.1. Chuyển đổi bằng biến thiên trở kháng	214
10.4.1.1. Điện thế kế.....	214
10.4.1.2. Cảm biến dùng màng dạng lưới	215
10.4.1.3. Cảm biến áp trở.....	216
10.4.2. Chuyển đổi bằng biến thiên điện dung.....	218
10.4.3. Chuyển đổi bằng biến thiên độ tự cảm.....	220
10.4.4. Chuyển đổi bằng hiệu ứng áp điện.....	221
10.4.5. Chuyển đổi bằng dao động cơ điện.....	222
10.4.5.1. Bộ dao động dùng dây, lá mỏng hoặc ống dao động	223
10.4.5.2. Bộ dao động thạch anh.....	225
10.4.6. Các phương pháp chuyển đổi khác.....	226
10.4.6.1. Phương pháp quang điện.	226
10.4.6.2. Phương pháp tranzito áp điện.....	226
Chương 11: Cảm biến đo chân không	228
11.1. Dải chân không và các loại chân không kế.....	228
11.2. Chân không kế đàn hồi	229
11.2.1. Cảm biến dùng ống Bourdon.....	229
11.2.1.1. Cảm biến một vòng xoắn	229
11.2.1.2. Cảm biến nhiều vòng xoắn	229
11.2.2. Cảm biến dùng màng mỏng	230
11.3. Chân không kế nhiệt	233
11.3.1. Sự truyền nhiệt trong chất khí	233
11.3.2. Nguyên tắc hoạt động của chân không kế nhiệt.....	233
11.3.3. Chân không kế Pirani	235
11.3.4. Chân không kế dùng cặp nhiệt	236
11.4. Chân không kế ion	238
11.4.1. Ion hóa chất khí.....	239
11.4.2. Chân không kế catot nguội - Chân không kế Penning	240
11.4.3. Chân không kế catot nóng.....	242
11.4.4. Chân không kế ion hóa bằng nguồn phóng xạ	244
Chương 12: Cảm biến bức xạ hạt nhân	246
12.1. Đầu đo bằng ion hóa chất khí	246
12.1.1. Nguyên lý chung	246
12.1.2. Buồng ion hóa	248

12.1.3. Ống đếm tỷ lệ.....	250
12.1.4. Ống đếm Geiger-Muller.....	251
12.2. Đầu đo nhấp nháy.....	253
12.3. Đầu đo bán dẫn.....	255
Chương 13: Cảm biến độ ẩm.....	259
13.1. Những định nghĩa cơ bản về không khí ẩm.....	260
13.2. Phân loại ẩm kế.....	262
13.3. Ẩm kế ngưng tụ.....	262
13.3.1. Nguyên lý hoạt động và cấu tạo của ẩm kế.....	262
13.3.2. Các yếu tố ảnh hưởng.....	264
13.3.3. Các đặc trưng.....	264
13.4. Ẩm kế hấp thụ.....	265
13.4.1. Nguyên tắc đo.....	265
13.4.2. Ẩm kế LiCl.....	266
13.4.3. Các đặc trưng.....	267
13.5. Ẩm kế biến thiên trở kháng.....	268
13.5.1. Ẩm kế điện trở.....	268
13.5.1.1. Nguyên tắc hoạt động và phương pháp chế tạo.....	268
13.5.1.2. Các đặc trưng.....	270
13.5.2. Ẩm kế tụ điện polyme.....	270
13.5.3. Ẩm kế tụ điện Al_2O_3	271
13.6. Ẩm kế điện ly.....	273
13.6.1. Nguyên lý hoạt động và phương pháp chế tạo.....	273
13.6.2. Các đặc trưng.....	274
Chương 14: Cảm biến điện hóa.....	276
14.1. Cảm biến điện thế.....	276
14.1.1. Nguyên tắc chung.....	276
14.1.1.1. Định luật Nernst.....	276
14.1.1.2. Điện cực so sánh.....	280
14.1.2. Điện cực đo thế oxy hóa - khử.....	281
14.1.3. Điện cực đo độ pH.....	282
14.1.4. Các điện cực đặc thù.....	285
14.2. Cảm biến dòng điện.....	287
14.2.1. Nguyên lý đo.....	287
14.2.2. Điện cực đo khí.....	288

14.2.3. Điện cực enzim.....	289
14.3. Cảm biến đo độ dẫn	289
14.3.1. Đo độ dẫn của chất điện phân	289
14.3.2. Các loại cảm biến đo độ dẫn	291
14.4. Cảm biến ISFET.....	292
14.4.1. Các loại cảm biến trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường	293
14.4.1.1. Cấu trúc tranzito hiệu ứng trường	293
14.4.1.2. Hiệu ứng mặt phân biên và hiệu ứng khối.....	294
14.4.1.3. Tranzito hiệu ứng trường chọn lọc ion (ISFET).....	295
14.4.2. Các cảm biến trên cơ sở ISFET	301
Chương 15: Cảm biến đo thành phần khí.....	304
15.1. Cảm biến dùng chất điện phân rắn.....	305
15.1.1. Nguyên lý vật lý.....	305
15.1.1.1. Định luật Nernst.....	305
15.1.1.2. Các thành phần cấu tạo cảm biến.....	307
15.1.2. Các đặc trưng	308
15.1.2.1. Các đặc trưng đo lường	308
15.1.2.2. Các đặc trưng công nghệ.....	309
15.1.2.3. Các nguyên nhân gây nên sai số	309
15.1.3. Cấu tạo cảm biến.....	311
15.2. Cảm biến trở kháng thay đổi.....	313
15.2.1. Đo độ dẫn khối.....	313
15.2.2. Đo độ dẫn bề mặt	314
15.2.3. Đo điện dung	315
15.3. Cảm biến áp điện thạch anh	315
15.4. Cảm biến xúc tác	316
15.5. Cảm biến thuận từ.....	317
15.5.1. Nguyên lý hoạt động.....	317
15.5.2. Cấu tạo	317
15.5.2.1. Cảm biến từ động.....	317
15.5.2.2. Cảm biến đối lưu từ-nhiệt	320
15.6. Máy phân tích quang	321
15.6.1. Nguyên lý hoạt động.....	321
15.6.2. Cấu tạo	322
15.6.2.1. Phân tích bằng bức xạ ánh sáng trông thấy và tia cực tím ..	323
15.6.2.2. Phân tích bằng bức xạ tia hồng ngoại	323
15.6.3. Ứng dụng.....	325

CHƯƠNG 1

NHỮNG NGUYÊN LÝ CƠ BẢN VÀ CÁC ĐẶC TRƯNG ĐO LƯỜNG

1.1. Các định nghĩa và đặc trưng chung

Các đại lượng vật lý là đối tượng đo lường như nhiệt độ, áp suất... được gọi là đại lượng cần đo m . Sau khi tiến hành các công đoạn thực nghiệm để đo m (dùng các phương tiện điện tử để xử lý tín hiệu) ta nhận được đại lượng điện tương ứng ở đầu ra. Đại lượng điện này cùng với sự biến đổi của nó chứa đựng tất cả các thông tin cần thiết để nhận biết m . Việc đo đạc m thực hiện được là nhờ sử dụng các cảm biến.

Cảm biến là thiết bị chịu tác động của đại lượng cần đo không có tính chất điện ký hiệu là m và cho ở đầu ra một đại lượng mang bản chất điện có thể đo được (như điện tích, điện áp, dòng điện hoặc trở kháng) ký hiệu là s . Đại lượng điện s là hàm của đại lượng cần đo m :

$$s = F(m) \quad (1.1)$$

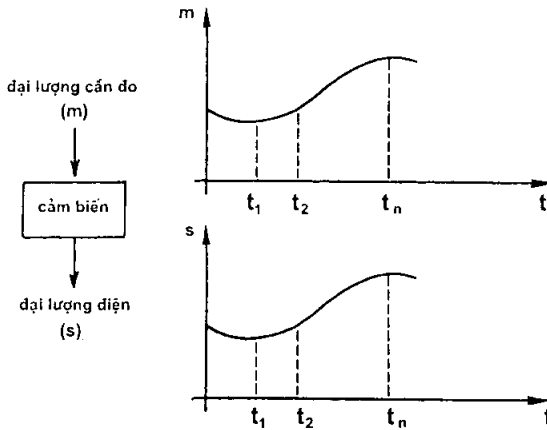
trong đó s được gọi là đại lượng đầu ra hoặc phản ứng của cảm biến và m là đại lượng đầu vào hay kích thích (có nguồn gốc là đại lượng cần đo). Việc đo đạc s cho phép nhận biết giá trị của m (h. 1.1).

Biểu thức $s = F(m)$ là dạng lý thuyết của định luật vật lý biểu diễn hoạt động của cảm biến, đồng thời là dạng số biểu diễn sự phụ thuộc của nó vào cấu tạo (hình học và kích thước), vật liệu làm cảm biến, đôi khi cả vào môi trường và chế độ sử dụng (nhiệt độ, nguồn nuôi). Đối với mọi cảm biến, để có thể khai thác biểu thức trên cần phải chuẩn cảm biến: với một loạt giá trị đã biết chính xác của m , đo giá trị tương ứng của s và dựng đường cong chuẩn (h. 1.2a). Đường cong chuẩn này cho phép xác định mọi giá trị của m từ s (h. 1.2b).

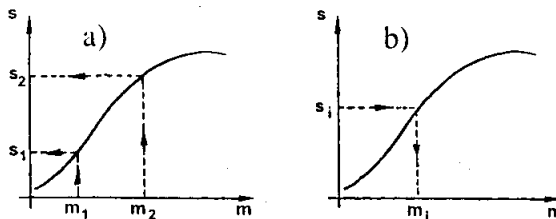
Để dễ sử dụng, thông thường người ta chế tạo cảm biến sao cho có sự liên hệ tuyến tính giữa biến thiên đầu ra Δs và biến thiên đầu vào Δm :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m \tag{1.2}$$

trong đó S là độ nhạy của cảm biến.



Hình 1.1: Sự biến đổi của đại lượng cần đo m và đáp ứng s theo thời gian.



Hình 1.2: Đường cong chuẩn cảm biến: a) dựng đường cong từ các giá trị đã biết của m ; b) khai thác đường cong chuẩn để xác định m từ giá trị s đo được.

Một trong những vấn đề quan trọng khi thiết kế và sử dụng cảm biến là làm sao cho độ nhạy S của chúng không đổi, nghĩa là S ít phụ thuộc nhất vào các yếu tố sau:

- Giá trị của đại lượng cần đo m (độ tuyến tính) và tần số thay đổi của nó (dải thông);
- Thời gian sử dụng (độ già hóa);
- Ảnh hưởng của các đại lượng vật lý khác (không phải là đại lượng đo) của môi trường xung quanh.

Vì cảm biến là một phần tử của mạch điện, có thể coi cảm biến:

- hoặc như một máy phát trong đó s là điện tích, điện áp hay dòng điện và như vậy ta có cảm biến loại tích cực gọi tắt là cảm biến tích cực.
- hoặc như một trở kháng, trong đó s là điện trở, độ tự cảm hoặc điện dung, trường hợp này ta có cảm biến loại thụ động gọi tắt là cảm biến thụ động.

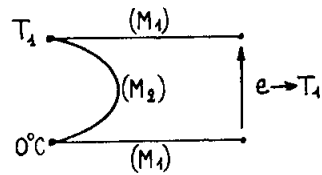
Cách phân biệt cảm biến tích cực và cảm biến thụ động dựa trên sơ đồ tương đương, trên thực tế là sự khác nhau về bản chất của chính hiện tượng vật lý được sử dụng trong nguyên lý chế tạo.

1.2. Cảm biến tích cực

Hoạt động như một máy phát, về mặt nguyên lý cảm biến tích cực thường dựa trên hiệu ứng vật lý biến đổi một dạng năng lượng nào đó (nhiệt, cơ hoặc bức xạ) thành năng lượng điện. Dưới đây mô tả một cách tổng quát các dạng ứng dụng của các hiệu ứng này.

Hiệu ứng nhiệt điện:

Giữa các đầu ra của hai dây dẫn có bản chất hóa học khác nhau được hàn lại với nhau thành một mạch điện có nhiệt độ ở hai mối hàn là T_1 và T_2 sẽ xuất hiện một suất điện động $e(T_1, T_2)$.

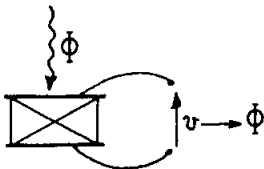


Hình 1.3: Ứng dụng hiệu ứng nhiệt điện.

Hiệu ứng này được ứng dụng để đo nhiệt độ T_1 khi biết trước nhiệt độ T_2 , thí dụ cho $T_2 = 0^\circ\text{C}$, (h. 1.3).

Hiệu ứng hóa điện:

Một số tinh thể, gọi là tinh thể hóa điện (thí dụ tinh thể sulfate triglycine), có tính phân cực điện tự phát phụ thuộc vào nhiệt độ. Trên các mặt đối diện của chúng tồn tại những điện tích trái dấu có độ lớn tỷ lệ thuận với độ phân cực điện.



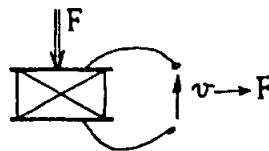
Hình 1.4: Ứng dụng hiệu ứng hóa điện.

Hiệu ứng hóa điện được ứng dụng để đo bức xạ hồng ngoại. Khi tinh thể hóa điện hấp thụ tia hồng ngoại, nhiệt độ của nó tăng lên làm thay đổi phân cực điện. Sự thay đổi phân cực này có thể xác định được bằng cách đo sự biến thiên của điện áp trên hai cực của tụ điện (h. 1.4).

Hiệu ứng áp điện:

Khi tác dụng lực cơ học lên một vật làm bằng vật liệu áp điện, thí dụ thạch anh, sẽ gây nên biến dạng của vật đó và làm xuất hiện lượng điện tích bằng nhau nhưng trái dấu trên các mặt đối diện của vật. Đó là hiệu ứng áp điện.

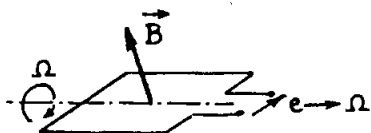
Hiệu ứng này được ứng dụng để xác định lực hoặc các đại lượng gây nên lực tác dụng vào vật liệu áp điện (như áp suất, gia tốc...) thông qua việc đo điện áp trên hai bản cực của tụ điện (h. 1.5).



Hình 1.5: Ứng dụng hiệu ứng áp điện.

Hiệu ứng cảm ứng điện từ:

Trong một dây dẫn chuyển động trong từ trường không đổi sẽ xuất hiện một suất điện động tỷ lệ với từ thông cắt ngang dây trong một đơn vị thời gian, nghĩa là tỷ lệ với tốc độ dịch chuyển của dây dẫn.



Hình 1.6: Ứng dụng hiệu ứng cảm ứng điện từ.

Cũng tương tự như vậy, trong một khung dây dẫn chịu tác động của từ thông biến thiên sẽ xuất hiện suất điện động bằng và ngược dấu với sự biến thiên của từ thông.

Hiệu ứng cảm ứng điện từ được ứng dụng để xác định tốc độ dịch chuyển của vật thông qua việc đo suất điện động cảm ứng (h. 1.6).

Hiệu ứng quang điện:

Hiệu ứng quang điện có nhiều dạng biểu hiện khác nhau nhưng đều cùng chung một bản chất: đó là hiện tượng giải phóng ra các hạt dẫn tự do trong vật liệu dưới tác dụng của bức xạ ánh sáng (hoặc bức xạ điện từ nói chung) có bước sóng nhỏ hơn giá trị ngưỡng đặc trưng cho vật liệu. Hiệu ứng này được ứng dụng để chế tạo các cảm biến quang (thí dụ các công tắc tự động đóng ngắt đèn chiếu sáng công cộng).

Hiệu ứng quang phát xạ điện tử:

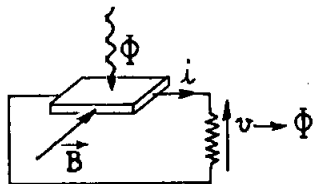
Hiệu ứng quang phát xạ là hiện tượng các điện tử được giải phóng thoát ra khỏi vật liệu tạo thành dòng được thu lại dưới tác dụng của điện trường.

Hiệu ứng quang điện trong chất bán dẫn:

Khi một chuyển tiếp P-N được chiếu sáng sẽ phát sinh ra các cặp điện tử-lỗ trống, chúng chuyển động dưới tác dụng của điện trường của chuyển tiếp làm thay đổi hiệu điện thế giữa hai đầu chuyển tiếp.

Hiệu ứng quang-điện-từ:

Khi tác dụng một từ trường B vuông góc với bức xạ ánh sáng, trong vật liệu bán dẫn được chiếu sáng sẽ xuất hiện một hiệu điện thế theo hướng vuông góc với từ trường B và với hướng bức xạ ánh sáng.



Hình 1.7: Ứng dụng hiệu ứng quang điện từ.

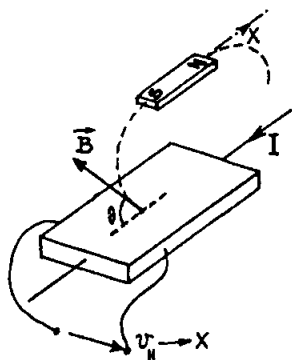
Hiệu ứng quang điện từ cho phép nhận được dòng hoặc thế phụ thuộc vào độ chiếu sáng. Dựa trên nguyên tắc này có thể đo các đại lượng quang hoặc biến đổi các thông tin chứa đựng trong ánh sáng thành tín hiệu điện (h. 1.7).

Hiệu ứng Hall:

Trong một vật liệu (thường là bán dẫn) dạng tấm mỏng có dòng điện chạy qua đặt trong từ trường B có phương tạo thành góc θ với dòng điện I, sẽ xuất hiện một hiệu điện thế V_H theo hướng vuông góc với B và I. Biểu thức của hiệu điện thế V_H có dạng:

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin\theta \quad (1.3)$$

trong đó K_H là hệ số phụ thuộc vào vật liệu và kích thước hình học của mẫu.



Hình 1.8: Ứng dụng hiệu ứng Hall.

Hiệu ứng Hall được ứng dụng để xác định vị trí của một vật chuyển động. Vật này được ghép nối cơ học với một thanh nam châm. Ở mọi thời điểm, vị trí của thanh nam châm xác định giá trị của từ trường B và góc θ tương ứng với tấm bán dẫn mỏng dùng làm vật trung gian. Vì vậy, hiệu điện thế V_H đo được giữa hai cạnh của tấm bán dẫn trong trường hợp này (một cách gián tiếp) là hàm phụ thuộc vào vị trí của vật trong không gian (h. 1.8).

Các cảm biến dựa trên hiệu ứng Hall là cảm biến tích cực bởi vì thông tin có liên quan đến suất điện động. Đây không phải là bộ chuyển đổi năng lượng bởi vì trong trường hợp này nguồn của dòng điện I (chứ không phải là đại lượng cần đo) cung cấp năng lượng liên quan đến tín hiệu đo.

1.3. Cảm biến thụ động

Cảm biến thụ động thường được chế tạo từ những trở kháng có một trong các thông số chủ yếu nhạy với đại lượng cần đo. Một mặt giá trị của trở kháng phụ thuộc vào kích thước hình học của mẫu, nhưng mặt khác nó còn phụ thuộc vào tính chất điện của vật liệu như điện trở suất ρ , độ từ thẩm μ , hằng số điện môi ϵ . Vì vậy, giá trị của trở kháng bị thay đổi khi đại lượng đo tác động gây ảnh hưởng riêng biệt đến kích thước hình học, tính chất điện hoặc ảnh hưởng đồng thời đến kích thước hình học và tính chất điện của vật liệu.

Thông số hình học hoặc kích thước của trở kháng có thể thay đổi nếu cảm biến có phần tử chuyển động hoặc phần tử biến dạng. Trong trường hợp thứ nhất, cảm biến có chứa phần tử động, mỗi vị trí của phần tử chuyển động tương ứng với một giá trị của trở kháng cho nên đo trở kháng sẽ xác định được vị trí của đối tượng. Đây là nguyên lý của nhiều loại cảm biến vị trí hoặc dịch chuyển (cảm biến điện thế, cảm biến cảm ứng có lõi động, tụ điện dùng bản cực di động...). Trong trường hợp thứ hai, cảm biến có phần tử biến dạng. Sự biến dạng được gây nên bởi lực hoặc các đại lượng dẫn đến lực (áp suất, gia tốc) tác dụng trực tiếp hoặc gián tiếp lên cảm biến (thí dụ bản cực di động của tụ điện chịu tác dụng của áp suất vi sai, cảm biến đo ứng lực liên quan chặt chẽ đến cấu trúc chịu tác động của ứng suất). Sự thay đổi của trở kháng (do biến dạng) liên quan đến lực tác động lên cấu trúc, nghĩa là tác động của đại lượng cần đo được biến đổi thành tín hiệu điện (hiệu ứng áp trở).

Phụ thuộc vào bản chất của các vật liệu khác nhau, tính chất điện của chúng có thể nhạy với nhiều đại lượng vật lý như nhiệt độ, độ chiếu sáng, áp suất, độ ẩm... Nếu chỉ có một trong số các đại lượng nêu trên có thể thay đổi và tất cả các đại lượng khác được giữ không đổi, chúng ta sẽ thiết lập được sự tương ứng đơn trị giữa giá trị của đại lượng này và trở kháng của cảm biến. Đường cong chuẩn sẽ thể hiện sự tương ứng đó và cho phép xác định giá trị của đại lượng cần đo từ phép đo trở kháng. Trong bảng 1.1 giới thiệu các đại lượng cần đo có khả năng làm thay đổi các tính chất điện của vật liệu sử dụng để chế tạo cảm biến thụ động.

Bảng 1.1.

Đại lượng cần đo	Đặc trưng nhạy cảm	Loại vật liệu sử dụng
Nhiệt độ	Điện trở suất, ρ	Kim loại: Pt, Ni, Cu Bán dẫn
Bức xạ ánh sáng	Điện trở suất, ρ	Thủy tinh Bán dẫn
Biến dạng	Điện trở suất, ρ Độ từ thẩm, μ	Hợp kim Ni, Si pha tạp Hợp kim sắt từ
Vị trí (nam châm)	Điện trở suất, ρ	Vật liệu từ điện trở: Bi, InSb
Độ ẩm	Điện trở suất, ρ Hằng số điện môi, ϵ	LiCl Al ₂ O ₃ , polyme
Mức chất lưu	Hằng số điện môi, ϵ	Chất lưu cách điện

Trở kháng của cảm biến thụ động và sự thay đổi của trở kháng dưới tác dụng của đại lượng cần đo chỉ có thể xác định được khi cảm biến là một thành phần trong một mạch điện. Trên thực tế, tùy từng trường hợp cụ thể mà người ta chọn mạch đo cho thích hợp với cảm biến.

1.4. Các đại lượng ảnh hưởng

Trong khi dùng cảm biến để xác định một đại lượng cần đo, không phải chỉ có một đại lượng này tác động đến cảm biến. Trên thực tế, ngoài đại lượng cần đo còn có nhiều đại lượng vật lý khác có thể gây tác động ảnh hưởng đến tín hiệu đo. Những đại lượng như vậy gọi là đại lượng ảnh hưởng hoặc đại lượng gây nhiễu. Thí dụ: nhiệt độ là đại lượng ảnh hưởng của cảm biến quang (quang trở), từ trường là đại lượng ảnh hưởng của cảm biến nhiệt (điện trở của germani).

Các đại lượng ảnh hưởng thường gặp và tác động của chúng có thể liệt kê như sau:

- Nhiệt độ làm thay đổi các đặc trưng điện, cơ và kích thước của cảm biến;
- Áp suất, gia tốc, dao động (rung) có thể gây nên biến dạng và ứng suất trong một số phân tử cấu thành của cảm biến làm sai lệch tín hiệu đáp ứng;
- Độ ẩm có thể làm thay đổi tính chất điện của vật liệu như hằng số điện môi ϵ , điện trở suất ρ ;

- Từ trường có thể gây nên suất điện động cảm ứng chống lên tín hiệu có ích. Ngoài ra nó còn làm thay đổi tính chất điện của vật liệu cấu thành cảm biến, thí dụ điện trở suất ρ trong trường hợp cảm biến có sử dụng vật liệu từ điện trở.

Biên độ và tần số của điện áp nuôi, thí dụ trường hợp biến thể vi sai, ảnh hưởng đến đại lượng điện ở đầu ra.

Nếu gọi các đại lượng ảnh hưởng là g_1, g_2, \dots thì mối quan hệ $s = F(m)$ giữa đại lượng điện ở đầu ra s và đại lượng đo m ở đầu vào được viết lại dưới dạng biểu thức

$$s = F(m, g_1, g_2, \dots) \quad (1.4)$$

Để có thể rút ra giá trị cần đo m từ các giá trị đo được của s cần phải áp dụng một trong những biện pháp sau đây:

- Giảm ảnh hưởng của các đại lượng g_1, g_2, \dots đến mức thấp nhất bằng cách sử dụng các biện pháp hữu hiệu như cách điện, chống rung, chống từ trường...
- Ổn định các đại lượng ảnh hưởng ở những giá trị biết trước và chuẩn cảm biến trong những điều kiện đó (bình ổn nhiệt, nguồn điện áp có bộ phận điều chỉnh...);
- Sử dụng các sơ đồ ghép nối cho phép bù trừ ảnh hưởng của đại lượng gây nhiễu (cầu Wheatstone với cảm biến đồng dạng đặt trong nhánh kề với cảm biến đo).

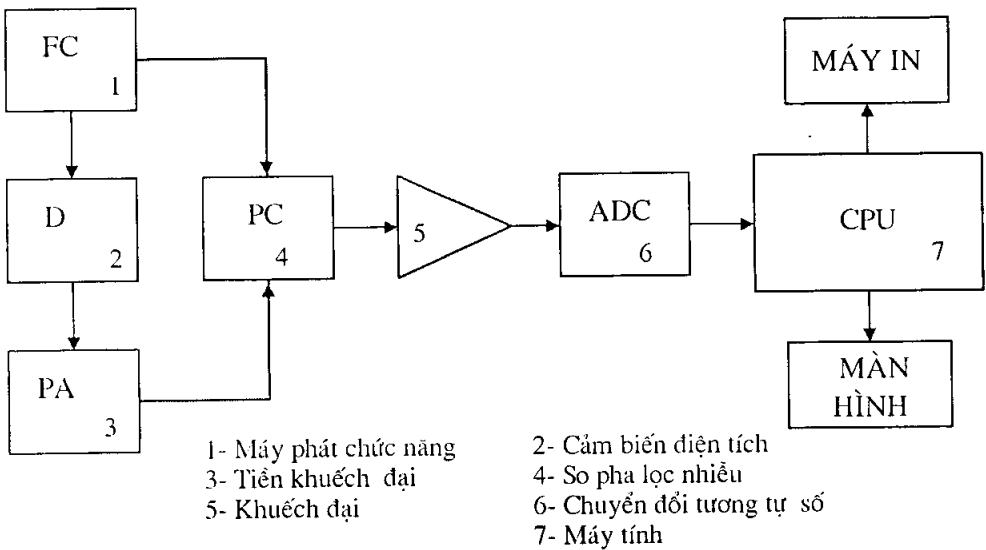
1.5. Mạch đo

Mạch đo bao gồm toàn bộ các thiết bị đo (trong đó kể cả cảm biến) cho phép xác định chính xác đại lượng cần đo trong những điều kiện tốt nhất có thể.

Ở đầu vào của mạch, cảm biến chịu tác động của đại lượng cần đo (tác động trực tiếp nếu là cảm biến tích cực, hoặc gián tiếp thông qua bộ phận biến đổi nếu là cảm biến thụ động) gây nên tín hiệu điện mang theo thông tin về đại lượng cần đo.

Ở đầu ra của mạch, tín hiệu điện đã qua xử lý được chuyển đổi sang dạng có thể đọc được trực tiếp giá trị cần tìm của đại lượng đo. Việc chuẩn hệ đo đảm bảo cho mỗi giá trị chỉ thị ở đầu ra tương ứng với một giá trị của đại lượng đo tác động ở đầu vào của mạch.

Dạng đơn giản nhất của mạch đo bao gồm cảm biến, bộ phận biến đổi tín hiệu và thiết bị chỉ thị, thí dụ mạch đo chỉ gồm một cặp nhiệt ghép nối trực tiếp với một milivôn kế. Tuy nhiên, điều kiện đo trên thực tế thường do môi trường bao quanh đòi hỏi, đồng thời do sự cần thiết của việc khai thác tín hiệu, mạch đo thường bao gồm nhiều thành phần trong đó có các khối để tối ưu hóa việc thu thập dữ liệu và để xử lý dữ liệu, thí dụ như mạch tuyến tính hóa tín hiệu nhận từ cảm biến, mạch khử điện dung ký sinh, các bộ chuyển đổi nhiều kênh, bộ khuếch đại, bộ so pha lọc nhiễu, bộ chuyển đổi tương tự - số, bộ vi xử lý, các thiết bị hỗ trợ... Trên hình 1.9 biểu diễn một mạch điện đo điện thế trên bề mặt màng nhạy quang được lắp ráp từ nhiều phần tử.



Hình 1.9: Mạch đo điện thế bề mặt.

1.6. Sai số của phép đo

Sản phẩm của mọi phép đo đều được ghi lại ở dạng này hoặc dạng khác, có khi là một con số, cũng có khi là một đường cong. Song bất luận trong trường hợp nào, cho dù phép đo có rất đơn giản thì kết quả của nó cũng đều chứa đựng sai số. Các giá trị của mọi đại lượng cần đo đều chỉ có thể biết được sau khi xử lý qua mạch đo. Chính giá trị thực của đại lượng đo xác định sự kích thích tác động lên cảm biến, nhưng người làm thực nghiệm chỉ có được đáp ứng tổng thể của hệ đo. đáp ứng này được biểu diễn qua đơn vị

của đại lượng đo và được gọi là giá trị đo. Hiệu số giữa giá trị thực và giá trị đo được là sai số của phép đo. Sai số của phép đo chỉ có thể được đánh giá một cách ước tính bởi vì không thể biết giá trị thực của đại lượng đo.

Khi đánh giá sai số người ta thường phân chúng làm hai loại, sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên.

1.6.1. Sai số hệ thống

Có thể đưa ra một thí dụ để minh họa sai số hệ thống. Giả sử ta đo một đại lượng đã biết trước giá trị thực của nó. Nếu như giá trị trung bình của các giá trị đo được luôn luôn lệch khỏi giá trị thực không phụ thuộc vào số lần đo liên tiếp thì ta nói trong trường hợp này có sai số hệ thống.

Đối với một giá trị cho trước của đại lượng đo, sai số hệ thống có thể không đổi hoặc thay đổi chậm theo thời gian đo: nó thêm vào một độ lệch không đổi giữa giá trị thực và giá trị đo được.

Sai số hệ thống thường có nguyên nhân do sự hiểu biết sai lệch hoặc không đầy đủ về hệ đo hay do điều kiện sử dụng không tốt. Trong phần tiếp theo của đề mục này sẽ trình bày những nguyên nhân thường gặp của sai số hệ thống.

Sai số do giá trị của đại lượng chuẩn không đúng:

Thí dụ, điểm 0 của thiết bị đo bị lệch khỏi vị trí, giá trị sai lệch của nhiệt độ chuẩn cấp nhiệt (trường hợp dùng hỗn hợp nước-nước đá không sạch), giá trị điện áp nuôi cầu đo không chính xác... Những sai số loại này có thể giảm bằng cách kiểm tra kỹ càng các thiết bị phụ trợ trong mạch đo.

Sai số do đặc tính của cảm biến:

Sai số độ nhạy hoặc sai số của đường cong chuẩn là nguyên nhân thường gặp dẫn đến sai số hệ thống. Thí dụ, hệ số K của cảm biến ứng lực thường do nhà sản xuất xác định dựa trên việc đo K của các cảm biến cùng được chế tạo một lần (cùng một lô sản phẩm). Tuy nhiên một cảm biến đặc biệt nào đó trong lô có thể có hệ số K khác đôi chút so với K của cảm biến đã kiểm định. Trường hợp già hóa của cảm biến do độ mỏi cơ học của các phân tử của cảm biến hoặc hư hỏng hóa học cũng thường kéo theo sự sai lệch khỏi đường cong chuẩn ban đầu, đặc biệt đối với cặp nhiệt và nhiệt điện trở. Để tránh sai số hệ thống trong những trường hợp như vừa nêu ở trên, cần phải thường xuyên chuẩn lại cảm biến.

Sai số do điều kiện và chế độ sử dụng:

Tốc độ đáp ứng của cảm biến và các thiết bị phụ trợ thường có hạn. Bởi vậy tất cả các phép đo tiến hành trước khi chế độ hoạt động bình thường của hệ đo được thiết lập đều chứa sai số. Thí dụ, một đầu đo nhiệt độ có tốc độ đáp ứng rất khác nhau phụ thuộc vào việc nó được đặt trong chất lỏng đứng yên hay có dòng chảy.

Sự có mặt của cảm biến làm thay đổi đại lượng đo dẫn đến sai số, thí dụ trường hợp đầu đo nhiệt có nhiệt dung và quán tính nhiệt không thể bỏ qua khi nó được đặt trong môi trường có thể tích nhỏ.

Sai số do xử lý kết quả đo:

Sai số dạng này thường là hậu quả của sự nhận xét đánh giá không chính xác khi tiến hành hiệu chỉnh các kết quả đo chứa những điểm có độ lệch lớn để nhận được giá trị chính xác hơn. Có thể lấy vài thí dụ để minh chứng:

- Kết quả đo lệch khỏi độ tuyến tính trong phép đo sử dụng cảm biến giả thiết là tuyến tính. Trường hợp này do giả thiết sai dẫn đến xử lý sai kết quả đo.
- Nhiệt độ đo được của cảm biến và nhiệt độ môi trường cần đo khác nhau, nguyên nhân là do có độ dẫn nhiệt của vỏ cảm biến hoặc dây dẫn. Trường hợp này do không đánh giá đúng sự tiêu hao nhiệt lượng nên xử lý sai kết quả đo.

1.6.2. Sai số ngẫu nhiên

Sai số ngẫu nhiên của phép đo là sai số mà sự xuất hiện cũng như dấu và biên độ của chúng mang tính không xác định. Một số nguyên nhân của sai số ngẫu nhiên có thể dự đoán được nhưng độ lớn của chúng thì không thể biết trước. Dưới đây trình bày một số nguyên nhân có thể dẫn đến sai số ngẫu nhiên.

Sai số do tính không xác định của đặc trưng thiết bị:

Nguyên nhân đầu tiên có thể gặp là tính linh động của thiết bị. Ở dưới một giá trị ngưỡng nhất định, sự thay đổi của đại lượng đo không dẫn đến sự thay đổi có thể phát hiện được của tín hiệu điện do cảm biến cung cấp. Thí dụ trường hợp điện thế kế loại dây cuốn, sự dịch chuyển của con chạy đi một khoảng nhỏ hơn khoảng cách giữa hai vòng dây sẽ không gây nên bất kỳ sự thay đổi nào của điện thế trên con chạy. Sai số độ linh động bằng biến thiên

lớn nhất của đại lượng đo để gây nên sự thay đổi có thể nhận biết được của đại lượng đầu ra của cảm biến.

Nguyên nhân sai số cũng có thể là do đọc sai số liệu. Sự sai lệch này, một mặt dù ít hoặc nhiều do thói quen của người làm thực nghiệm, nhưng mặt khác do chất lượng thiết bị, thí dụ độ mảnh của kim chỉ thị của đồng hồ đo cũng có thể gây nên sai số.

Kết hợp sai số độ linh động ε_m và sai số đọc số liệu ε_r sẽ xác định sai số độ phân giải ε_r . Sai số độ phân giải là biến thiên nhỏ nhất có thể đo được của đại lượng đo:

$$\varepsilon_r = \sqrt{\varepsilon_m^2 + \varepsilon_r^2} \quad (1.5)$$

Sai số trễ xảy ra khi một trong những thành phần của mạch đo chứa phần tử có độ trễ (thí dụ trễ cơ học của lò xo, trễ từ của vật liệu sắt từ). Đáp ứng của hệ đo trong trường hợp này phụ thuộc vào điều kiện sử dụng trước đó.

Sai số do tín hiệu nhiễu ngẫu nhiên:

Nhiều nền gây nên kích thích nhiệt của hạt dẫn trong các điện trở hoặc trong các linh kiện tích cực làm xuất hiện thăng giáng điện áp chồng lên tín hiệu có ích ở đầu ra.

Cảm ứng ký sinh do bức xạ điện từ, đặc biệt ở tần số công nghiệp, cũng là nguyên nhân gây nên sai số.

Thăng giáng điện áp nguồn làm thay đổi hoạt động của thiết bị (mạch ổn áp, khuếch đại) do đó thay đổi biên độ của tín hiệu cần xử lý và không thể phân biệt sự thay đổi này với biến thiên của đại lượng đo. Đó cũng là nguyên nhân của sai số ngẫu nhiên có nguồn gốc là tín hiệu nhiễu.

Sai số do các đại lượng ảnh hưởng:

Hậu quả của sự thay đổi của các đại lượng ảnh hưởng không được tính đến trong khi chuẩn cảm biến. Bởi vậy sự đóng góp của chúng trong kết quả đo được xem như sai số ngẫu nhiên. Thí dụ, nếu một thiết bị được chuẩn ở 20 °C thì mọi thay đổi nhiệt độ ở dưới và trên 20 °C đều kéo theo những biến thiên trong hoạt động của thiết bị và của tín hiệu đo được.

Biện pháp giảm sai số ngẫu nhiên:

Trong nhiều trường hợp, có thể giảm độ lớn của sai số ngẫu nhiên bằng một số biện pháp thực nghiệm thích hợp, thí dụ: bảo vệ mạch đo bằng

cách ổn định nhiệt độ và độ ẩm của môi trường đo, sử dụng các giá đỡ chống rung, sử dụng các bộ tự động điều chỉnh điện áp nguồn nuôi, các bộ chuyển đổi tương tự - số có độ phân giải thích hợp, che chắn và nối đất các thiết bị đo điện, sử dụng bộ lọc tín hiệu đo v.v... Ngoài ra, việc áp dụng chế độ vận hành đúng đắn cũng là một biện pháp tốt để giảm bớt sai số ngẫu nhiên.

1.6.3. Tính trung thực, tính đúng đắn và độ chính xác

Sai số ngẫu nhiên làm cho các kết quả đo bị tản mạn khi đo lặp lại. Tuy nhiên, bằng phương pháp xử lý thống kê có thể xác định được giá trị xác suất của đại lượng đo và giới hạn của sai số.

Khi đo lặp lại n lần cùng một giá trị của đại lượng cần đo ta nhận được các kết quả m_1, m_2, \dots, m_n . Giá trị trung bình sau n lần đo sẽ là:

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \quad (1.6)$$

Chỉ số độ tản mạn của kết quả của n lần đo này được biểu diễn thông qua độ lệch σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n - 1}} \quad (1.7)$$

Các sai số ngẫu nhiên tác động đến các lần đo một cách hoàn toàn không phụ thuộc lẫn nhau. Bởi vậy xác suất xuất hiện các kết quả khác nhau sẽ tuân theo định luật phân bố Gauss.

Xác suất $P(m_1, m_2)$ nhận được giá trị đo nằm trong khoảng giữa m_1 và m_2 được viết dưới dạng biểu thức:

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm \quad (1.8)$$

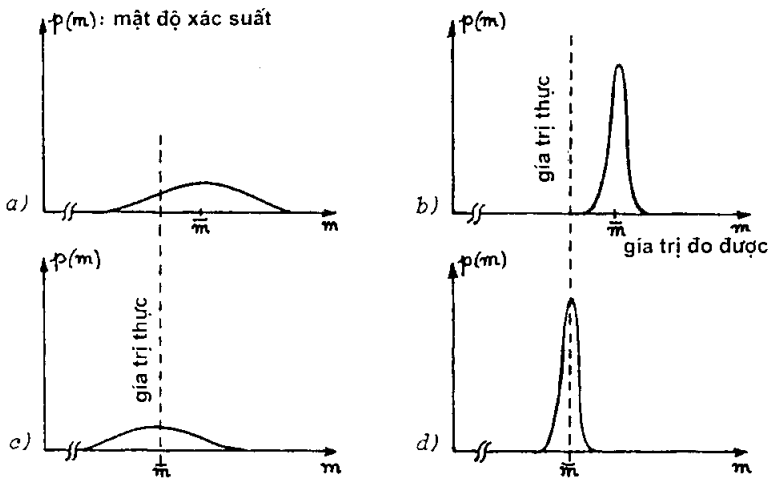
trong đó $p(m)$ là mật độ xác suất của giá trị m của đại lượng đo. Trong trường hợp phân bố Gauss:

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(m - \bar{m})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.9)$$

Tính trung thực là chất lượng của thiết bị đo có sai số ngẫu nhiên nhỏ thể hiện ở chỗ kết quả của các lần đo tập trung xung quanh giá trị trung bình \bar{m} .

Tính đúng đắn là chất lượng của thiết bị đo có sai số hệ thống nhỏ: giá trị xác suất thường gặp của đại lượng đo gần với giá trị thực.

Độ chính xác là đặc trưng của thiết bị cho các kết quả đo đơn lẻ gần với giá trị thực của đại lượng đo. Thiết bị chính xác đồng thời cũng là thiết bị có độ trung thực và đúng đắn (h. 1.10).



Hình 1.10: Các dạng kết quả đo khác nhau: a) sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên lớn, thiết bị không đúng đắn và không trung thực; b) sai số hệ thống lớn, sai số ngẫu nhiên nhỏ, thiết bị trung thực nhưng không đúng đắn; c) sai số hệ thống nhỏ, sai số ngẫu nhiên lớn, thiết bị đúng đắn nhưng không trung thực; d) sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên nhỏ, thiết bị đúng đắn, trung thực và chính xác.

1.7. Chuẩn cảm biến

Chuẩn cảm biến có mục đích diễn giải tường minh, dưới dạng đồ thị hoặc đại số, mối quan hệ giữa giá trị m của đại lượng đo và giá trị s đo được của đại lượng điện ở đầu ra có tính đến các thông số ảnh hưởng.

Các thông số ảnh hưởng này có thể là các đại lượng vật lý liên quan đến đại lượng đo (mà cảm biến rất nhạy với những biến thiên của chúng), thí dụ như chiều và tốc độ biến thiên của đại lượng đo. Chúng cũng có thể là các đại lượng vật lý không liên quan đến đại lượng đo nhưng tác động đến cảm biến trong quá trình sử dụng và làm thay đổi đáp ứng, thí dụ các đại lượng ảnh

hướng của môi trường như nhiệt độ, độ ẩm hay các đại lượng ảnh hưởng của nguồn nuôi như biên độ, tần số, điện áp làm việc của cảm biến.

1.7.1. Chuẩn đơn giản

Chuẩn đơn giản là phép đo trong đó chỉ có một đại lượng vật lý duy nhất tác động lên một đại lượng đo xác định và sử dụng một cảm biến không nhạy với các đại lượng ảnh hưởng và cũng không chịu tác động của các đại lượng này. Đây là trường hợp đặc biệt của các đại lượng đo tĩnh, nghĩa là các đại lượng có giá trị không đổi, thí dụ đo khoảng cách cố định bằng một cảm biến mà chỉ thị của nó không phụ thuộc vào nhiệt độ và các đại lượng ảnh hưởng, đo một nhiệt độ không đổi bằng một cặp nhiệt...

Trong những điều kiện như vậy, chuẩn cảm biến chính là kết hợp các giá trị hoàn toàn xác định của đại lượng đo với các giá trị tương ứng của đại lượng điện ở đầu ra. Việc chuẩn được tiến hành bằng một trong các cách sau đây:

- Chuẩn trực tiếp: các giá trị khác nhau của đại lượng đo lấy từ các mẫu chuẩn hoặc các phân tử so sánh có giá trị biết trước với độ chính xác cao.
- Chuẩn gián tiếp: sử dụng kết hợp cảm biến cân chuẩn với một cảm biến so sánh đã có sẵn đường cong chuẩn, cả hai được đặt trong cùng điều kiện làm việc. Khi tác động lần lượt lên hai cảm biến bằng cùng một giá trị của đại lượng đo, ta nhận được các kết quả tương ứng của cảm biến so sánh và cảm biến cân chuẩn. Lặp lại tương tự với các giá trị khác của đại lượng đo sẽ cho phép xây dựng đường cong chuẩn cho cảm biến cân chuẩn.

1.7.2. Chuẩn nhiều lần

Khi cảm biến có chứa những phân tử có độ trễ (trễ cơ hoặc trễ từ), giá trị đo được ở đầu ra phụ thuộc không những vào giá trị tức thời của đại lượng cần đo ở đầu vào mà còn phụ thuộc vào giá trị trước đó của đại lượng này. Trong những trường hợp như vậy cần phải áp dụng phương pháp chuẩn nhiều lần và tiến hành như sau:

- Đặt lại điểm 0 của cảm biến: đại lượng cần đo và đại lượng đầu ra có các giá trị tương đương với điểm gốc, $m = 0$ và $s = 0$.
- Dùng lại đại lượng đầu ra bằng cách lúc đầu tăng giá trị của đại lượng cần đo ở đầu vào đến cực đại, sau đó giảm giá trị đo. Các giá trị biết trước của đại lượng cần đo cho phép xác định đường cong chuẩn theo cả hai hướng đo tăng dần và giảm dần.

Các tính chất vật lý của vật liệu chịu tác động của đại lượng cần đo có thể là một trong những thông số quyết định ảnh hưởng đến đáp ứng của cảm biến. Thí dụ điện dung của cảm biến tụ điện đo mức chất lỏng không những phụ thuộc vào chiều cao của chất lỏng mà còn phụ thuộc vào hằng số điện môi ϵ của nó. Điện trở của đầu đo nhiệt độ bề mặt của một vật là hàm của nhiệt độ bề mặt và bản chất của lớp vật liệu nằm dưới bề mặt đó, sự dãn nở của lớp vật liệu này gây nên ứng lực cho cảm biến. Trong những trường hợp tương tự như vậy, cần phải tiến hành chuẩn cảm biến riêng biệt đối với từng loại vật liệu.

1.8. Độ nhạy

1.8.1. Định nghĩa

Độ nhạy S xung quanh một giá trị không đổi m_i của đại lượng đo được xác định bởi tỷ số giữa biến thiên Δs của đại lượng ở đầu ra và biến thiên Δm tương ứng của đại lượng đo ở đầu vào:

$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i} \quad (1.10)$$

Thông thường, nhà sản xuất cung cấp giá trị của độ nhạy S tương ứng với những điều kiện làm việc nhất định của cảm biến. Nhờ giá trị đó, người sử dụng có thể đánh giá được độ lớn của đại lượng đầu ra của cảm biến và độ lớn của những biến thiên của đại lượng đo. Điều này cho phép lựa chọn được cảm biến thích hợp để sao cho mạch đo thỏa mãn các điều kiện đặt ra.

Đơn vị đo của độ nhạy phụ thuộc vào nguyên lý làm việc của cảm biến và các đại lượng liên quan, thí dụ:

- $\Omega/^\circ\text{C}$ đối với nhiệt điện trở,
- $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ đối với cặp nhiệt.

Đối với các cảm biến khác nhau cùng dựa trên một nguyên lý vật lý, trị số của độ nhạy S có thể phụ thuộc vào vật liệu, kích thước hay kiểu lắp ráp. Ngoài ra độ nhạy có thể là hàm của các thông số bổ sung nếu như các thông số này ảnh hưởng đến đáp ứng của cảm biến. Đây là trường hợp của điện áp và tần số nguồn nuôi, nhiệt độ môi trường, tần số biến thiên của đại lượng đo. Một số cảm biến, thí dụ biến thế vi sai, có đáp ứng tỷ lệ với biên độ điện áp nuôi E , khi đó:

$$S(E) = S_1 \cdot E = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i} \quad (1.11)$$

nghĩa là:

$$S_1 = \frac{1}{E} \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i} \quad (1.12)$$

Trong trường hợp này nhà sản xuất phải chỉ ra độ nhạy S_1 tính theo vôn của điện áp nguồn nuôi. Ngoài ra, khi linh kiện phản ứng trong mạch đo của cảm biến là một trở kháng, tần số của điện áp nuôi cũng ảnh hưởng đến độ nhạy, thí dụ biến thể vì sai loại T10N của hãng IFELEC có các thông số do nhà sản xuất cung cấp như sau:

- $S_1 = 1,5 \text{ mV/mm/V}$ sơ cấp ở tần số 50 Hz;
- $S_1 = 17 \text{ mV/mm/V}$ sơ cấp ở tần số 400 Hz.

1.8.2. Độ nhạy trong chế độ tĩnh

Chuẩn cảm biến ở chế độ tĩnh là dựng lại các giá trị s_i của đại lượng điện ở đầu ra tương ứng với các giá trị không đổi m_i của đại lượng đo khi đại lượng này đạt chế độ làm việc danh định. Đặc trưng tĩnh của cảm biến chính là dạng chuyển đổi đồ thị của việc chuẩn đó và điểm làm việc Q_i của cảm biến chính là đặc trưng tĩnh tương ứng với các giá trị m_i, s_i .

Từ định nghĩa chung về độ nhạy ở mục trước có thể xác định độ nhạy trong chế độ tĩnh ở điểm làm việc Q_i . Độ nhạy này bằng tỷ số giữa số gia Δs và số gia Δm tương ứng. Như vậy, độ nhạy trong chế độ tĩnh chính là độ dốc của đặc trưng tĩnh ở điểm làm việc. Nếu đặc trưng tĩnh không phải là tuyến tính thì độ nhạy trong chế độ tĩnh phụ thuộc vào điểm làm việc. Hai thí dụ tiếp theo đây là minh họa cho điều này:

- Đối với điện trở làm bằng platin có giá trị bằng 100Ω ở 0°C , sự biến thiên theo nhiệt độ là hàm gần như tuyến tính trong dải nhiệt độ từ 0°C đến 150°C , do vậy ở 0°C độ nhạy tĩnh $S = 0,39 \Omega/^\circ\text{C}$ và ở 130°C $S = 0,38 \Omega/^\circ\text{C}$;
- Đối với nhiệt điện trở loại 5000Ω ở 25°C (ký hiệu 35J3 do hãng OMEGA sản xuất) có biến thiên của điện trở là hàm không tuyến tính của nhiệt độ cho nên ở 0°C độ nhạy tĩnh $S = 835 \Omega/^\circ\text{C}$ và ở 130°C $S = 3,8 \Omega/^\circ\text{C}$.

Tỷ số giữa giá trị s_i ở đầu ra và giá trị m_i tương ứng của đại lượng đo ở đầu vào gọi là tỷ số chuyển đổi tĩnh r_i :

$$r_i = \left(\frac{s}{m} \right)_{Q_i} \quad (1.13)$$

Tỷ số chuyển đổi tĩnh không phụ thuộc vào điểm làm việc Q_i và chỉ bằng S trong trường hợp đặc trưng tĩnh là đường thẳng đi qua gốc tọa độ.

1.8.3. Độ nhạy trong chế độ động

Độ nhạy trong chế độ động được xác định khi đại lượng đo là hàm tuần hoàn của thời gian. Trong điều kiện như vậy, đại lượng đầu ra s ở chế độ làm việc danh định cũng là hàm tuần hoàn của thời gian giống như đại lượng đo.

Giả sử sự biến thiên của đại lượng đo m theo thời gian có dạng:

$$m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t \quad (1.14)$$

trong đó m_0 là giá trị không đổi, m_1 là biên độ và $f = \omega/2\pi$ là tần số biến thiên của đại lượng đo.

Ở đầu ra của cảm biến, đáp ứng s được mô tả bởi biểu thức:

$$s(t) = s_0 + s_1 \cos(\omega t + \psi) \quad (1.15)$$

trong đó:

- s_0 là giá trị không đổi tương ứng với m_0 xác định điểm Q_0 trên đường cong chuẩn ở chế độ tĩnh;
- s_1 là biên độ biến thiên ở đầu ra do thành phần biến thiên của đại lượng đo gây nên;
- ψ là độ lệch pha giữa đầu vào và đầu ra.

Độ nhạy động trong trường hợp này được xác định như tỷ số giữa biến thiên của s và m :

$$S = \left(\frac{s_1}{m_1} \right)_{Q_0} \quad (1.16)$$

Trong chế độ động sự phụ thuộc của độ nhạy vào tần số của đại lượng đo $S(f)$ xác định đặc tính tần của cảm biến.

Sự biến thiên của độ nhạy là hàm của tần số, nói chung, có nguồn gốc là do quán tính cơ, nhiệt hoặc điện của đầu đo, tức là của cảm biến và các thiết bị phụ trợ, bởi vì chúng không thể cung cấp tức thời tín hiệu điện theo kịp với biến thiên của đại lượng đo. Sự không tức thời này càng lớn khi tần số càng cao. Quán tính luôn luôn gắn liền với nguyên lý vật lý làm cơ sở cho hoạt động của cảm biến, nhưng nó cũng thường do sự có mặt của các linh kiện điện tử như điện trở, cuộn cảm và điện dung góp thêm những hằng số thời gian vào đáp ứng (như RC hay L/R). Bởi vậy khi xét đáp ứng phụ thuộc vào tần số cần phải xem xét sơ đồ mạch đo của cảm biến một cách tổng thể.

1.9. Độ tuyến tính

1.9.1. Điều kiện có tuyến tính

Một cảm biến được gọi là tuyến tính trong một dải đo xác định nếu trong dải đó độ nhạy không phụ thuộc vào giá trị của đại lượng đo. Nếu như cảm biến không phải là tuyến tính, người ta có thể đưa vào mạch đo các thiết bị hiệu chỉnh, gọi là tuyến tính hóa, có tác dụng làm cho tín hiệu điện tỷ lệ với sự thay đổi của đại lượng đo.

Trong chế độ tĩnh, độ tuyến tính thể hiện bằng các đoạn thẳng trên đặc tuyến tĩnh, và hoạt động của cảm biến là tuyến tính chừng nào các thay đổi của đại lượng đo còn ở trong vùng này.

Trong chế độ động, độ tuyến tính bao gồm sự không phụ thuộc của độ nhạy ở chế độ tĩnh $S(0)$ vào đại lượng đo m , đồng thời các thông số quyết định đáp ứng (như tần số riêng f_0 của dao động không tắt, hệ số tắt dần ζ) cũng không phụ thuộc vào đại lượng đo.

1.9.2. Đường thẳng tốt nhất - độ lệch tuyến tính

Khi chuẩn cảm biến người làm thực nghiệm nhận được một loạt các điểm tương ứng của s_i , m_i . Ngay cả trong trường hợp về mặt lý thuyết cảm biến là tuyến tính thì các điểm này cũng không nằm trên một đường thẳng. Đó là bởi vì có sự không chính xác trong khi đo và những sai lệch trong khi chế tạo cảm biến. Tuy nhiên, từ các điểm thực nghiệm có thể tính được phương trình đường thẳng biểu diễn sự tuyến tính của cảm biến. Đường thẳng này gọi là đường thẳng tốt nhất. Biểu thức của đường thẳng tốt nhất được tính bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất:

$$s = a m + b \quad (1.17)$$

trong đó:

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - \sum s_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} \quad (1.18)$$

$$b = \frac{\sum s_i \cdot \sum m_i^2 - \sum s_i \cdot m_i \cdot \sum m_i}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} \quad (1.19)$$

với N là số điểm thực nghiệm đo chuẩn cảm biến.

Độ lệch tuyến tính là khái niệm cho phép đánh giá độ tuyến tính của đường cong chuẩn. Nó được xác định từ độ lệch cực đại giữa đường cong chuẩn và đường thẳng tốt nhất (tính bằng %) trong dải đo.

1.10. Độ nhanh - thời gian đáp ứng

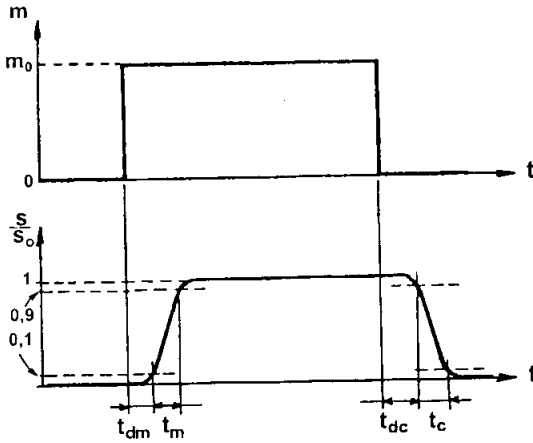
Độ nhanh là đặc trưng của cảm biến cho phép đánh giá xem đại lượng đầu ra có theo kịp về thời gian với biến thiên của đại lượng đo không. Thời gian đáp ứng là đại lượng được sử dụng để xác định giá trị số của độ nhanh.

Độ nhanh t_r là khoảng thời gian từ khi đại lượng đo thay đổi đột ngột đến khi biến thiên của đại lượng đầu ra s của cảm biến chỉ còn khác giá trị cuối cùng của nó một lượng qui định bằng ε %.

Cảm biến càng nhanh thì thời gian đáp ứng của nó càng nhỏ. Thời gian đáp ứng đặc trưng cho tốc độ tiến triển của chế độ quá độ (chế độ sau thời điểm xảy ra biến thiên đại lượng đo) và là hàm của các thông số xác định chế độ này.

Thời gian đáp ứng tương ứng với ε % xác định khoảng thời gian cần thiết phải chờ đợi sau khi có biến thiên của đại lượng đo để lấy giá trị s ở đầu ra với độ chính xác quy định trước. Ngoài ra, người ta cũng xác định những khoảng thời gian khác nữa để đặc trưng cho chế độ quá độ (h. 1.11).

Trong trường hợp sự thay đổi của đại lượng đo có dạng bậc thang dẫn đến sự tăng lên của đại lượng đầu ra, khoảng thời gian trễ khi tăng lên, t_{dm} , là thời gian cần thiết để đại lượng đầu ra s tăng từ giá trị ban đầu của nó đến 10 % của biến thiên tổng cộng của đại lượng này và khoảng thời gian tăng t_m là thời gian cần thiết để đại lượng đầu ra s tăng từ 10 % đến 90 % của biến thiên tổng cộng của nó.



Hình 1.11: Các khoảng thời gian khác nhau đặc trưng cho chế độ quá độ.

Trong trường hợp sự thay đổi của đại lượng đo có dạng bậc thang dẫn đến sự giảm xuống của đại lượng đầu ra, khoảng thời gian trễ khi giảm xuống, t_{dc} , là thời gian cần thiết để đại lượng đầu ra s giảm từ giá trị ban đầu của nó đến 10 % của biến thiên tổng cộng của đại lượng này và khoảng thời gian giảm xuống t_c là thời gian cần thiết để đại lượng đầu ra s giảm từ 10 % đến 90 % của biến thiên tổng cộng của nó.

Như vậy, thông qua các thông số t_r , t_{dm} , t_m , t_{dc} , t_c của một cảm biến có thể đánh giá về thời gian đáp ứng của nó.

1.11. Giới hạn sử dụng cảm biến

Trong quá trình sử dụng, các cảm biến luôn chịu ứng lực cơ khí hoặc nhiệt tác động lên chúng. Nếu các ứng lực này vượt quá ngưỡng cho phép, chúng sẽ làm thay đổi các đặc trưng làm việc của cảm biến. Bởi vậy người sử dụng phải biết các giới hạn ngưỡng của cảm biến và tuân thủ chúng trong khi sử dụng cảm biến.

Vùng làm việc danh định:

Vùng này tương ứng với những điều kiện sử dụng bình thường của cảm biến. Biên giới của vùng là các giá trị ngưỡng mà các đại lượng đo, các đại lượng vật lý có liên quan đến đại lượng đo hoặc các đại lượng ảnh hưởng có thể thường xuyên đạt tới mà không làm thay đổi các đặc trưng làm việc danh định của cảm biến.

Vùng không gây nên hư hỏng:

Khi các giá trị của đại lượng đo hoặc các đại lượng liên quan và các đại lượng ảnh hưởng vượt quá ngưỡng của vùng làm việc danh định nhưng vẫn còn trong phạm vi của vùng không gây nên hư hỏng, các đặc trưng của cảm biến có nguy cơ bị thay đổi nhưng những thay đổi này có tính chất thuận nghịch, tức là khi trở về vùng danh định thì các đặc trưng của cảm biến cũng sẽ tìm lại được giá trị ban đầu của chúng.

Vùng không phá hủy:

Khi các giá trị của đại lượng đo hoặc các đại lượng liên quan và các đại lượng ảnh hưởng vượt qua ngưỡng của vùng không gây nên hư hỏng nhưng vẫn còn trong phạm vi của vùng không phá hủy, các đặc trưng của cảm biến bị thay đổi, và sự thay đổi này không thuận nghịch, tức là khi trở về vùng danh định các đặc trưng của cảm biến cũng sẽ không tìm lại được giá trị ban đầu của chúng. Trong trường hợp như vậy, nếu muốn tiếp tục sử dụng cảm biến cần phải tiến hành chuẩn lại.

Dải đo của cảm biến được xác định bởi nhiều giá trị giới hạn của vùng đại lượng đo mà trong vùng đó hoạt động của cảm biến đáp ứng các yêu cầu đề ra. Thông thường dải đo trùng với vùng danh định của đại lượng đo. Tuy nhiên, tùy theo sự nghiêm ngặt của các chỉ tiêu mà trong một số trường hợp dải đo có thể rộng hoặc hẹp hơn vùng danh định.

CHƯƠNG 2

CẢM BIẾN QUANG

2.1. Ánh sáng và phép đo quang

2.1.1. Tính chất của ánh sáng

Các cảm biến quang được sử dụng để chuyển thông tin từ ánh sáng nhìn thấy hoặc tia hồng ngoại (IR) và tia tử ngoại (UV) thành tín hiệu điện.

Ánh sáng có hai tính chất cơ bản là sóng và hạt. Dạng sóng của ánh sáng là sóng điện từ phát ra khi có sự chuyển điện tử giữa các mức năng lượng của nguyên tử của nguồn sáng. Các sóng này truyền đi trong chân không với tốc độ $c = 299792 \text{ km/s}$. Trong vật chất ánh sáng có vận tốc $v = c/n$ (n là chiết suất của môi trường).

Tần số ν và bước sóng λ của ánh sáng liên hệ với nhau bởi biểu thức:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad (2.1)$$

Trong chân không $\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.2)$

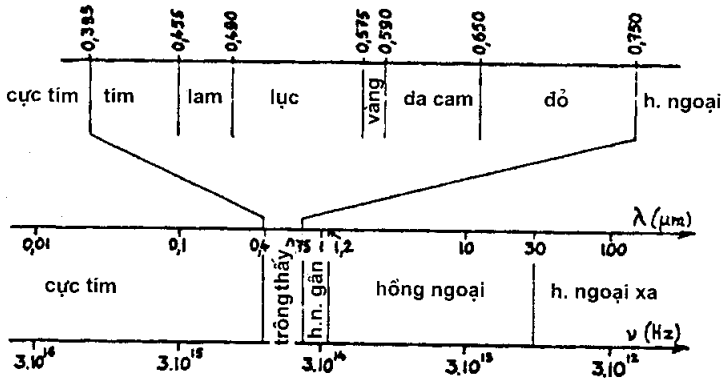
Trên hình 2.1 biểu diễn phổ ánh sáng và sự phân chia thành các dải màu của phổ.

Tính chất hạt của ánh sáng thể hiện qua sự tương tác của nó với vật chất. Ánh sáng bao gồm các hạt photon với năng lượng W_ϕ phụ thuộc duy nhất vào tần số:

$$W_\phi = h\nu \quad (2.3)$$

trong đó h là hằng số Planck ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

Trong vật chất, các điện tử \bar{e} liên kết trong nguyên tử có xu hướng muốn được giải phóng khỏi nguyên tử để trở thành điện tử tự do. Để giải phóng



Hình 2.1: Phổ ánh sáng.

điện tử khỏi nguyên tử cần phải cung cấp cho nó một năng lượng bằng năng lượng liên kết W_ℓ . Khi một photon được hấp thụ sẽ có một điện tử \bar{e} được giải phóng nếu $W_\phi \geq W_\ell$

nghĩa là:
$$\nu \geq \frac{W_\ell}{h} \quad (2.4)$$

hay
$$\lambda \leq \frac{hc}{W_\ell} \quad (2.5)$$

Bước sóng ngưỡng (bước sóng lớn nhất) của ánh sáng có thể gây nên hiện tượng giải phóng điện tử được tính từ biểu thức:

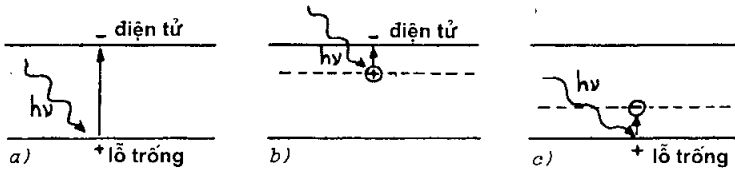
$$\lambda_s = \frac{hc}{W_\ell} \quad (2.6)$$

hay
$$\lambda_{s(\mu\text{m})} = \frac{1,237}{W_{\ell(\text{eV})}} \quad (2.7)$$

Nói chung, loại điện tích được giải phóng do chiếu sáng phụ thuộc vào bản chất của vật liệu bị chiếu sáng. Khi chiếu sáng chất điện môi và bán dẫn tinh khiết, các điện tích được giải phóng là cặp điện tử-lỗ trống (h. 2.2a). Đối với trường hợp bán dẫn pha tạp, khi bị chiếu sáng nó sẽ giải phóng điện tử (nếu pha tạp dono, h.2.2b) hoặc lỗ trống (nếu pha tạp aczepto, h. 2.2c).

Hiện tượng giải phóng hạt dẫn dưới tác dụng của ánh sáng bằng hiệu ứng quang điện gây nên sự thay đổi tính chất điện của vật liệu. Đây là nguyên lý cơ bản của các cảm biến quang.

Dưới tác dụng của ánh sáng, hiệu ứng quang điện tỷ lệ thuận với số lượng hạt dẫn được giải phóng trong một đơn vị thời gian. Tuy nhiên, ngay cả khi $\lambda \leq \lambda_s$ thì cũng không phải tất cả các photon chiếu xuống bề mặt mẫu đều tham gia vào việc giải phóng hạt dẫn, bởi vì một số sẽ bị phản xạ từ bề mặt và số khác sẽ chuyển năng lượng của chúng thành năng lượng của dao động nhiệt.



Hình 2.2: Ảnh hưởng của bản chất vật liệu đến dạng điện tích được giải phóng dưới tác dụng của ánh sáng.

Đối với vật liệu có hệ số phản xạ R lớn và bị chiếu bởi ánh sáng đơn sắc có công suất Φ :

$$\text{- số photon chiếu tới trong một giây : } n_{inc} = \frac{\Phi}{hv} = \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad (2.8)$$

$$\text{- số photon bị hấp thụ trong một giây: } n_a = (1-R)n_{inc} = (1-R) \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad (2.9)$$

- số điện tử hoặc lỗ trống được giải phóng trong một giây:

$$G = \eta \cdot n_a = \eta(1-R) \frac{\lambda\Phi}{hc} \quad (2.10)$$

trong đó η là hiệu suất lượng tử (số điện tử hoặc lỗ trống trung bình được giải phóng khi một photon bị hấp thụ).

2.1.2. Các đơn vị đo quang

2.1.2.1. Các đơn vị đo năng lượng

Năng lượng bức xạ (Q): là năng lượng phát xạ, lan truyền hoặc hấp thụ dưới dạng bức xạ được đo bằng jun (J).

Thông lượng ánh sáng (Φ): là công suất phát xạ, lan truyền hoặc hấp thụ, đo bằng oát (W):

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.11)$$

Cường độ ánh sáng (I): là luồng năng lượng phát ra theo một hướng cho trước dưới một đơn vị góc khối, có đơn vị đo là oat/steradian:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.12)$$

Độ chói năng lượng (L): là tỷ số giữa cường độ ánh sáng phát ra bởi một phần tử bề mặt dA theo một hướng xác định và diện tích hình chiếu của phần tử này trên mặt phẳng P vuông góc với hướng đó, $dA_n = dA \cdot \cos\theta$ (θ là góc giữa P và mặt phẳng chứa dA). Độ chói năng lượng được đo bằng oat/steradian.m²:

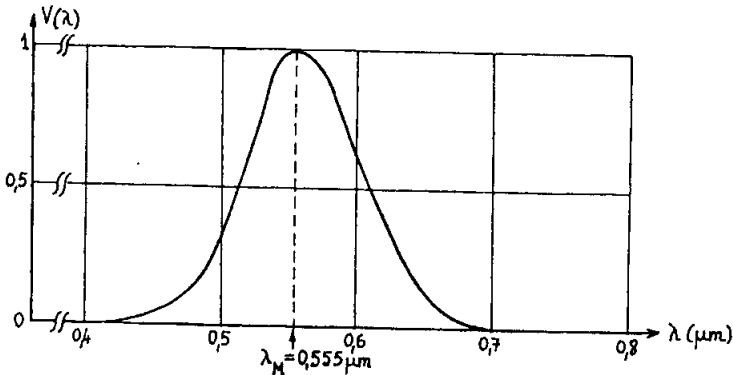
$$L = dI/dA_n \quad (2.13)$$

Độ rọi năng lượng (E): là tỉ số giữa luồng năng lượng thu được bởi một phần tử bề mặt và diện tích của phần tử đó. Độ rọi năng lượng được đo bằng oat/m²:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.14)$$

2.1.2.2. Đơn vị đo thị giác

Độ nhạy của mắt người đối với ánh sáng có bước sóng khác nhau là khác nhau. Đường cong độ nhạy tương đối của mắt $V(\lambda)$ biểu diễn trên hình 2.3.



Hình 2.3: Đường cong độ nhạy tương đối của mắt người.

Các đại lượng thị giác có thể nhận được từ đại lượng năng lượng thông qua hệ số tỷ lệ $K.V(\lambda)$. Đối với một bước sóng cho trước, hệ số K tỷ lệ thuận với độ nhạy tương đối của mắt.

Luồng ánh sáng (Φ_v): theo qui ước, một luồng ánh sáng năng lượng 1W với bước sóng λ_{max} tương ứng với luồng ánh sáng bằng 680 lumen. Như vậy $K = 680$.

Đối với bức xạ đơn sắc có bước sóng λ :

$$\Phi_v(\lambda) = 680.V(\lambda). \phi(\lambda) \text{ lumen} \quad (2.15)$$

Đối với bức xạ phổ liên tục, luồng ánh sáng tổng hợp là tổng của các luồng ánh sáng tương ứng với những bước sóng khác nhau của phổ:

$$\Phi_v = 680 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \quad (2.16)$$

trong đó $\frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda}.d\lambda$ là biến thiên $d\Phi$ của luồng ánh sáng Φ giữa λ và $\lambda+d\lambda$, λ_1 và λ_2 là giới hạn của vùng ánh sáng nhìn thấy, theo qui ước $\lambda_1 = 380\text{nm}$ và $\lambda_2 = 760\text{nm}$.

Cũng tương tự như vậy, mọi đại lượng thị giác X_v đều có thể được chuyển đổi thành đại lượng năng lượng tương ứng với X . Phụ thuộc vào loại bức xạ, việc chuyển đổi dựa trên các mối quan hệ sau đây:

- Đối với bức xạ đơn sắc:

$$X_v(\lambda) = 680.V(\lambda).X(\lambda) \quad (2.17)$$

- Đối với bức xạ liên tục:

$$X_v = 680 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \frac{dX(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \quad (2.18)$$

trong đó $\frac{dX(\lambda)}{d\lambda}.d\lambda$ là biến thiên dX của đại lượng X tương ứng với bước sóng nằm giữa λ và $\lambda+d\lambda$.

Thí dụ: Nếu nguồn sáng là một bóng đèn dây wolfram với nhiệt độ mẫu là 2850K, độ rọi thị giác 1 lux ứng với độ rọi năng lượng là $4,75 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ (tức là $4,75 \mu\text{W/m}^2$).

Trong bảng 2.1 liệt kê các đơn vị đo quang cơ bản.

Bảng 2.1.

	Đ/v thị giác	Đ/v năng lượng
Luồng (thông lượng)	lumen (lm)	oat (W)
Cường độ	candela (cd)	oat/sr (W/Sr)
Độ chói	candela/m ² (cd/m ²)	oat/sr.m ² (W/sr.m ²)
Độ rọi	lumen/m ² hay lux (lx)	W/m ² (W/m ²)
Năng lượng	lumen.s (lm.s)	jun (J)

2.1.3. Nguồn sáng

Việc sử dụng một cảm biến quang chỉ có hiệu quả khi nó phù hợp với bức xạ ánh sáng (phổ, thông lượng, tần số). Nguồn sáng sẽ quyết định mọi đặc tính quan trọng của bức xạ. Vì vậy trong phần này giới thiệu tóm tắt các tính chất quan trọng của những nguồn sáng thường sử dụng.

2.1.3.1. Đèn sợi đốt wonfram

Đèn có cấu tạo gồm một sợi dây wonfram đặt trong một ampoule bằng thủy tinh hoặc thạch anh có chứa chất khí hiếm hoặc halogen (I₂) để giảm bay hơi sợi đốt. Nhiệt độ của sợi dây wonfram giống như nhiệt độ của một vật đen tuyệt đối, có đường cong phổ phát xạ nằm trong vùng phổ nhìn thấy. Đèn wonfram có một số đặc điểm như sau:

- Thông lượng lớn, dải phổ rộng, có thể giảm bằng các tấm lọc.
- Quán tính nhiệt lớn nên không thể thay đổi bức xạ một cách nhanh chóng, thời gian sống nhỏ, dễ vỡ.

2.1.3.2. Diot phát quang

Trong loại đèn này, năng lượng giải phóng do tái hợp điện tử-lỗ trống ở gần chuyển tiếp P-N của diot sẽ làm phát sinh các photon (thay vì phát ra phonon có năng lượng bằng năng lượng kích thích nhiệt). Các đặc điểm chính của đèn diot phát quang như sau:

- Thời gian đáp ứng nhỏ cỡ ns (do vậy có khả năng điều biến đến tần số cao bằng dòng nuôi), phổ ánh sáng hoàn toàn xác định, độ tin cậy cao và độ bền tốt.

- Thông lượng tương đối nhỏ ($\sim 10^2 \text{mw}$) và nhạy với nhiệt độ là nhược điểm hạn chế phạm vi sử dụng của đèn.

2.1.3.3. Laze

Laze là nguồn sáng rất đơn sắc, độ chói lớn, rất định hướng và đặc biệt là tính liên kết mạnh (cùng phân cực, cùng pha). Đối với những nguồn sáng khác, bức xạ phát ra là sự chồng chéo của rất nhiều sóng thành phần có phân cực và pha khác nhau. Trong trường hợp tia laze, tất cả các bức xạ cấu thành đều cùng pha cùng phân cực và bởi vậy khi chồng chéo lên nhau chúng tạo thành một sóng duy nhất và rất xác định.

Đặc điểm chính của laze là có bước sóng đơn sắc hoàn toàn xác định, thông lượng lớn, có khả năng nhận được chùm tia rất mảnh với độ định hướng cao và truyền đi trên khoảng cách rất lớn (đo trên khoảng cách từ vệ tinh).

2.2. Tế bào quang dẫn

Đặc trưng của các cảm biến điện trở là sự phụ thuộc của điện trở vào thông lượng bức xạ và phổ của bức xạ đó. Các tế bào quang dẫn là một trong những cảm biến quang có độ nhạy cao. Cơ sở vật lý của tế bào quang dẫn là hiện tượng quang dẫn do kết quả của hiệu ứng quang điện nội: hiện tượng giải phóng hạt tải điện trong vật liệu dưới tác dụng của ánh sáng làm tăng độ dẫn của vật liệu.

2.2.1. Vật lý quang dẫn

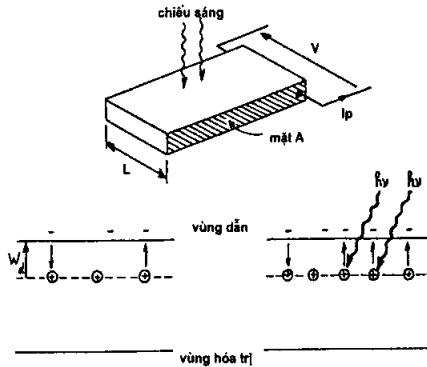
Dưới đây xét mô hình đơn giản để rút ra các mối quan hệ định lượng giữa các đại lượng.

Giả sử có một tấm bán dẫn phẳng thể tích V pha tạp loại n với nồng độ các donor N_d có mức năng lượng nằm dưới vùng dẫn một khoảng bằng W_d (h. 2.4). Giả sử năng lượng ion hoá nguyên tử donor W_d đủ lớn để ở nhiệt độ phòng và khi ở trong tối nồng độ n_0 của các donor bị ion hóa do nhiệt là nhỏ. Ở trong tối, nồng độ điện tử được giải phóng trong một đơn vị thời gian do kích thích nhiệt từ các nguyên tử donor tỷ lệ thuận với nồng độ của các tạp chất chưa bị ion hoá $a(N_d - n_0)$ trong đó

$$a \approx \exp(-qW_d/kT) \tag{2.19}$$

Biểu thức của a cho thấy nhiệt độ có vai trò ảnh hưởng rất quan trọng. Số

điện tử tái hợp với các nguyên tử đã bị ion hóa trong một đơn vị thời gian tỷ lệ thuận với nồng độ các nguyên tử đã bị ion hoá n_0 và với nồng độ điện tử



Hình 2.4: Tế bào quang dẫn và sự chuyển mức năng lượng của điện tử.

cũng chính bằng n_0 , nghĩa là tỷ lệ với $r \cdot n_0^2$ trong đó r là hệ số tái hợp. Phương trình động học của quá trình tái hợp biểu diễn sự thay đổi của mật độ điện tử tự do có dạng:

$$\frac{dn_0}{dt} = a(N_d - n_0) - r n_0^2. \quad (2.20)$$

Ở trạng thái cân bằng ta có:

$$\frac{dn_0}{dt} = 0 \quad (2.21)$$

kết hợp với (2.20) ta được:

$$n_0 = -\frac{a}{2r} + \left(\frac{a^2}{4r^2} + \frac{aN_d}{r} \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Độ dẫn trong tối được biểu diễn bởi biểu thức:

$$\sigma_0 = q \mu n_0 \quad (2.23)$$

trong đó μ là độ linh động của điện tử và q là giá trị tuyệt đối của điện tích của điện tử. Khi nhiệt độ tăng độ linh động giảm nhưng mật độ n_0 tăng bởi vì sự kích thích nhiệt rất lớn và ảnh hưởng của nó là quyết định đối với độ dẫn.

Khi chất bán dẫn bị chiếu sáng, các photon (năng lượng $h\nu \geq W_d$) sẽ ion hóa các nguyên tử donor giải phóng ra g điện tử trong một giây trong một đơn vị

thể tích. Các điện tử này sẽ bổ sung thêm vào số các điện tử được giải phóng do kích thích nhiệt. Số điện tử g được tính theo biểu thức:

$$g = \frac{G}{V} = \frac{1}{A.L} \cdot \frac{\eta(1-R)}{h\nu} \Phi \quad (2.24)$$

trong đó $V = A.L$, ý nghĩa của A và L thể hiện trên hình 2.4, G là số điện tử được giải phóng trong một đơn vị thời gian (xem mục 2.1.1). Phương trình động học của tái hợp trong trường hợp này có dạng:

$$\frac{dn}{dt} = a(N_d - n) + g - r n^2 \quad (2.25)$$

Thông thường bức xạ chiếu tới đủ lớn để số điện tử do các photon giải phóng sẽ lớn hơn rất nhiều so với số điện tử được giải phóng do nhiệt:

$$g \gg a(N_d - n) \quad \text{và} \quad n \gg n_0 \quad (2.26)$$

Trong những điều kiện như vậy có thể rút ra phương trình động học cho mật độ của điện tử ở điều kiện cân bằng dưới tác dụng của chiếu sáng:

$$n = \left(\frac{g}{r} \right)^{1/2} \quad (2.27)$$

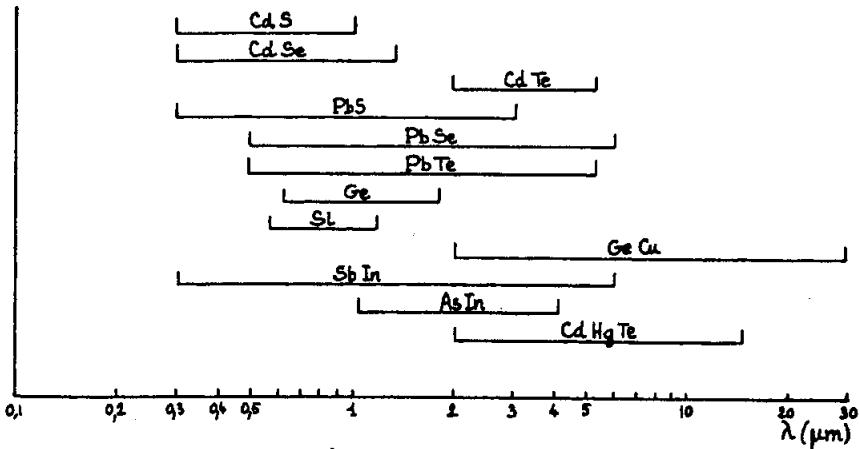
Độ dẫn tương ứng với nồng độ điện tử ở điều kiện cân bằng $\sigma = q \mu n$. Nếu tính đến biểu thức của g có thể nhận thấy rằng độ dẫn là hàm không tuyến tính của thông lượng ánh sáng: nó thay đổi theo $\Phi^{1/2}$. Kết quả này rất quan trọng, thực nghiệm đã minh chứng số mũ của Φ nằm giữa 0,5 và 1. Nếu tính toán kỹ lưỡng hơn thì cần phải xét đến ảnh hưởng của các tâm bắt hạt dẫn trên thực tế các tâm này luôn tồn tại trong vật liệu.

2.2.2. Vật liệu để chế tạo cảm biến

Cảm biến quang thường được chế tạo bằng các bán dẫn đa tinh thể đồng nhất hoặc đơn tinh thể, bán dẫn riêng hoặc bán dẫn pha tạp, thí dụ:

- Đa tinh thể: CdS, CdSe, CdTe
PbS, PbSe, PbTe
- Đơn tinh thể: Ge, Si tinh khiết hoặc pha tạp Au, Cu, Sb, In
SbIn, AsIn, PIn, CdHgTe

Vùng phổ làm việc của các vật liệu này biểu diễn trên hình 2.5.



Hình 2.5: Vùng phổ làm việc của một số vật liệu quang dẫn.

2.2.3. Các đặc trưng

2.2.3.1. Điện trở

Giá trị điện trở tối R_{co} phụ thuộc vào dạng hình học, kích thước, nhiệt độ và bản chất hóa lý của vật liệu quang dẫn. Các chất PbS, CdS, CdSe có điện trở tối rất lớn (từ $10^4 \Omega$ đến $10^9 \Omega$ ở $25^\circ C$), trong khi đó SbIn, SbAs, CdHgTe lại có điện trở tối tương đối nhỏ (từ 10Ω đến $10^3 \Omega$ ở $25^\circ C$). Điện trở R_c của cảm biến khi bị chiếu sáng giảm rất nhanh khi độ rọi tăng lên. Trên hình 2.6 là một thí dụ về sự thay đổi của điện trở của một tế bào quang dẫn như là hàm của độ rọi sáng.

Các tính chất của một tế bào quang dẫn có thể được biểu diễn bằng một mạch tương đương, trong đó điện trở tối R_{co} mắc song song với một điện trở R_{cp} xác định bởi hiệu ứng quang điện do chiếu sáng và có dạng:

$$R_{cp} = a \Phi^{-\gamma} \quad (2.28)$$

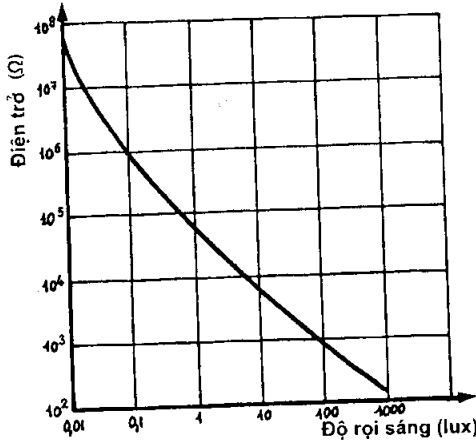
trong đó a phụ thuộc mạnh vào vật liệu, nhiệt độ và phổ bức xạ ánh sáng, γ có giá trị từ 0,5 đến 1.

Vì vậy khi chiếu sáng điện trở sẽ là:

$$R_c = \frac{R_{co} R_{cp}}{R_{co} + R_{cp}} = \frac{R_{co} \cdot a \Phi^{-\gamma}}{R_{co} + a \Phi^{-\gamma}} \quad (2.29)$$

Thông thường $R_{cp} \ll R_{co}$ cho nên $R_c = a \Phi^{-\gamma}$.

Sự phụ thuộc của điện trở vào thông lượng ánh sáng không tuyến tính. Tuy nhiên có thể tuyến tính hóa nó bằng cách sử dụng một điện trở mắc song song với tế bào quang dẫn.



Hình 2.6: Sự phụ thuộc của điện trở vào độ rọi sáng.

Điện trở R_c (khi bị chiếu sáng) phụ thuộc vào nhiệt độ: độ nhạy nhiệt của tế bào quang dẫn càng nhỏ khi độ rọi sáng càng lớn. Giá trị của điện trở sẽ bị giảm (tuy rất chậm) ở những điều kiện làm việc giới hạn khi độ rọi sáng và điện áp đặt vào quá lớn. Người ta đã rút ra kết luận rằng hiệu ứng già hóa này tương đối rõ ràng ở những vật liệu có hệ số nhiệt cao.

2.2.3.2. Độ nhạy

Theo sơ đồ tương đương của một tế bào quang dẫn, độ dẫn của tế bào là tổng của độ dẫn trong tối và độ dẫn khi chiếu sáng:

$$G_c = G_{co} + G_{cp} \tag{2.30}$$

trong đó G_{co} là độ dẫn trong tối :

$$G_{co} = 1/R_{co} \tag{2.31}$$

và G_{cp} là độ quang dẫn:

$$G_{cp} = 1/R_{cp} = 1/a \cdot \Phi^\gamma \tag{2.32}$$

Khi đặt điện áp V vào tế bào quang dẫn, sẽ có dòng điện I chạy qua nó:

$$I = G_c \cdot V = G_{co} \cdot V + G_{cp} \cdot V = I_0 + I_p \quad (2.33)$$

trong đó dòng tối $I_0 = G_{co} \cdot V$ và dòng quang điện $I_p = G_{cp} \cdot V$.

Trong điều kiện sử dụng thông thường $I_0 \ll I_p$ do đó dòng quang điện của tế bào quang dẫn được xác định bởi biểu thức:

$$I_p = \frac{V}{a} \Phi^\gamma \quad (2.34)$$

trong đó V là điện áp, a là hệ số phụ thuộc vào vật liệu, nhiệt độ và phổ bức xạ, γ có giá trị nằm trong khoảng $0,5 \div 1$. Ngoại trừ trường hợp $\gamma = 1$, dòng điện I là hàm không tuyến tính của thông lượng ánh sáng.

Đối với luồng bức xạ có phổ xác định, tỷ lệ chuyển đổi tĩnh

$$\frac{I}{\Phi} = \frac{V}{a} \Phi^{\gamma-1} \quad (2.35)$$

và độ nhạy

$$\frac{\Delta I}{\Delta \Phi} = \gamma \frac{V}{a} \Phi^{\gamma-1} \quad (2.36)$$

Từ hai biểu thức này có thể thấy:

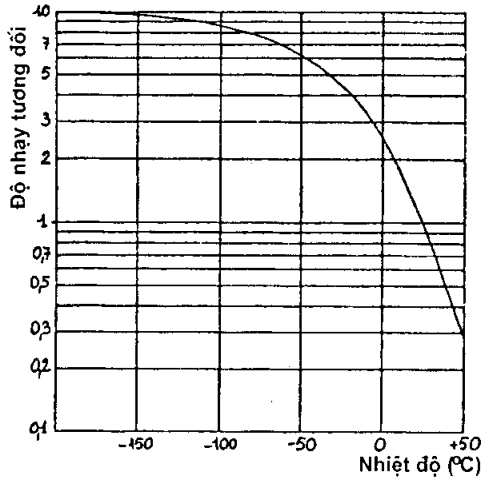
- Nếu tính đến các giá trị của γ thì tỷ lệ chuyển đổi tĩnh và độ nhạy có cùng độ lớn.
- Tế bào quang dẫn là một cảm biến không tuyến tính, độ nhạy của nó giảm khi bức xạ tăng (trừ trường hợp đặc biệt khi $\gamma = 1$).
- Độ nhạy tỷ lệ thuận với điện áp đặt vào tế bào quang dẫn. Điều này chỉ đúng khi điện áp đặt vào đủ nhỏ để hiệu ứng Joule không làm thay đổi nhiệt độ (vì nhiệt độ cao sẽ làm giảm độ nhạy, xem hình 2.7).

Trong trường hợp sử dụng các bức xạ đơn sắc, đối với một thông lượng của bức xạ cho trước, I_p phụ thuộc vào λ của bức xạ đó.

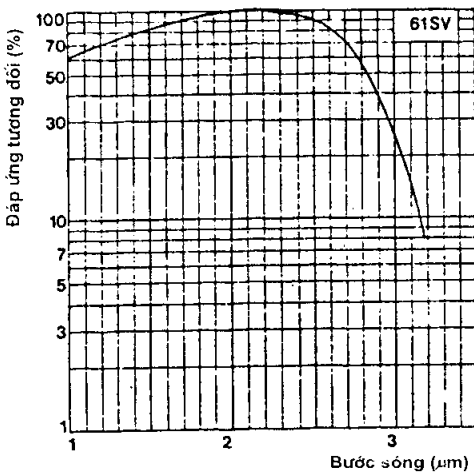
Độ nhạy phổ của tế bào quang dẫn là giá trị tương đối được xác định từ đường cong biểu diễn sự phụ thuộc của đáp ứng vào bước sóng (h. 2.8a):

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi(\lambda)} \quad (2.37)$$

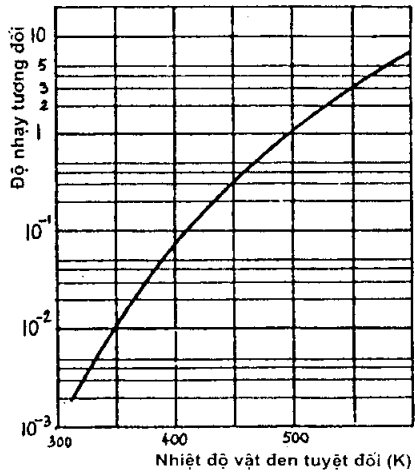
Khi điện áp đặt vào bằng 10V và diện tích bề mặt tế bào bằng 1 cm², độ nhạy phổ có giá trị nằm trong khoảng 10⁻¹ ÷ 10 A/W.



Hình 2.7: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ nhạy của tế bào quang dẫn CdHgTe.



a)



b)

Hình 8: Độ nhạy của tế bào quang dẫn PbS:

a) Đường cong phổ đáp ứng; b) Sự thay đổi của độ nhạy toàn phần theo nhiệt độ màu của nguồn.

Độ nhạy phổ là hàm của nhiệt độ của nguồn sáng: khi nhiệt độ tăng, độ nhạy phổ tăng lên. Đối với các vật liệu khác nhau sẽ có sự dịch chuyển bước sóng: về phía trái đối với hợp chất của indi và sang phải đối với hợp chất của chì.

Khi bức xạ không phải là đơn sắc, dòng Ip, và do đó độ nhạy toàn phần, phụ thuộc vào phổ bức xạ (h. 2.8b).

2.2.4. Ứng dụng của tế bào quang dẫn

Nói chung, tế bào quang dẫn được chú ý bởi chúng có tỷ lệ chuyển đổi tĩnh và độ nhạy cao cho phép đơn giản hóa trong việc ứng dụng (thí dụ điều khiển trực tiếp các role). Những nhược điểm chính của tế bào quang dẫn là:

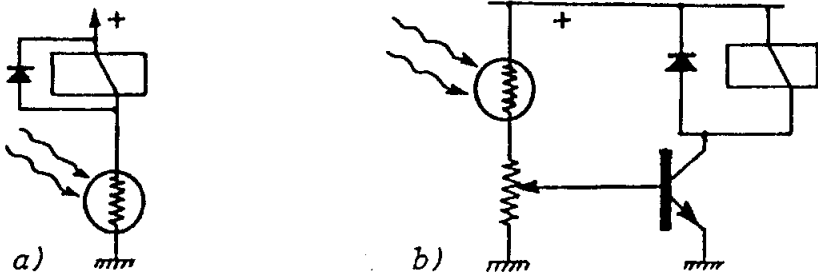
- Hồi đáp phụ thuộc một cách không tuyến tính vào thông lượng.
- Thời gian đáp ứng lớn.
- Các đặc trưng không ổn định (già hóa).
- Độ nhạy phụ thuộc vào nhiệt độ.
- Một số loại đòi hỏi phải làm nguội.

Người ta không dùng tế bào quang dẫn để xác định chính xác thông lượng. Thông thường chúng được sử dụng để phân biệt mức sáng khác nhau: trạng thái tối - sáng hoặc xung ánh sáng.

Việc đo điện trở của tế bào quang dẫn hoặc xác định sự thay đổi của điện trở cần phải có mạch đo như áp dụng cho một cảm biến thụ động, nghĩa là phải cung cấp dòng không đổi và lắp mạch theo sơ đồ đo thế và dùng cầu wheatstone, khuếch đại thuật toán.

Trong thực tế, các tế bào quang dẫn thường được ứng dụng trong hai trường hợp:

- Điều khiển rơ le: khi có thông lượng ánh sáng chiếu lên tế bào quang dẫn, điện trở R của nó giảm xuống đáng kể đủ để cho dòng điện I chạy qua tế bào. Dòng điện này được sử dụng trực tiếp hoặc thông qua khuếch đại để đóng mở role (h. 2.9).
- Thu tín hiệu quang: tế bào quang dẫn có thể được sử dụng để biến đổi xung quang thành xung điện. Sự ngắt quãng của xung ánh sáng chiếu lên tế bào quang dẫn sẽ được phản ánh trung thực qua xung điện của mạch đo, do vậy các thông tin mà xung ánh sáng mang đến sẽ được thể hiện trên xung điện. Người ta ứng dụng mạch đo kiểu này để đếm vật hoặc đo tốc độ quay của đĩa .

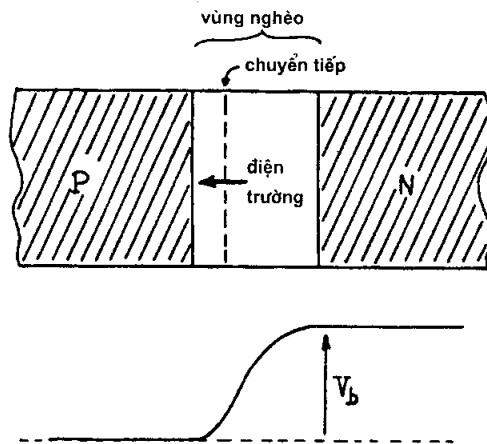


Hình 2.9: Dùng tế bào quang dẫn để điều khiển role: a) Điều khiển trực tiếp; b) Điều khiển thông qua tranzito khuếch đại.

2.3. Photodiôt

2.3.1. Nguyên lý hoạt động

Sự tiếp xúc của hai bán dẫn loại n và loại p (chuyển tiếp P-N) tạo nên vùng nghèo hạt dẫn bởi vì ở đó tồn tại một điện trường và hình thành hàng rào thế V_b (h. 2.10).



Hình 2.10: Chuyển tiếp P-N và hàng rào thế của nó.

Khi không có điện thế bên ngoài đặt trên chuyển tiếp ($V = 0$), dòng điện qua chuyển tiếp $I = 0$. Thực tế I chính là dòng tổng cộng của hai dòng điện bằng nhau và ngược chiều;

- Dòng do khuếch tán hạt dẫn cơ bản sinh ra khi ion hóa tạp chất (lỗ trống trong bán dẫn loại P và điện tử trong bán dẫn loại N). Năng lượng nhiệt của các hạt dẫn cơ bản đủ lớn để có thể vượt qua hàng rào thế.
- Dòng hạt dẫn không cơ bản (do kết quả của sự hình thành các cặp khi có kích thích nhiệt: điện tử trong bán dẫn loại P và lỗ trống trong bán dẫn loại N), chúng chuyển động dưới tác dụng của điện trường trong vùng nghèo.

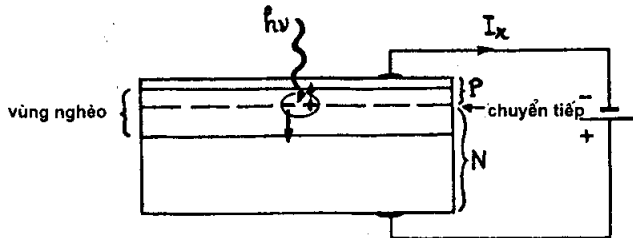
Khi đặt điện áp V_d lên diot, chiều cao của hàng rào thế sẽ thay đổi kéo theo sự thay đổi của dòng hạt dẫn cơ bản và bề rộng vùng nghèo. Điện áp V_d sẽ xác định dòng điện chạy qua chuyển tiếp:

$$I = I_0 \exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] - I_0 \quad (2.38)$$

trong đó I_0 là dòng hạt dẫn không cơ bản.

Khi điện áp ngược đủ lớn ($V_d \ll -kT/q = -26\text{mV}$ ở 300K), chiều cao của hàng rào thế lớn đến mức dòng khuếch tán hạt dẫn cơ bản trở nên rất nhỏ có thể bỏ qua và chỉ còn lại dòng hạt dẫn không cơ bản, đây chính là dòng ngược I_r của diot, $I_r = I_0$.

Khi chiếu sáng diot bằng bức xạ có bước sóng nhỏ hơn bước sóng ngưỡng ($\lambda < \lambda_s$), sẽ xuất hiện thêm các cặp điện tử-lỗ trống. Để các hạt dẫn này có thể tham gia vào độ dẫn và làm tăng dòng I , cần phải ngăn cản quá trình tái hợp



Hình 2.11: Hiệu ứng quang điện trong vùng nghèo của chuyển tiếp P-N.

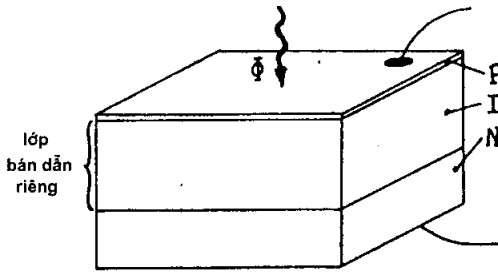
của chúng tức là phải nhanh chóng tách cặp điện tử-lỗ trống dưới tác dụng của điện trường. Điều này chỉ có thể xảy ra trong vùng nghèo và sự chuyển dời của các điện tích đó (cùng hướng với hướng chuyển động của các hạt dẫn không cơ bản) kéo theo sự gia tăng của dòng ngược I_r (h. 2.11)

Điều quan trọng là ánh sáng phải đạt tới vùng nghèo sau khi đã đi qua một bề dày đáng kể của chất bán dẫn và tiêu hao năng lượng không nhiều. Càng đi sâu vào chất bán dẫn thông lượng Φ càng giảm:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (2.39)$$

Trong đó $\alpha \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ tương ứng với sự giảm 63% thông lượng khi đi qua bề dày bằng 10^3 \AA .

Trên thực tế phiên bán dẫn được làm rất mỏng để sử dụng năng lượng ánh sáng tới một cách hữu hiệu nhất, đồng thời vùng nghèo cũng phải đủ rộng để sự hấp thụ ở đó là cực đại. Thí dụ trong các diot PIN (h. 2.12) lớp bán dẫn



Hình 2.12: Cấu trúc diot loại PIN.

riêng I được kẹp giữa hai lớp bán dẫn loại P và N. Việc mở rộng bề rộng của vùng nghèo tỷ lệ với điện trở suất của vật liệu, nó đặc biệt quan trọng ở vùng chuyển tiếp PI và IN. Chỉ cần một điện áp ngược cỡ vài vôn cũng đủ để mở rộng vùng nghèo ra toàn bộ lớp bán dẫn I.

Các vật liệu thường dùng để chế tạo photodiode là Si, Ge (vùng ánh sáng nhìn thấy và hồng ngoại gần) và GaAs, InAs, InSb, HgCdTe (vùng hồng ngoại).

2.3.2. Chế độ hoạt động

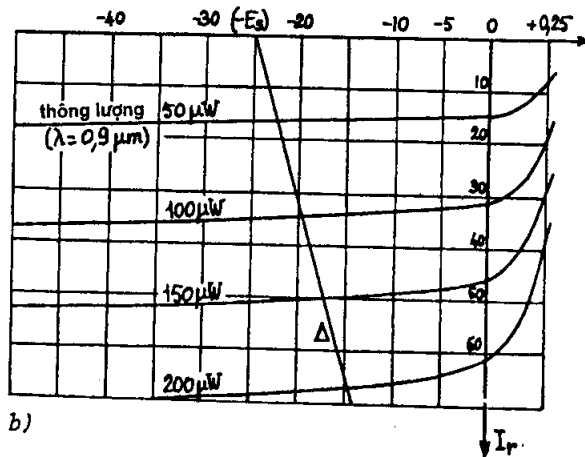
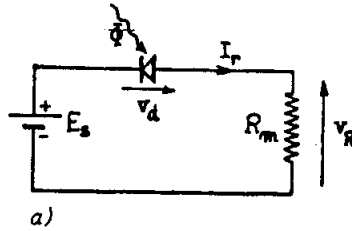
2.3.2.1. Chế độ quang dẫn

Sơ đồ lắp ráp cơ bản gồm một nguồn E_s phân cực ngược diode và một điện trở R_m để đo tín hiệu (h. 2.13a). Giả sử đặt điện áp $V_d < 0$ lên diode (diode phân cực ngược), dòng ngược I_r chạy qua diode được biểu diễn bởi biểu thức:

$$I_r = -I_0 \exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] + I_0 + I_p \quad (2.40)$$

trong đó I_p là dòng quang điện hình thành khi ánh sáng đạt tới vùng nghèo sau khi đi qua bề dày X:

$$I_p = \frac{q\eta(1-R)\lambda}{hc} \Phi_o \exp(-\alpha X) \quad (2.41)$$



Hình 2.13: Chế độ quang dẫn của diode: a) Sơ đồ nguyên lý; b) Đặc trưng I-V ứng với những thông lượng khác nhau.

Khi điện áp ngược đạt giá trị đủ lớn, thành phần exp của (2.40) tiến tới 0 và ta có:

$$I_r = I_0 + I_p \quad (2.42)$$

nghĩa là

$$I_r \approx I_p \quad (2.43)$$

Phương trình mạch điện:

$$E_s = V_R - V_d \quad (2.44)$$

trong đó $V_R = R_m I_r$, cho phép vẽ đường thẳng tải Δ (h. 2.13b)

$$I_r = \frac{E_s}{R_m} + \frac{V_d}{R_m} \quad (2.45)$$

Điểm làm việc Q của diot là điểm giao nhau giữa đường tải Δ và đường đặc tuyến I-V với thông lượng tương ứng. Chế độ làm việc này là tuyến tính, V_R tỷ lệ với thông lượng.

2.3.2.2. Chế độ quang thế

Trong chế độ này không có điện áp ngoài đặt vào diot. Diot hoạt động như bộ chuyển đổi năng lượng tương đương với một máy phát và người ta đo thế hở mạch V_{oc} hoặc đo dòng ngắn mạch I_{sc} .

Đo thế hở mạch V_{oc} :

Sự tăng I_p của dòng hạt dẫn không cơ bản khi chiếu sáng sẽ làm chiều cao hàng rào thế giảm đi một lượng Δv_b (do có sự phân chia hạt tải). Sự giảm chiều cao hàng rào thế này làm cho dòng hạt dẫn cơ bản tăng lên để đảm bảo cân bằng giữa hai dòng hạt dẫn cơ bản và không cơ bản sao cho $I_r=0$, nghĩa là:

$$-I_0 \exp\left[\frac{q\Delta v_b}{kT}\right] + I_0 + I_p = 0 \quad (2.46)$$

Từ đây rút ra:

$$\Delta v_b = \frac{kT}{q} \ln\left[1 + \frac{I_p}{I_0}\right] \quad (2.47)$$

với I_p được biểu diễn bởi công thức (2.41).

Sự giảm chiều cao Δv_b của hàng rào thế có thể đánh giá được nếu đo điện áp giữa hai đầu của diot trong chế độ hở mạch:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left[1 + \frac{I_p}{I_0}\right] \quad (2.48)$$

Khi chiếu sáng yếu, $I_p \ll I_0$ và

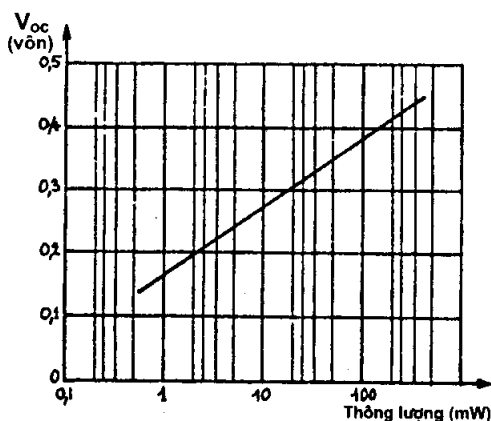
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \frac{I_p}{I_0} \quad (2.49)$$

Trong trường hợp này V_{oc} nhỏ ($kT/q = 26$ mV ở 300K) nhưng phụ thuộc tuyến tính vào thông lượng.

Khi chiếu sáng mạnh, $I_p \gg I_0$ và ta có:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_p}{I_0} \quad (2.50)$$

Trong trường hợp này V_{oc} có giá trị tương đối lớn (0,1 ÷ 0,6V) nhưng sự phụ thuộc của V_{oc} vào thông lượng có dạng hàm logarit (h. 2.14).

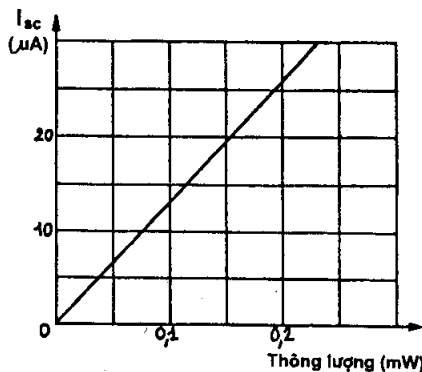


Hình 2.14: Sự phụ thuộc của thế hở mạch vào thông lượng.

Đo dòng ngắn mạch I_{sc} :

Khi nối ngắn mạch hai đầu của điốt bằng một điện trở R_m nhỏ hơn điện trở động r_d của chuyển tiếp, dòng đoản mạch chính bằng dòng I_p và tỷ lệ với thông lượng (h. 2.15):

$$I_{sc} = I_p \quad (2.51)$$



Hình 2.15: Sự phụ thuộc của dòng I_{sc} vào thông lượng khi điốt ở chế độ ngắn mạch.

Đặc điểm quan trọng của chế độ làm việc này của diot là không có dòng tối. Thực vậy, khi không có nguồn điện phân cực bên ngoài thì sẽ không có dòng tối chạy qua diot. Như vậy có thể giảm nhiễu (Schottky) và cho khả năng đo thông lượng rất nhỏ.

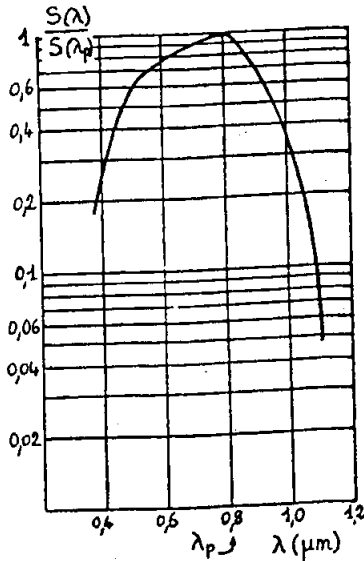
2.3.3. Độ nhạy

Đối với bức xạ có phổ xác định, dòng quang điện I_p tỷ lệ tuyến tính với thông lượng trong một khoảng thông lượng tương đối rộng, cỡ 5-6 decad. Độ nhạy phổ được xác định như sau:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi} = \frac{q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \quad (2.52)$$

với $\lambda \leq \lambda_c$.

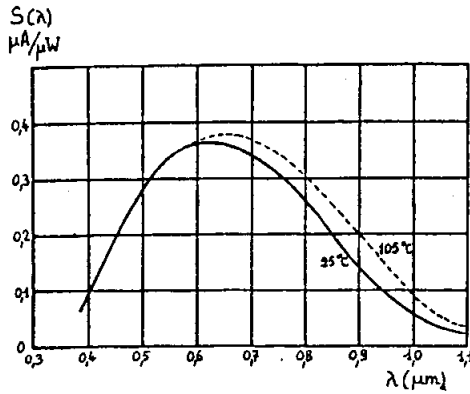
Độ nhạy phổ phụ thuộc vào λ , hiệu suất lượng tử η , vào hệ số phản xạ R và hệ số hấp thụ α . Đối với mỗi loại diot, người sử dụng cần phải biết độ nhạy



Hình 2.16: Phổ độ nhạy của photodiode (loại 5082-4200)

phổ dựa trên đường cong phổ đáp ứng $S(\lambda)/S(\lambda_p)$, trong đó λ_p là độ dài bước sóng ứng với cực đại độ nhạy phổ (h. 2.16), đồng thời phải biết giá trị của λ_p . Thông thường $S(\lambda_p)$ nằm trong khoảng từ 0,1 đến 1 A/W.

Dưới ảnh hưởng của nhiệt độ, cực đại λ_p của đường cong độ nhạy phổ bị dịch chuyển. Khi nhiệt độ tăng, λ_p dịch chuyển về phía bước sóng dài như



Hình 2-17: Sự phụ thuộc của độ nhạy vào nhiệt độ.

biểu diễn trên hình (h. 2.17). Hệ số nhiệt độ của dòng quang dẫn $\frac{1}{I_p} \cdot \frac{dI_p}{dT}$ có giá trị khoảng 0,1%/°C.

2.3.4. Sơ đồ sử dụng photodiốt

Tùy thuộc vào mục đích sử dụng photodiốt mà người ta chọn chế độ làm việc cho nó.

2.3.4.1. Chế độ quang dẫn

Chế độ quang dẫn được đặc trưng bởi độ tuyến tính cao, thời gian đáp ứng ngắn và dải thông lớn. Dưới đây là một sơ đồ đo dòng ngược I_r trong chế độ quang dẫn.

Sơ đồ cơ sở (h. 2.18a):

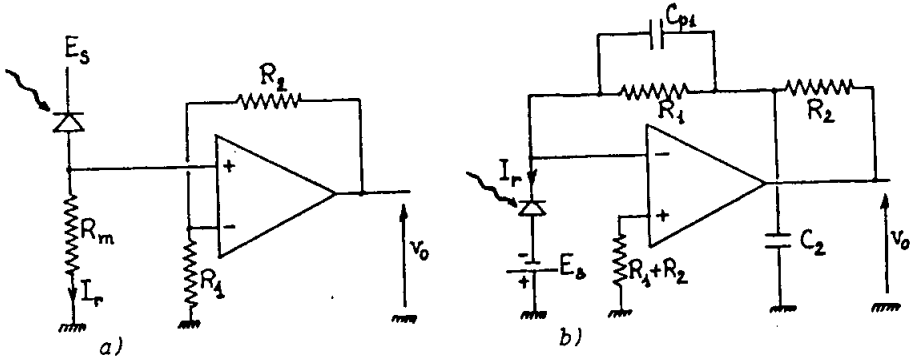
$$V_o = R_m \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right] I_r \quad (2.53)$$

Tăng điện trở R_m sẽ làm giảm nhiễu. Tổng trở vào của bộ khuếch đại phải lớn để tránh làm giảm điện trở tải hiệu dụng của diốt.

Sơ đồ tác động nhanh (h. 18b):

$$V_0 = (R_1 + R_2) \cdot I_r \quad (2.54)$$

Điện trở tải của điốt nhỏ và bằng $\frac{R_1 + R_2}{K}$ trong đó K là hệ số khuếch đại ở



Hình 2.18: Sơ đồ mạch đo dòng ngược trong chế độ quang dẫn.

tần số làm việc; C_2 có tác dụng bù trừ ảnh hưởng của tụ kí sinh C_{p1} với điều kiện $R_1 C_{p1} = R_2 C_2$. Bộ khuếch đại sử dụng ở đây phải có dòng vào rất nhỏ và sự suy giảm do nhiệt cũng phải không đáng kể.

2.3.4.2. Chế độ quang thế

Các đặc điểm của chế độ này là:

- Có thể làm việc ở chế độ tuyến tính hoặc logarit tùy thuộc vào tải.
- Ít nhiễu.
- Thời gian đáp ứng lớn và dải thông nhỏ
- Nhạy cảm với nhiệt độ ở chế độ đo logarit.

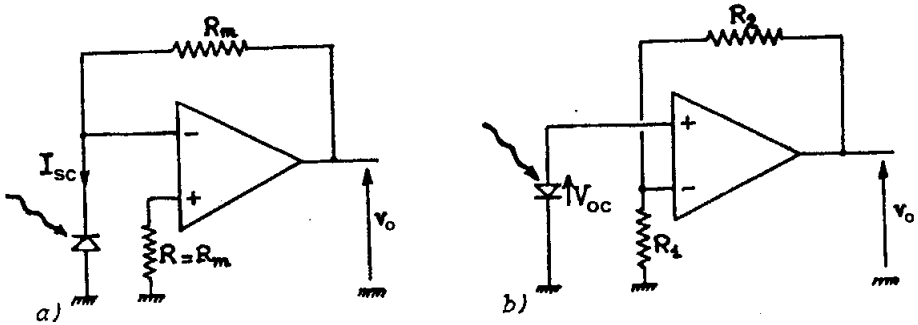
Sơ đồ tuyến tính: (đo dòng ngắn mạch I_{sc}) theo sơ đồ trên hình 2.19a.

Trong chế độ này:

$$V_0 = R_m \cdot I_{sc} \quad (2.55)$$

Sơ đồ đo logarit: đo điện áp hở mạch V_{oc} (h. 2.19b).

$$V_0 = \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right] V_{oc} \quad (2.56)$$

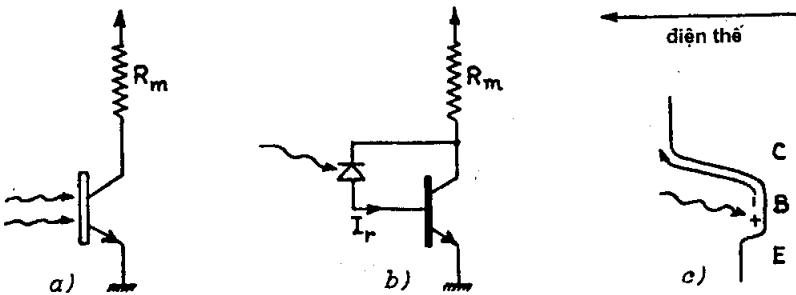


Hình 2.19: Chế độ quang thế của photodiốt.

2.4. Phototranzito

2.4.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Phototranzito là các tranzito silic loại NPN mà vùng bazơ có thể được chiếu sáng, không có điện áp đặt lên bazơ, chỉ có điện áp trên C, đồng thời chuyển tiếp B-C phân cực ngược (h. 2.20a).



Hình 2.20: Phototranzito: a) Sơ đồ mạch điện, b) Sơ đồ tương đương, c) Tách cặp điện tử-lỗ trống khi chiếu sáng bazơ.

Điện áp đặt vào tập trung hầu như toàn bộ trên chuyển tiếp B-C (phân cực ngược) trong khi đó sự chênh lệch điện thế giữa E và B thay đổi không đáng kể ($V_{be} \cong 0,6 \div 0,7V$)

Khi chuyển tiếp B-C được chiếu sáng, nó sẽ hoạt động giống photodiốt ở chế độ quang dẫn với dòng ngược

$$I_r = I_0 + I_p \quad (2.57)$$

trong đó I_0 là dòng ngược trong tối, I_p là dòng quang điện dưới tác dụng của thông lượng Φ_0 chiếu qua bề dày X của bazơ (bước sóng $\lambda < \lambda_s$):

$$I_p = \frac{q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \Phi_0 \quad (2.58)$$

Dòng I_r đóng vai trò dòng bazơ, nó gây nên (nhờ hiệu ứng tranzito) dòng colectơ I_c :

$$I_c = (\beta + 1)I_r = (\beta + 1)I_0 + (\beta + 1)I_p \quad (2.59)$$

β là hệ số khuếch đại dòng của tranzito khi đầu chung emitơ.

Như vật có thể coi phototranzito như tổ hợp của một photodiốt và một tranzito (h. 2.20b). Photodiốt cung cấp dòng quang điện tại bazơ, còn tranzito cho hiệu ứng khuếch đại β . Các điện tử và lỗ trống phát sinh trong vùng bazơ (dưới tác dụng của ánh sáng) sẽ bị phân chia dưới tác dụng của điện trường trên chuyển tiếp B-C.

Trong trường hợp tranzito NPN, các điện tử bị kéo về về phía colectơ trong khi đó lỗ trống bị ở lại trong vùng bazơ (h. 2.20c) tạo thành dòng điện tử từ E qua B đến C. Hiện tượng xảy ra tương tự như vậy nếu như lỗ trống phun vào bazơ từ một nguồn bên ngoài: điện thế bazơ tăng lên làm giảm hàng rào thế giữa E và B, điều này gây nên dòng điện tử I_E chạy từ E đến B và khuếch tán tiếp từ B về phía C.

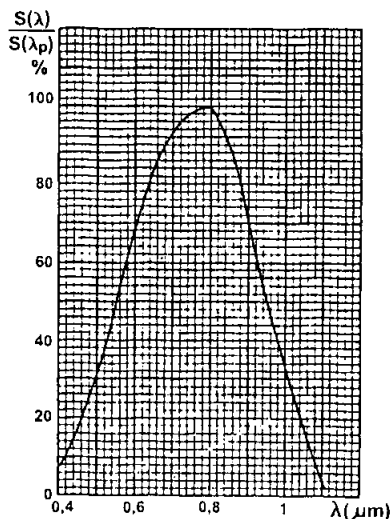
2.4.2. Độ nhạy

Khi nhận được thông lượng Φ_0 , diốt bazơ-colectơ sinh ra dòng quang điện I_p , dòng này gây nên trong phototranzito một dòng điện $I_{cp} = (\beta + 1)I_p$, trong đó giá trị của I_{cp} được rút ra từ công thức của I_p (2.41):

$$I_{cp} = \frac{(\beta + 1)q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \Phi_0 \quad (2.60)$$

Đối với một Φ_0 cho trước, đường cong phổ đáp ứng xác định bởi bản chất của diốt B-C: vật liệu chế tạo (thường là Si) và loại pha tạp (h. 2.21). Đối với một bước sóng cho trước, dòng colectơ I_{cp} không phải là hàm tuyến tính của thông lượng hoặc độ chiếu sáng bởi vì hệ số khuếch đại β phụ thuộc vào dòng I_c (và do vậy cũng phụ thuộc vào thông lượng), nghĩa là $\frac{\Delta I_c}{\Delta \Phi_0}$ phụ

thuộc vào Φ_0 . Thí dụ đối với phototranzito BPW22 (hãng RTC - Compelec), độ nhạy tăng lên 1,6 lần khi độ rọi sáng tăng lên 8 lần (từ 1mW/cm^2 lên 8mW/cm^2).



Hình 2.21: Đường cong phổ đáp ứng của phototranzito.

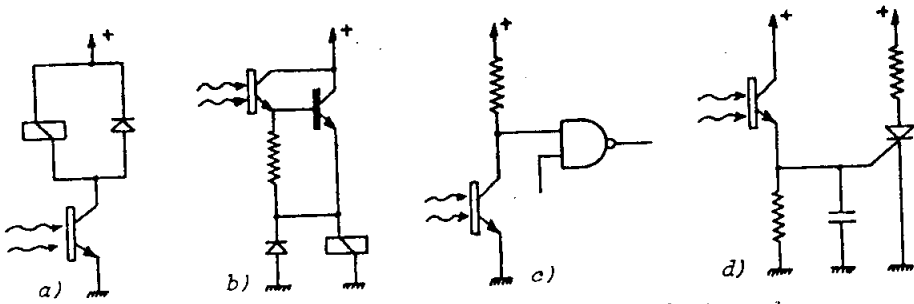
Độ nhạy phổ $S(\lambda_p)$ ở bước sóng tương ứng với điểm cực đại có giá trị nằm trong khoảng $1 \div 100 \text{ A/W}$.

2.4.3. Sơ đồ dùng phototranzito

Phototranzito có thể dùng làm bộ chuyển mạch, hoặc làm phần tử tuyến tính. Ở chế độ chuyển mạch nó có ưu điểm so với photodiốt là cho phép điều khiển một cách trực tiếp dòng chạy qua tương đối lớn. Ngược lại, ở chế độ tuyến tính, mặc dù nó có ưu điểm là cho độ khuếch đại, nhưng người ta vẫn thích dùng photodiốt hơn bởi vì photodiốt có độ tuyến tính tốt hơn.

2.4.3.1. Phototranzito chuyển mạch

Trong trường hợp này sử dụng thông tin dạng nhị phân: có hay không có bức xạ, hoặc là ánh sáng lớn hơn hay không lớn hơn ngưỡng (chiếu sáng). Tranzito chặn hoặc bão hoà cho phép điều khiển trực tiếp (hoặc sau khi khuếch đại) như một role, điều khiển một cổng logic hoặc một thyristo (h. 2.22).

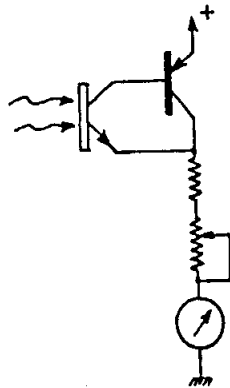


Hình 2.22: Phototranzito trong chế độ chuyển mạch để điều khiển:
 a) role, b)role (sau khuếch đại), c) cổng logic, d) thyristo.

Tốc độ chuyển mạch bị giới hạn bởi điện trở của phototranzito. Tốc độ này có thể cải thiện một cách đáng kể nếu nối tiếp với phototranzito một bộ chuyển đổi dòng - thế hoặc một mạch lặp theo sơ đồ bazơ chung (với điều kiện chúng phải có trở kháng vào nhỏ).

2.4.3.2. Phototranzito trong chế độ tuyến tính

Có hai cách ứng dụng phototranzito trong chế độ tuyến tính. Trường hợp thứ nhất: đo ánh sáng không đổi, hoặc là sử dụng phototranzito giống như một luxmet (h. 2.23).



Hình 2.23: Sơ đồ nguyên lý của luxmet.

Trường hợp thứ hai, để nhận tín hiệu thay đổi dạng

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_1(t) \quad (2.61)$$

với điều kiện $\Phi(t)$ có biên độ nhỏ để không dẫn tới tình trạng phototranzito bị chặn hoặc bị bão hòa và mặt khác để có thể coi độ nhạy là không đổi.

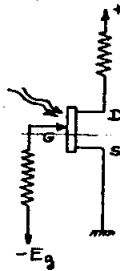
Trong những điều kiện như vậy dòng colectơ của phototranzito có dạng:

$$i_c(t) = I_c(\Phi_0) + S \cdot \Phi_1(t) \quad (2.62)$$

2.4.3.3. Phototranzito hiệu ứng trường (photoFET)

Phototranzito hiệu ứng trường (photoFET) là một loại linh kiện được sử dụng rất rộng rãi. Sơ đồ tương đương của tranzito hiệu ứng trường biểu diễn trên hình 2.24.

Trong tranzito hiệu ứng trường, ánh sáng được sử dụng để làm thay đổi điện trở kênh. Việc điều khiển dòng máng I_D thực hiện thông qua sự thay đổi điện



Hình 2.24: Phototranzito hiệu ứng trường.

áp V_{GS} giữa cổng và nguồn. Trong chế độ phân cực ngược chuyển tiếp PN giữa cổng và kênh, điện áp này sẽ xác định độ rộng của kênh và do đó dòng máng có dạng:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad (2.64)$$

trong đó I_{DSS} là dòng máng khi $V_{GS} = 0$, V_p là điện áp thắt kênh.

Khi được chiếu sáng, chuyển tiếp PN (giữa cổng và kênh) giống như một photodiôt cho dòng ngược I_r :

$$I_r = I_0 + I_p \quad (2.65)$$

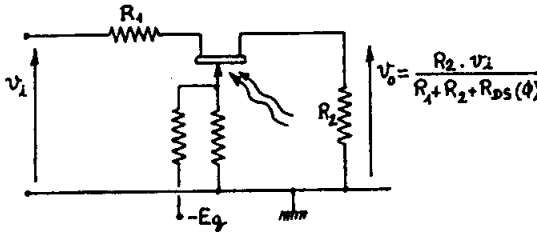
với $I_p = S_g \cdot \Phi$. Trong biểu thức trên: I_0 là dòng điện trong tối (ở 25 °C I_0 có giá trị cỡ nA và tăng gấp đôi khi nhiệt độ tăng thêm 10 °C), I_p là dòng quang điện, S_g là độ nhạy của diôt cổng-kênh, Φ là thông lượng ánh sáng.

Dòng I_T chạy qua điện trở R_g của mạch cổng xác định điện thế V_{GS} và dòng máng:

$$V_{GS} = R_g (I_0 + I_p) - E_g \quad (2.66)$$

trong đó E_g là điện thế phân cực của cổng (h. 2.24).

Một ứng dụng quan trọng của phototranzito hiệu ứng trường là điều biến điện áp bằng ánh sáng. Khi điện áp nguồn-máng nhỏ, tranzito hiệu ứng trường thể hiện giống như một điện trở R_{DS} giữa nguồn và máng. Giá trị của R_{DS} được xác định bởi điện thế V_{GS} . Trong trường hợp phototranzito hiệu ứng trường, điện trở R_{DS} có thể điều chỉnh được nhờ thay đổi thông lượng ánh sáng chiếu tới. Nhờ tính chất này người ta sử dụng phototranzito hiệu ứng trường để chế tạo bộ giảm điện áp điều khiển bằng ánh sáng (h. 2.25).



Hình 2.25: Bộ giảm điện áp điều khiển bằng ánh sáng

2.5. Cảm biến quang phát xạ

Trong loại cảm biến này, sự biến đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện thực hiện được nhờ hiện tượng quang phát xạ điện tử (\bar{e}) ra khỏi vật liệu photocatot (bìa chắn bức xạ ánh sáng). Số lượng các điện tử phát xạ tỷ lệ với số photon chiếu vào photocatot. Các điện tử sơ cấp tạo dòng catot, sau đó có thể:

- Thu gom trực tiếp bằng anot (tế bào quang điện chân không),
- Ion hóa chất khí (đèn ion khí),
- Phát xạ thứ cấp kèm theo sự khuếch đại dòng thứ cấp (nhân quang).

2.5.1. Cơ chế hoạt động và vật liệu chế tạo

Trong một quá trình phát xạ, cơ chế phát xạ xảy ra theo ba giai đoạn:

- Hấp thụ photon và giải phóng điện tử bên trong vật liệu,
- Điện tử vừa được giải phóng di chuyển đến bề mặt,
- Điện tử thoát khỏi bề mặt vật liệu photocatot.

Trong trường hợp bán dẫn riêng, việc giải phóng điện tử đòi hỏi năng lượng của photon tới ít nhất phải bằng bề rộng vùng cấm E_g . Đương nhiên năng lượng này chưa đủ để làm điện tử bật ra khỏi vật liệu.

Sự di chuyển của điện tử sau khi được giải phóng mang tính chất ngẫu nhiên theo mọi hướng, do vậy chỉ có một lượng rất nhỏ trong tổng số điện tử giải phóng sẽ đến được bề mặt. Hơn nữa, trong quá trình di chuyển các điện tử này va chạm với các điện tử khác hoặc với photon tới làm mất đi một phần năng lượng đáng kể của nó.

Sự phát xạ của điện tử sau khi đã đến được bề mặt chỉ có thể xảy ra nếu như nó thắng được hàng rào thế phân cách vật liệu với môi trường bên ngoài (hàng rào này bằng ái lực điện tử E_a).

Với tất cả những điều kiện thực tế xảy ra, hiệu suất lượng tử (số điện tử phát xạ trung bình khi một photon ánh sáng bị hấp thụ) thường là nhỏ hơn 10% và rất ít khi vượt quá 30%.

Các vật liệu sử dụng làm photocatốt:

- AgOCs nhạy từ vùng hồng ngoại
- Cs_3Sb , $(Cs)Na_2KSb$ và K_2CsSb nhạy với ánh sáng nhìn thấy và vùng tử ngoại.
- Cs_2Te , Rb_2Te và CsT chỉ nhạy trong vùng tử ngoại.

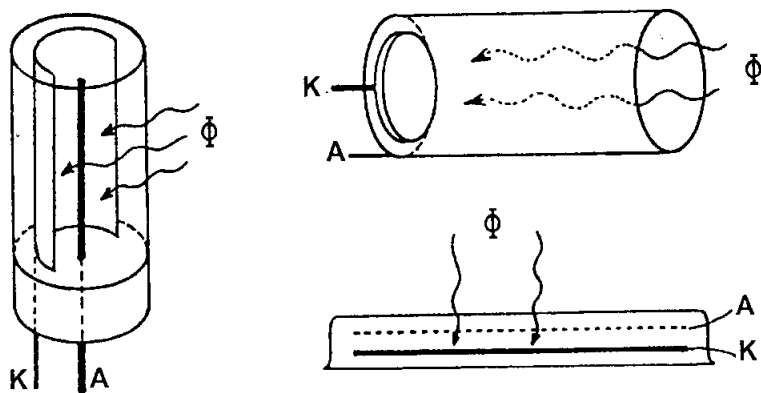
Hiệu suất lượng tử của các vật liệu nêu trên nằm trong dải giá trị thay đổi từ 1% đến 20%.

Ngoài những vật liệu này, các hợp chất nhóm III-V cũng được sử dụng nhiều. Đó là các hợp chất $GaAs_xSb_{1-x}$, $Ga_{1-x}In_xAs$, $InAs_xP_{1-x}$. Ngưỡng nhạy sáng của chúng nằm ở vùng hồng ngoại ($\lambda \approx 1\mu m$). Hiệu suất lượng tử có thể đạt tới 30%.

2.5.2. Tế bào quang điện chân không

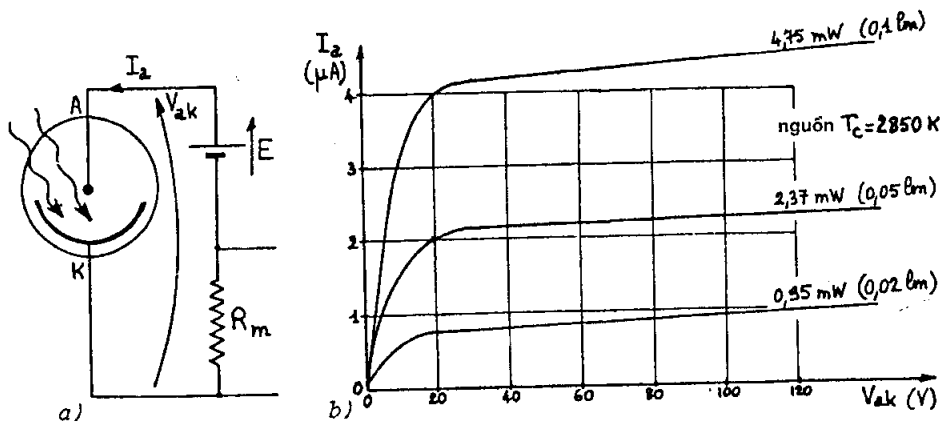
Tế bào quang điện chân không là một ống hình trụ có một cửa sổ trong suốt được hút chân không tới áp suất $10^{-6} \div 10^{-8}$ mmHg. Trong ống đặt một catốt có khả năng phát xạ khi được chiếu ánh sáng và một anot. Hình dạng và vị trí của các điện cực này được thiết kế một mặt để đảm bảo cho catốt có thể hấp thụ tối đa thông lượng ánh sáng chiếu tới mà không bị anot che tối, mặt khác để sao cho anot thu được tối đa lượng điện tử phát xạ từ catốt.

Trên hình 2.26 biểu diễn sơ đồ cấu tạo của tế bào quang điện chân không. Sơ đồ mạch điện của nó biểu diễn trên hình 2.27a. Sự thay đổi của dòng anot I_a phụ thuộc điện thế anot-catot V_{ak} biểu diễn trên hình 2.27b.



Hình 2.26: Tế bào quang điện chân không.

Đường cong biểu diễn đặc tuyến $I_a - V_{ak}$ có hai vùng rõ rệt. Vùng điện tích không gian đặc trưng bởi sự tăng mạnh của dòng khi điện áp tăng. Trong vùng này, một phần nhỏ của các điện tử phát xạ từ catot sẽ tạo nên vùng điện



Hình 2.27: Sơ đồ tương đương (a) và đặc trưng dòng-thế của tế bào quang điện chân không.

tích không gian có xu hướng đẩy các điện tử mới phát xạ bật trở lại (hiệu ứng đẩy nhau của các điện tích cùng dấu) dẫn đến làm hạn chế dòng anot. Hiệu ứng vùng điện tích không gian sẽ giảm đi nếu tăng điện thế V_{ak} .

Vùng bão hòa đặc trưng bởi sự phụ thuộc không đáng kể của dòng vào điện áp: các điện tử phát xạ bị thu lại ở anot. Trong vùng này dòng I_a chỉ phụ thuộc vào thông lượng của ánh sáng chiếu tới. Sự tăng dòng (không đáng kể) trong vùng bão hòa là do giảm công thoát (bởi hiệu ứng Shottky) và do dòng ion hóa gây nên bởi sự va chạm của điện tử phát xạ được tăng tốc (do V_{ak}) với các phân tử của chất khí dư.

Tế bào quang điện được sử dụng trong vùng bão hòa, khi đó nó giống như một nguồn dòng, giá trị của dòng chỉ phụ thuộc vào thông lượng ánh sáng mà nó nhận được. Điện trở trong ρ của tế bào quang điện rất lớn và được tính từ độ dốc của đặc tuyến ở vùng bão hòa:

$$\frac{1}{\rho} = \left(\frac{dI_a}{dV_{ak}} \right)_{\Phi} \quad (2.67)$$

Giá trị của ρ cỡ $10^{10} \Omega$.

Trong vùng bão hòa, trên thực tế dòng anot bằng dòng catot. Bởi vậy, độ nhạy phổ của tế bào quang điện được biểu diễn như là giá trị của dòng anot trong vùng bão hòa (cũng sẽ tương đương với việc biểu diễn nó qua giá trị của dòng catot). Giá trị của độ nhạy nằm trong khoảng $10 \div 100 \text{ mA/W}$.

2.5.3. Tế bào quang điện dạng khí

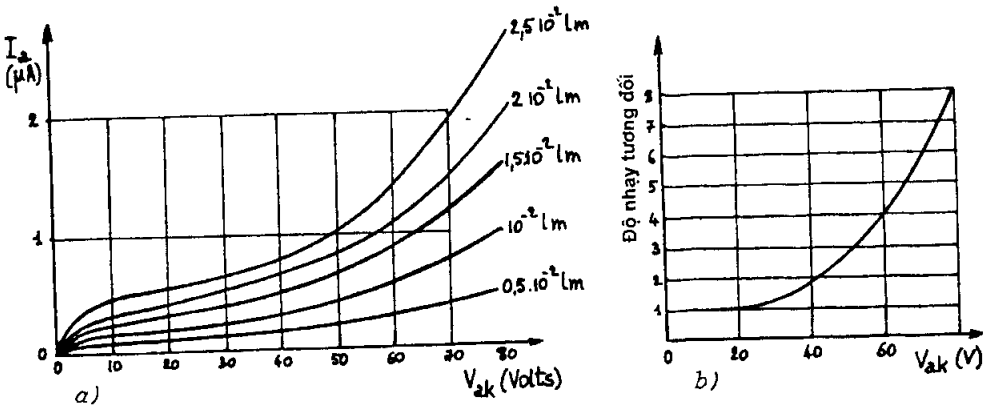
Tế bào quang điện dạng khí có cấu tạo tương tự tế bào chân không, chỉ khác một điểm là thể tích bên trong đèn được điền đầy bằng một loại khí trơ, thường là argon, dưới áp suất cỡ $10^{-1} \div 10^{-2} \text{ mmHg}$.

Khi điện áp thấp hơn 20V, đặc tuyến $I_{\text{anot}} - V_{\text{anot-catot}}$ có dạng giống như trong trường hợp tế bào quang điện chân không (h. 2.28), bởi vì các điện tử do catot bức xạ ra trong trường hợp này không đủ gia tốc để ion hóa chất khí.

Khi V_A cao, điện tử chuyển động với vận tốc đáng kể làm ion hoá (do va chạm) các nguyên tử khí, kết quả là dòng anot tăng lên từ $5 \div 10$ lần.

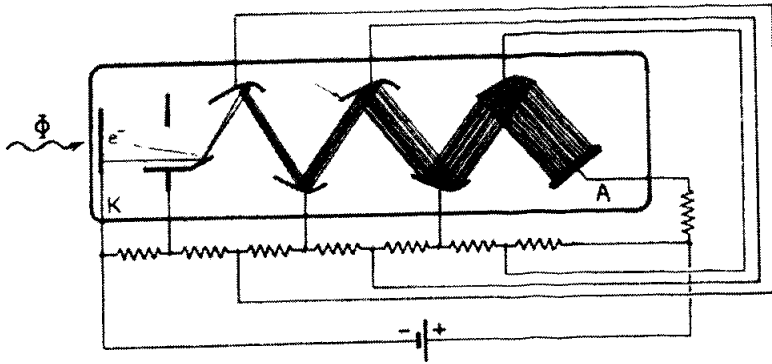
2.5.4. Thiết bị nhân quang

Khi bề mặt vật rắn bị bắn phá bởi các điện tử có năng lượng đủ lớn, nó có thể phát xạ các điện tử (gọi là phát xạ thứ cấp). Nếu số điện tử phát xạ thứ cấp lớn hơn số điện tử tới thì sẽ có khả năng khuếch đại tín hiệu. Sự khuếch đại này được ứng dụng trong thiết bị nhân quang.



Hình 2.28: Tế bào quang điện dạng khí: a) đặc trưng dòng-thế tĩnh
b) ảnh hưởng của V_{ak} đến độ nhạy.

Các điện tử tới (hay còn gọi là điện tử sơ cấp) được phát xạ từ một photocatốt đặt trong chân không và bị chiếu sáng. Sau đó chúng được tiêu thụ (bằng phương pháp tĩnh điện) trên điện cực thứ nhất của dãy các điện cực (dynode). Bề mặt của những điện cực này được phủ bằng vật liệu có khả năng phát xạ điện tử thứ cấp. Các điện cực mắc nối tiếp nhau và được cung



Hình 2.29: Sơ đồ nguyên lý của thiết bị nhân quang.

cấp điện thế thông qua các cầu điện trở. Theo chiều đi từ điện cực thứ nhất đến các điện cực tiếp theo, điện thế của chúng tăng dần sao cho điện tử thứ cấp phát ra từ điện cực thứ k sẽ bị hút bởi điện cực thứ $(k+1)$, đồng thời số điện tử thứ cấp phát ra ở những điện cực này cũng tăng lên (h. 2.29).

Nếu mỗi điện tử sơ cấp khi va chạm với một điện cực giải phóng ra δ điện tử phát xạ thứ cấp thì n điện cực với điện thế khác nhau mắc nối tiếp theo nguyên tắc nói trên sẽ phát xạ số điện tử thứ cấp $M = \delta^n$. Trên thực tế, không phải tất cả các điện tử phát xạ ra từ catot đều đến được tới điện cực đầu tiên. Mặt khác không phải tất cả các điện tử thứ cấp phát xạ từ một điện cực nào đó cũng đều đi được tới điện cực tiếp theo. Giả sử hệ số hữu hiệu của quá trình thu điện tử ở các điện cực là η_c và hệ số chuyển tải hữu hiệu (từ điện cực này sang điện cực khác) là η_t . Khi đó hệ số khuếch đại M có thể được biểu diễn bởi công thức:

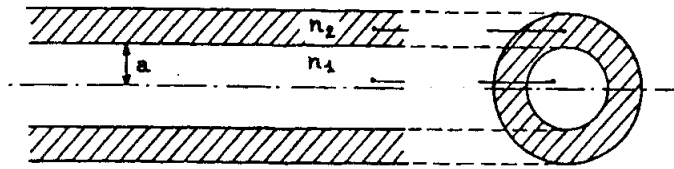
$$M = \eta_c(\eta_t \cdot \delta)^n \tag{2.68}$$

Với số điện cực $n = 5 \div 15$, hệ số phát xạ thứ cấp $\delta = 5 \div 10$, η_c và η_t lớn hơn 90%, hệ số khuếch đại của thiết bị nhân quang $M \sim 10^6 \div 10^8$.

2.6. C ấ p q u a n g

2.6.1. C ấ u t ả o và các tính chất chung

Trên hình 2.30 biểu diễn dạng đơn giản nhất của cáp quang. Nó bao gồm một lõi với chiết suất n_1 , bán kính a ($10 \div 100\mu\text{m}$) và một vỏ có chiết suất $n_2 < n_1$, dày $\sim 50\mu\text{m}$.



Hình 2.30: Mặt cắt của cáp quang.

Các vật liệu sử dụng để chế tạo cáp quang bao gồm:

- SiO₂ tinh khiết hoặc pha tạp nhẹ.
- Thủy tinh, thành phần của SiO₂ và phụ gia Na₂O₃, B₂O₃, PbO...
- Polyme (trong một số trường hợp).

Ở mặt phân cách giữa 2 môi trường có chiết suất tương ứng bằng n_1 và n_2 , các góc θ_1, θ_2 do một tia sáng tạo thành với đường trục giác của mặt phẳng (h. 2.31a) liên hệ với nhau bởi biểu thức Descartes:

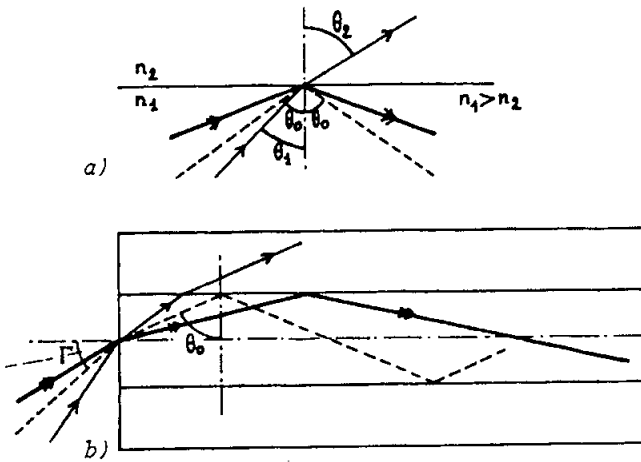
$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (2.69)$$

Khi $n_1 > n_2$ sẽ xảy ra phản xạ toàn phần nếu

$$\theta_1 > \text{Arcsin} \left[\frac{n_2}{n_1} \right] = \theta_0 \quad (2.70)$$

Với điều kiện như vậy, trong trường hợp cáp quang tia sáng sẽ bị giam giữ trong lõi và được truyền đi bằng phản xạ liên tục nối tiếp nhau (h. 2.31b).

Thí dụ, nếu $n_1 = 1,51$ và $n_2 = 1,50$ sẽ có góc giới hạn $\theta_0 = 83^\circ 30'$.



Hình 2.31: Khúc xạ trên mặt phân cách giữa hai môi trường (a) và phản xạ toàn phần trong cáp quang (b).

2.6.2. Ứng dụng

2.6.2.1. Truyền thông tin

Ứng dụng quan trọng nhất của cáp quang là truyền thông tin. Truyền thông tin dưới dạng tín hiệu ánh sáng lan truyền trong cáp quang là để tránh các tín hiệu điện từ ký sinh hoặc để đảm bảo cách điện giữa mạch điện nguồn và máy thu. Trong những ứng dụng loại này, thông tin được truyền đi chủ yếu bằng cách mã hóa các xung ánh sáng. Đôi khi người ta còn có thể truyền thông tin đi bằng cách biến điệu biên độ hoặc tần số của ánh sáng.

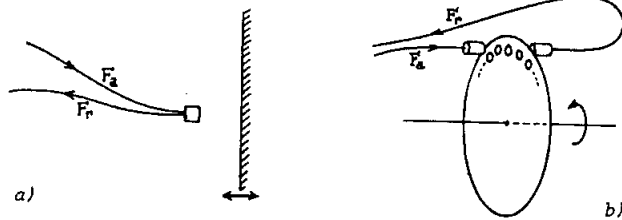
Khi thiết lập một đường dây truyền thông tin bằng cáp quang, điều quan trọng là phải đánh giá công suất của tín hiệu thu được cũng như sự tiêu hao năng lượng do cáp quang và các mối nối gây ra.

2.6.2.2. Quan sát và đo bằng phương tiện quang học

Cáp quang cho phép quan sát hoặc đo đạc bằng các phương pháp quang ở những chỗ khó tiếp cận hoặc trong các môi trường độc hại. Sử dụng cáp quang có thể dẫn ánh sáng đến những vị trí mà trong điều kiện bình thường ánh sáng không thể chiếu tới được.

Nguồn ánh sáng phát ra bức xạ, trong một số trường hợp dưới dạng xung, để đảm bảo phân biệt nó với ánh sáng môi trường. Bức xạ này được dẫn đến khu vực đo bằng cáp F_a (h. 2.32). Các đại lượng cần đo có thể là vị trí của một vật thể (phản xạ hoặc hấp thụ ánh sáng), tốc độ quay, thành phần hóa học của môi trường, nhiệt độ, v.v... Trong khu vực đo, tia bức xạ bị thay đổi và sự thay đổi này phụ thuộc vào đại lượng đo. Tùy từng trường hợp cụ thể mà ta thu được những thay đổi khác nhau của tia bức xạ:

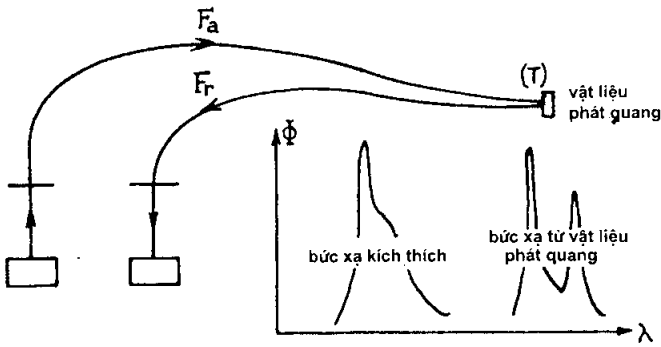
- Thay đổi cường độ trong trường hợp đo vị trí ((h. 2.32a),
- Điều biến với tần số tỉ lệ với tốc độ quay (h. 2.32b),
- Thay đổi bước sóng trong trường hợp đo nhiệt độ: ánh sáng tới làm phát quang vật liệu, ánh sáng do vật liệu bức xạ ra này có phổ phụ thuộc vào nhiệt độ (h. 2.33).



Hình 2.32: Ứng dụng cáp quang để đo dịch chuyển (a) và đo tốc độ quay (b).

Các tia phản xạ trở lại, tia bị truyền trở lại hoặc các tia mới phát xạ ra được thu lại bằng cáp F_r và được đưa đến một cảm biến quang. Cảm biến sẽ cung cấp tín hiệu điện chứa thông tin về đại lượng cần đo.

Trong những ứng dụng loại này, trong một số trường hợp tín hiệu quang (phát sinh bằng cách biến điệu ánh sáng) dưới tác động của một đại lượng



Hình 2.33: Sử dụng cáp quang để đo nhiệt độ.

vật lý làm thay đổi tính chất quang của cáp quang và do đó thay đổi điều kiện lan truyền sóng. Như vậy cáp quang đóng vai trò cảm biến để chuyển sự thay đổi của đại lượng vật lý cần đo thành tín hiệu quang.

CHƯƠNG 3

CẢM BIẾN NHIỆT ĐỘ

Trong tất cả các đại lượng vật lý, nhiệt độ là một trong số những đại lượng được quan tâm nhiều nhất. Đó là vì nhiệt độ có vai trò quyết định trong nhiều tính chất của vật chất. Một trong những đặc điểm tác động của nhiệt độ là làm thay đổi một cách liên tục các đại lượng chịu sự ảnh hưởng của nó, thí dụ áp suất và thể tích của một chất khí, sự thay đổi pha hay điểm Curi của các vật liệu từ tính. Bởi vậy, trong nghiên cứu khoa học, trong công nghiệp và trong đời sống hàng ngày việc đo nhiệt độ là điều rất cần thiết.

Tuy nhiên, để đo được trị số chính xác của một nhiệt độ là vấn đề không đơn giản. Thực vậy, phần lớn các đại lượng vật lý đều có thể xác định một cách định lượng nhờ so sánh chúng với một đại lượng cùng bản chất được coi là đại lượng so sánh. Những đại lượng như vậy gọi là đại lượng mở rộng bởi vì chúng có thể được xác định bằng bội số hoặc ước số của đại lượng chuẩn (đại lượng so sánh). Ngược lại, nhiệt độ là đại lượng gia tăng: việc nhân hoặc chia nhiệt độ không có một ý nghĩa vật lý rõ ràng. Bởi vậy nghiên cứu cơ sở vật lý để thiết lập thang đo nhiệt độ là điều cần làm trước khi có thể nói đến việc đo nhiệt độ.

Có nhiều cách đo nhiệt độ, trong đó có thể liệt kê các phương pháp chính sau đây:

- Phương pháp quang dựa trên sự phân bố phổ bức xạ nhiệt do dao động nhiệt (hiệu ứng Doppler).
- Phương pháp cơ dựa trên sự giãn nở của vật rắn, của chất lỏng hoặc khí (với áp suất không đổi), hoặc dựa trên tốc độ âm.
- Phương pháp điện dựa trên sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ, hiệu ứng Seebeck, hoặc dựa trên sự thay đổi tần số dao động của thạch anh.

3.1. Thang nhiệt độ

Các tính chất vật lý của vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ của chúng. Từ sự thay đổi nhiệt của một đặc trưng vật lý của vật liệu cho trước người ta luôn luôn có thể xác định một thang nhiệt độ cho phép đo nhiệt độ và đặc biệt là nhận biết sự cân bằng của hai nhiệt độ. Tuy vậy, thang nhiệt độ như thế là hoàn toàn tùy tiện bởi vì nó liên quan đến một tính chất đặc biệt của một vật thể đặc biệt: nó không cho phép gán cho giá trị nhiệt độ một ý nghĩa vật lý riêng. Chỉ có xuất phát từ các định luật nhiệt động học mới có thể xác định thang nhiệt độ có đặc trưng tổng quát cho mọi trường hợp.

Các thang nhiệt độ tuyệt đối được xác định tương tự như nhau và dựa trên các tính chất của chất khí lý tưởng. Định luật Carnot nêu rõ: hiệu suất η của một động cơ nhiệt thuận nghịch hoạt động giữa hai nguồn (với nhiệt độ θ_1 và θ_2 tương ứng), trong một thang đo bất kỳ, chỉ phụ thuộc vào θ_1 và θ_2 :

$$\eta = \frac{F(\theta_1)}{F(\theta_2)} \quad (3.1)$$

Dạng của hàm F phụ thuộc vào thang đo nhiệt độ. Ngược lại, việc lựa chọn hàm F sẽ quyết định thang đo nhiệt độ. Đặt $F(\theta) = T$ chúng ta sẽ xác định T như là nhiệt độ nhiệt động học tuyệt đối và hiệu suất của động cơ nhiệt thuận nghịch được viết như sau:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (3.2)$$

trong đó T_1 và T_2 là nhiệt độ nhiệt động học tuyệt đối của hai nguồn. Như đã biết, chất khí lý tưởng được xác định bởi:

- nội năng U chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của chất khí,
- phương trình đặc trưng liên hệ giữa áp suất p , thể tích v và nhiệt độ θ .

$$p \cdot v = G(\theta) \quad (3.3)$$

Có thể chứng minh được rằng

$$G(\theta) = R T \quad (3.4)$$

trong đó R là hằng số của chất khí lý tưởng. Giá trị R của một phân tử gam của chất khí chỉ phụ thuộc vào đơn vị đo nhiệt độ. Để có thể gán một giá trị số cho T , cần phải xác định đơn vị cho nhiệt độ. Muốn vậy chỉ cần gán một

giá trị số cho nhiệt độ tương ứng với một hiện tượng nào đó với điều kiện là hiện tượng này hoàn toàn xác định và có tính lặp lại.

Thang nhiệt độ nhiệt động học tuyệt đối:

Thang Kelvin: đơn vị là K. Trong thang Kelvin này người ta gán cho nhiệt độ của điểm cân bằng của ba trạng thái *nước - nước đá - hơi* một giá trị số bằng 273,15K.

Từ thang nhiệt độ nhiệt động học tuyệt đối (thang Kelvin) người ta đã xác định các thang mới là thang Celsius và thang Fahrenheit (bằng cách dịch chuyển các giá trị nhiệt độ).

Thang Celsius:

Trong thang đo này đơn vị nhiệt độ là ($^{\circ}\text{C}$), một độ Celsius bằng một độ Kelvin. Quan hệ giữa nhiệt độ Celsius và nhiệt độ Kelvin được xác định bởi biểu thức:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (3.5)$$

Thang Fahrenheit:

Đơn vị nhiệt độ là Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)

$$T(^{\circ}\text{C}) = \left\{ T(^{\circ}\text{F}) - 32 \right\} \frac{5}{9} \quad (3.6)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (3.7)$$

Trong bảng 3.1 ghi các giá trị tương ứng của một số nhiệt độ quan trọng ở các thang đo khác nhau.

Bảng 3.1

Nhiệt độ	Kelvin (K)	Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)
Điểm 0 tuyệt đối	0	-273,15	-459,67
Hỗn hợp nước-nước đá	273,15	0	32
Cân bằng nước-nước đá-hơi nước	273,16	0,01	32,018
Nước sôi	373,15	100	212

3.2. Nhiệt độ đo được và nhiệt độ cần đo

3.2.1. Nhiệt độ đo được

Nhiệt độ đo được (nhờ một điện trở hoặc một cặp nhiệt) chính bằng nhiệt độ của cảm biến và ký hiệu là T_c . Nó phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường T_x và vào sự trao đổi nhiệt trong đó. Nhiệm vụ của người làm thực nghiệm là làm thế nào để giảm hiệu số $T_x - T_c$ xuống nhỏ nhất. Có hai biện pháp để giảm sự khác biệt giữa T_x và T_c :

- Tăng trao đổi nhiệt giữa cảm biến và môi trường đo.
- Giảm trao đổi nhiệt giữa cảm biến và môi trường bên ngoài.

3.2.2. Đo nhiệt độ trong lòng vật rắn

Thông thường cảm biến được trang bị một lớp vỏ bọc bên ngoài. Để đo nhiệt độ của một vật rắn bằng cảm biến nhiệt độ, từ bề mặt của vật người ta khoan một lỗ nhỏ với đường kính bằng r và độ sâu bằng L . Lỗ này dùng để đưa cảm biến vào sâu trong vật rắn. Để tăng độ chính xác của kết quả, phải đảm bảo hai điều kiện:

- Chiều sâu của lỗ khoan phải bằng hoặc lớn hơn gấp mười lần đường kính của nó ($L \geq 10r$).
- Giảm trở kháng nhiệt giữa vật rắn và cảm biến bằng cách giảm khoảng cách giữa vỏ cảm biến và thành lỗ khoan. Khoảng trống giữa vỏ cảm biến và thành lỗ khoan phải được lấp đầy bằng một vật liệu dẫn nhiệt tốt.

3.3. Đo nhiệt độ bằng điện trở

3.3.1. Độ nhạy nhiệt

Trong trường hợp tổng quát, giá trị của một điện trở phụ thuộc vào nhiệt độ:

$$R(T) = R_0 F(T - T_0) \quad (3.8)$$

R_0 là điện trở ở nhiệt độ T_0 và F là hàm đặc trưng cho vật liệu, $F = 1$ khi $T = T_0$.

Trường hợp kim loại:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3) \quad (3.9)$$

trong đó T đo bằng $^{\circ}\text{C}$ và $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$

Trường hợp nhiệt điện trở (hỗn hợp của các oxit bán dẫn):

$$R(T) = R_0 \cdot \exp\left\{B\left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right]\right\} \quad (3.10)$$

trong đó T là nhiệt độ tuyệt đối.

Các hệ số được xác định chính xác bằng cách đo những nhiệt độ đã biết trước. Khi đã biết giá trị của các hằng số, từ giá trị của R người ta xác định được nhiệt độ cần đo.

Khi độ biến thiên nhiệt độ ΔT (xung quanh giá trị T) nhỏ, nhiệt độ có thể thay đổi theo hàm tuyến tính:

$$R(T + \Delta T) = R(T) \cdot (1 + \alpha_R \Delta T) \quad (3.11)$$

$$\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT} \quad (3.12)$$

α_R là hệ số nhiệt độ của điện trở hay độ nhạy nhiệt ở nhiệt độ T. Hệ số α_R phụ thuộc vào vật liệu và nhiệt độ. Thí dụ, ở nhiệt độ 0°C:

- Platin (Pt) có hệ số $\alpha_R = 3,9 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$,
- Một số loại nhiệt điện trở có $\alpha_R = 5,2 \cdot 10^{-2} / ^\circ\text{C}$.

Chất lượng của thiết bị đo xác định giá trị nhỏ nhất mà nó có thể đo được $\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\min}$ do vậy nó cũng xác định sự thay đổi nhỏ nhất của nhiệt độ có thể phát hiện được

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\min} \rightarrow \Delta T_{\min} \quad (3.13)$$

nghĩa là

$$\Delta T_{\min} = \frac{1}{\alpha_R} \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\min} \quad (3.14)$$

Thí dụ, nếu $\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\min} = 10^{-6}$ và đối với những phép đo xung quanh điểm 0°C thì:

- $\Delta T_{\min} \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ đối với điện trở Pt.
- $\Delta T_{\min} \approx 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ đối với nhiệt điện trở.

Sự thay đổi theo nhiệt độ của một điện trở phụ thuộc đồng thời vào điện trở suất ρ và kích thước hình học của nó. Đối với một dây điện trở chiều dài l và tiết diện s , hệ số nhiệt độ được tính theo biểu thức:

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} - \frac{1}{s} \frac{ds}{dT} \quad (3.15)$$

trong đó:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \alpha_\rho \quad \text{gọi là hệ số nhiệt độ của điện trở suất của vật liệu.}$$

$$\frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \alpha_l \quad \text{gọi là hệ số co giãn của vật liệu}$$

$$\frac{1}{s} \frac{ds}{dT} = 2\alpha_l$$

do đó (3.16)

$$\alpha_R = \alpha_\rho - \alpha_l$$

Thông thường các điện trở sử dụng để đo nhiệt độ có các hệ số $\alpha_\rho \sim 10^{-3}/^\circ\text{C}$, và $\alpha_l \sim 10^{-5}/^\circ\text{C}$, cho nên trên thực tế $\alpha_R = \alpha_\rho$.

3.3.2. Điện trở kim loại

3.3.2.1. Chọn kim loại

Dựa vào dải nhiệt độ cần đo và các tính chất đặc biệt khác người ta thường làm điện trở bằng Pt, Ni. Đôi khi còn dùng Cu, W để chế tạo điện trở.

Platin có thể được chế tạo với độ tinh khiết rất cao (99,999%). Điều này cho phép tăng độ chính xác của các tính chất điện của vật liệu. Ngoài ra tính trơ về hóa học và sự ổn định trong cấu trúc tinh thể của platin đảm bảo sự ổn định của các đặc tính dẫn điện của điện trở chế tạo từ loại vật liệu này. Các điện trở làm bằng platin hoạt động tốt trong một dải nhiệt độ khá rộng với $T = -200^\circ\text{C} \div 1000^\circ\text{C}$ nếu như vỏ bảo vệ của nó cho phép.

Nikel có độ nhạy nhiệt cao hơn nhiều so với platin. Điện trở của nikel ở 100°C lớn gấp 1,617 lần so với giá trị ở 0°C . Đối với platin sự chênh lệch

của điện trở ở hai nhiệt độ này chỉ bằng 1,385. Tuy vậy nikel là chất có hoạt tính hóa học cao, nó dễ bị ô xy hóa khi nhiệt độ làm việc tăng. Điều này làm giảm tính ổn định của nó và hạn chế dải nhiệt độ làm việc của điện trở. Thông thường các điện trở chế tạo từ nikel làm việc ở nhiệt độ thấp hơn 250 °C.

Đồng được sử dụng trong một số trường hợp bởi vì sự thay đổi nhiệt của các điện trở chế tạo bằng đồng có độ tuyến tính cao. Tuy vậy, do hoạt tính hóa học của đồng quá lớn nên các điện trở loại này chỉ được sử dụng ở nhiệt độ $T < 180$ °C. Ngoài ra, do điện trở suất của đồng nhỏ nên muốn có điện trở trị số cao phải tăng chiều dài của dây làm tăng kích thước của điện trở.

Wonfram có độ nhạy nhiệt cao hơn so với platin khi nhiệt độ dưới 100K và nó có thể được sử dụng ở nhiệt độ cao hơn với độ tuyến tính tốt hơn. Từ wonfram có thể chế tạo các sợi dây rất mảnh để làm các điện trở có trị số cao, hoặc là tối thiểu hóa kích thước của các điện trở. Tuy nhiên ứng suất (tạo ra trong quá trình kéo sợi) trong wonfram rất khó có thể bị triệt tiêu hoàn toàn bằng phương pháp ủ nhiệt. Vì thế các điện trở wonfram có độ ổn định nhỏ hơn so với các điện trở chế tạo từ platin.

Trong bảng 3.2 liệt kê một số đặc trưng vật lý quan trọng của các vật liệu thường được sử dụng để chế tạo điện trở. Các ký hiệu trong bảng có ý nghĩa như sau:

T_f - nhiệt độ nóng chảy

c - nhiệt lượng riêng ở 20 °C

λ_t - độ dẫn nhiệt

α_ℓ - hệ số giãn nở tuyến tính

ρ - điện trở suất ở 20 °C

α_ρ - hệ số nhiệt độ của điện trở suất ở 20 °C

Bảng 3.2

	Cu	Ni	Pt	W
T_f (°C)	1083	1453	1769	3380
c (J°C ⁻¹ kg ⁻¹)	400	450	135	125
λ_t (W°C ⁻¹ m ⁻¹)	400	90	73	120
α_ℓ (°C ⁻¹)	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$12,8 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
ρ (Ω.m)	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$10 \cdot 10^{-8}$	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$5,52 \cdot 10^{-8}$
α_ρ (°C ⁻¹)	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$

3.3.2.2. Chế tạo nhiệt kế

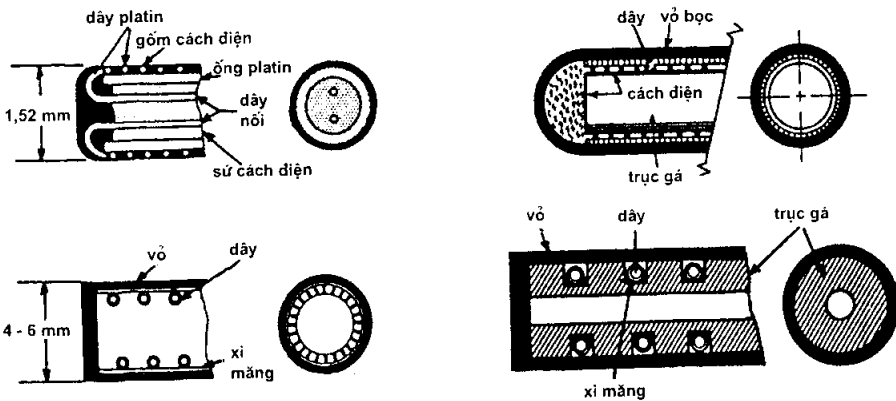
Giá trị điện trở và kích thước dây:

Một cách tổng quát, sự thay đổi nhiệt của một điện trở $\Delta R = R\alpha_R\Delta T$ sẽ gây nên một điện áp đo $V_m = \Delta R \cdot i$, trong đó i là dòng điện chạy qua điện trở. Thông thường i được giới hạn ở giá trị một vài mA để tránh làm nóng đầu đo. Để có độ nhạy cao phải sử dụng các điện trở tương đối lớn. Muốn vậy phải:

- giảm tiết diện dây, việc này bị hạn chế bởi vì tiết diện càng nhỏ thì dây càng dễ bị đứt.
- tăng chiều dài dây, việc này cũng bị giới hạn vì tăng chiều dài dây làm tăng kích thước của điện trở.

Giải pháp nhân nhượng:

Một giải pháp nhân nhượng thường được áp dụng: ấn định giá trị $R \sim 100\Omega$ ở 0°C . Khi đó, nếu dùng platin đường kính dây cỡ vài chục μm và chiều dài khoảng $\sim 10\text{cm}$, sau khi cuộn lại sẽ nhận được nhiệt kế có chiều dài cỡ 1 cm. Trên thực tế các sản phẩm thương mại có điện trở ở 0°C là 50Ω , 500Ω , và 1000Ω . Các điện trở trị số lớn thường được sử dụng để đo ở dải nhiệt độ thấp, ở đó chúng cho phép đo với độ nhạy tương đối tốt.



Hình 3.1: Nhiệt kế công nghiệp dùng điện trở Pt.

Để sử dụng cho mục đích công nghiệp, các nhiệt kế phải có vỏ bọc tốt chống được va chạm mạnh và rung động. Trong trường hợp này điện trở kim loại được cuộn và bao bọc trong thủy tinh hoặc gốm đặt trong vỏ kín bằng thép. Trên hình 3.1 là các nhiệt kế công nghiệp dùng điện trở kim loại Pt.

Khi chọn vật liệu chế tạo nhiệt kế cần chú ý đến hệ số giãn nở nhiệt của các vật liệu cấu thành để tránh gây ứng suất trong quá trình làm việc. Độ kín của vỏ bọc cần được đảm bảo một cách tuyệt đối. Ngoài ra vật liệu bọc dây điện trở phải có độ cách điện tốt và tránh mọi hiện tượng điện phân có thể dẫn đến làm hỏng kim loại. Vì lý do này mỗi loại vật liệu chỉ được dùng trong một khoảng nhiệt độ nhất định: dưới 500 °C đối với thủy tinh và dưới 1000 °C đối với gốm.

Nhiệt kế bề mặt:

Nhiệt kế bề mặt dùng để đo nhiệt độ trên bề mặt của vật rắn. Nó thường được chế tạo bằng phương pháp quang khắc và sử dụng các vật liệu làm điện trở là Ni, Fe-Ni hoặc Pt (Pt được sử dụng khi cần độ chính xác cao). Chiều dày lớp kim loại cỡ một vài μm và kích thước nhiệt kế cỡ 1 cm². Các đặc trưng chính của nhiệt kế bề mặt như sau:

- Độ nhạy α_R : ~ 5.10⁻³ / °C đối với trường hợp Ni và Fe-Ni
 ~ 4.10⁻³ / °C đối với trường hợp Pt
- Dải nhiệt độ sử dụng: Từ -195 °C đến 260 °C đối với Ni và Ni-Fe
 Từ -260 °C đến 1400 °C đối với Pt.

Trên hình 3.2 biểu diễn một nhiệt kế tiếp xúc bề mặt.



Hình 3.2: Nhiệt kế bề mặt.

Khi sử dụng, nhiệt kế được dán trên bề mặt cần đo nhiệt độ. Tỷ lệ bề mặt/thể tích cao và trở kháng nhiệt nhỏ của để đảm bảo cho thời gian đáp ứng đạt được cỡ mili giây. Tuy nhiên cần phải lưu ý là nhiệt kế bề mặt rất nhạy với mọi biến dạng của cấu trúc có bề mặt được dán nhiệt kế. Hệ số cảm biến của

nikel phụ thuộc vào biến dạng: giá trị của nó nhỏ khi bị nén. Bởi vậy nếu không thể dán nhiệt kế trên vùng không có biến dạng thì tốt nhất là dán nó trên vùng chịu biến dạng nén.

Một nguyên nhân quan trọng dẫn đến sai số của phép đo là biến dạng gây nên do sự khác nhau giữa độ giãn nở của nhiệt kế và của cấu trúc nằm dưới bề mặt. Hiệu ứng này đặc biệt lớn khi nhiệt độ đo lớn hơn nhiều so với nhiệt độ của môi trường xung quanh. Bởi vậy các nhà thiết kế phải được cung cấp những số liệu về sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ đối với vật liệu cần đo.

3.3.3. Nhiệt điện trở

3.3.3.1. Đặc điểm chung

Một tính chất rất quan trọng của loại điện trở này là có độ nhạy nhiệt rất cao, khoảng 10 lần lớn hơn so với độ nhạy của điện trở kim loại. Ngoài ra hệ số nhiệt của chúng có giá trị âm và phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ.

Nhiệt điện trở được làm từ hỗn hợp các ôxít bán dẫn đa tinh thể như: MgO , $MgAl_2O_4$, Mn_2O_3 , Fe_3O_4 , Co_2O_3 , NiO , $ZnTiO_4$.

Để chế tạo nhiệt điện trở, các bột ôxít được trộn với nhau theo một tỷ lệ thích hợp, sau đó chúng được nén định dạng và thiêu kết ở nhiệt độ $1000\text{ }^{\circ}C$. Các dây nối kim loại được hàn tại 2 điểm trên bề mặt bán dẫn đã được phủ bằng một lớp kim loại. Các nhiệt điện trở được chế tạo với hình dạng khác nhau (đĩa, hình trụ, vòng ...) và phần tử nhạy cảm có thể được bọc một lớp bảo vệ hoặc để trần. Các vật liệu thường sử dụng có điện trở suất cao cho phép chế tạo những điện trở có giá trị thích hợp với một lượng vật chất nhỏ và với kích thước tối thiểu (cỡ mm). Kích thước nhỏ cho phép đo nhiệt độ ở từng điểm, đồng thời do nhiệt dung nhỏ nên tốc độ đáp ứng lớn.

Độ ổn định của một nhiệt điện trở phụ thuộc vào việc chế tạo nó và điều kiện sử dụng. Vỏ bọc của nhiệt điện trở sẽ bảo vệ nó không bị phá hủy hóa học và tăng độ ổn định khi làm việc. Trong quá trình sử dụng nhiệt điện trở cần phải tránh những thăng giáng nhiệt độ đột ngột bởi vì điều này có thể dẫn đến làm rạn nứt vật liệu. Phụ thuộc vào loại nhiệt điện trở, dải nhiệt độ làm việc có thể thay đổi từ một vài độ tuyệt đối đến khoảng $300\text{ }^{\circ}C$. Có thể mở rộng dải nhiệt độ này nhưng khi đó trị số của điện trở sẽ gia tăng đáng kể khi làm việc ở nhiệt độ cao.

3.3.3.2. Độ dẫn của nhiệt điện trở

Một cách tổng quát, độ dẫn của một chất bán dẫn được biểu diễn bởi công thức:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (3.17)$$

trong đó, μ_n , μ_p là độ linh động và n , p là nồng độ của điện tử và lỗ trống (tương ứng), q là điện tích của chúng ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

Trái ngược với trường hợp kim loại, đối với bán dẫn, nhiệt độ ảnh hưởng chủ yếu đến nồng độ điện tích tự do (n , p). Sự thay đổi nhiệt độ làm đứt mối liên kết giữa các nguyên tử và dẫn đến sự hình thành các cặp điện tử lỗ trống. Số cặp G hình thành trong một đơn vị thời gian từ một đơn vị thể tích được biểu diễn bởi biểu thức:

$$G = A \cdot T^a \cdot \exp(-qE_i/kT) \quad (3.18)$$

trong đó T là nhiệt độ tuyệt đối của chất bán dẫn, E_i là năng lượng cần thiết để làm đứt một liên kết, A và a là hằng số đặc trưng cho vật liệu. Tuy nhiên một điện tử và một lỗ trống tự do có thể tái hợp lại để hình thành một mối liên kết: số lần tái hợp R trong một đơn vị thời gian từ một đơn vị thể tích tỷ lệ với nồng độ điện tử và lỗ trống tự do:

$$R = r \cdot np \quad (3.19)$$

trong đó r là hệ số tái hợp. Vì $n = p$ nên

$$R = r \cdot n^2 \quad (3.20)$$

Ở trạng thái cân bằng nồng độ điện tích tự do không thay đổi:

$$G = R \quad (3.21)$$

nghĩa là
$$n = \left\{ \frac{AT^a}{r} \right\}^{1/2} \cdot \exp(-qE_i/2kT) \quad (3.22)$$

Nếu tính đến ảnh hưởng của nhiệt độ đối với độ linh động của điện tử μ_n và lỗ trống μ_p thì độ dẫn có thể được viết dưới dạng biểu thức sau:

$$\sigma = C \cdot T^b \exp(-\beta/T) \quad (3.23)$$

trong đó C và b là các hằng số đặc trưng cho vật liệu:

$$b = 1 + 4 \quad (3.24)$$

$$\beta = qE_i/2k \quad (3.25)$$

E_i là năng lượng liên kết.

3.3.3.3. Quan hệ điện trở - nhiệt độ

Từ biểu thức của độ dẫn σ có thể viết biểu thức của điện trở:

$$R(T) = R_0 \left\{ \frac{T}{T_0} \right\}^{-b} \exp \left\{ \beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right\} \quad (3.26)$$

trong đó R_0 là điện trở ở nhiệt độ tuyệt đối T_0 . Do vậy có thể biểu diễn độ nhạy nhiệt dưới dạng:

$$\alpha_R = - \frac{\beta + bT}{T^2} \quad (3.27)$$

Ảnh hưởng của hàm mũ đến điện trở chiếm ưu thế hơn cho nên điện trở được viết lại dưới dạng:

$$R(T) = R_0 \exp \left\{ B \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right\} \quad (3.28)$$

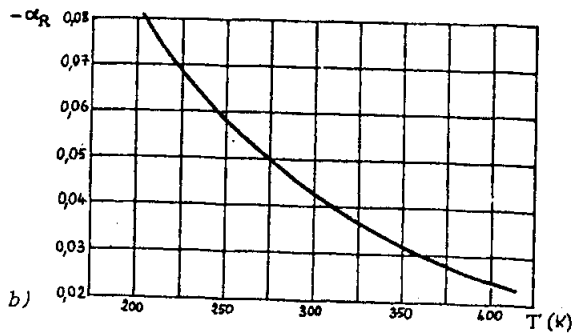
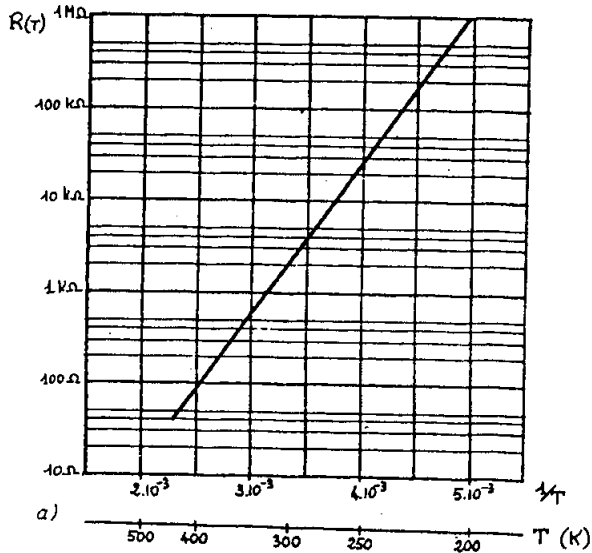
và bỏ qua không xét đến sự phụ thuộc của B vào nhiệt độ. Trong trường hợp này độ nhạy nhiệt có dạng: $\alpha_R = - B/T^2$. Giá trị của B nằm trong khoảng 3000 ÷ 5000K.

Trên hình 3.3a biểu diễn sự thay đổi của điện trở phụ thuộc vào nhiệt độ của một nhiệt điện trở. Trên hình 3.3b biểu diễn sự thay đổi của độ nhạy nhiệt α_R vào nhiệt độ của cùng nhiệt điện trở đó. Giá trị của B đối với nhiệt điện trở này bằng 3200 K ở -80 °C và tăng lên đến 4150 K khi nhiệt độ bằng 150 °C, tương ứng với $\beta = 2600$ K và $b = 3,60$.

Độ nhạy nhiệt cao của nhiệt điện trở cho phép ứng dụng chúng để phát hiện những biến thiên rất nhỏ của nhiệt độ (10^{-4} ÷ 10^{-3} K).

Các nhiệt điện trở có thể được sử dụng trong khoảng nhiệt độ từ một vài độ K đến 300 °C. Để đo nhiệt độ ngoài phạm vi của dải này, cần phải chọn vật liệu đặc biệt, thí dụ cacbua silic, và có biện pháp bảo vệ hữu hiệu chống lại sự phá hủy hóa học.

Để đo nhiệt độ thấp, người ta sử dụng các nhiệt điện trở có giá trị nhỏ ở 25 °C (thí dụ 50 hoặc 100 Ω), trong khi đó, để đo nhiệt độ cao cần phải sử dụng những nhiệt điện trở có điện trở cao ở nhiệt độ phòng 25 °C (từ 100 đến 500 Ω). Việc lựa chọn giá trị chính xác của điện trở phụ thuộc vào thiết bị đo.



Hình 3.3: Các đặc trưng của một nhiệt điện trở:
a) điện trở; b) độ nhạy nhiệt.

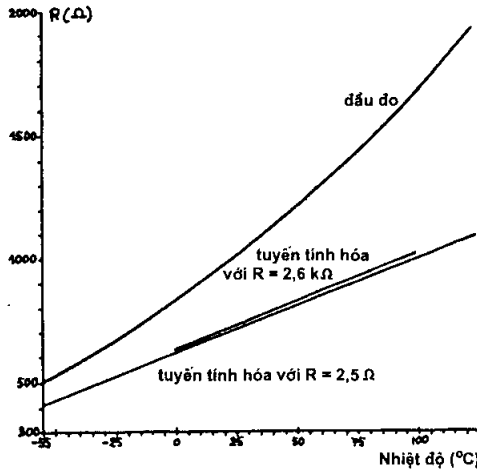
3.3.4. Điện trở silic

Đây là một điện trở bán dẫn, nó khác với những nhiệt điện trở nói trên ở những điểm sau:

- Hệ số nhiệt độ của điện trở suất có giá trị dương, cỡ $0,7\%/^{\circ}\text{C}$ ở 25°C . Sự thay đổi nhiệt của nó tương đối nhỏ nên có thể tuyến tính hóa đặc tuyến của cảm biến trong vùng nhiệt độ làm việc (h. 3.4) bằng cách mắc thêm một điện trở phụ (song song hoặc nối tiếp tùy thuộc vào mạch đo).

- Khoảng nhiệt độ sử dụng bị hạn chế trong dải từ $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ đến $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Các điện trở silic được chế tạo bằng công nghệ khuếch tán tạp chất vào đơn tinh thể silic. Sự thay đổi nhiệt của điện trở suất của silic phụ thuộc vào nồng độ pha tạp và vào nhiệt độ.



Hình 3.4: Sự phụ thuộc nhiệt độ của điện trở silic.

Nếu nhiệt độ nhỏ hơn $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dải nhiệt độ làm việc của điện trở silic), điện trở suất tăng khi nhiệt độ tăng do độ linh động của hạt tải giảm mà nồng độ của chúng trên thực tế là không đổi. Nồng độ không đổi được tạo ra do pha tạp, nó lớn hơn rất nhiều so với nồng độ gây nên bởi sự ion hóa (hình thành cặp điện tử - lỗ trống). Hệ số nhiệt độ của điện trở càng nhỏ khi pha tạp càng mạnh.

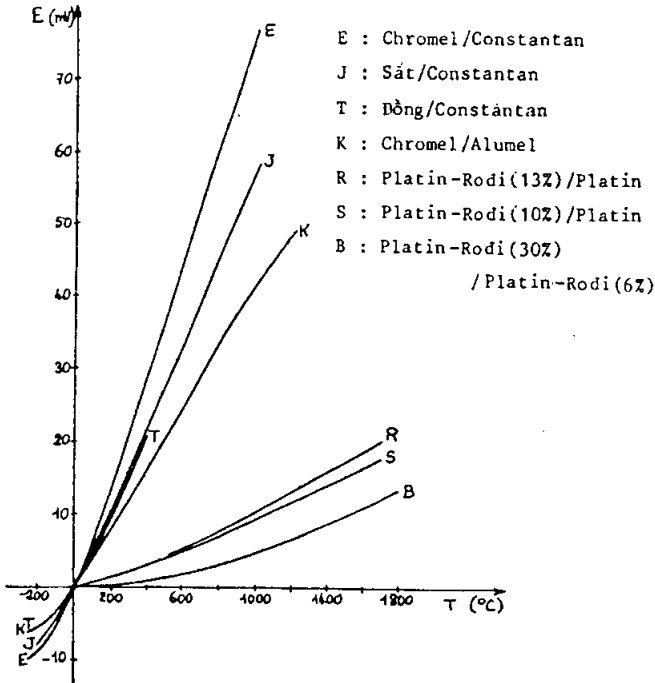
Trong trường hợp nhiệt độ lớn hơn $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, điện trở suất giảm khi nhiệt độ tăng. Quá trình ion hóa do nhiệt (chuyển mức của điện tử từ vùng hóa trị lên vùng dẫn) chiếm ưu thế làm cho nồng độ hạt tải tăng lên lớn hơn là nồng độ pha tạp. Hệ số nhiệt độ của điện trở suất trong vùng này không phụ thuộc vào pha tạp: đây là trường hợp bán dẫn riêng.

3.4. Đo nhiệt độ bằng cặp nhiệt

3.4.1. Đặc trưng chung - độ nhạy nhiệt

Cặp nhiệt có cấu tạo gồm hai loại dây dẫn A và B được nối với nhau bởi hai mối hàn có nhiệt độ T_1 và T_2 . Suất điện động E phụ thuộc vào bản chất vật liệu

làm các dây dẫn A, B và vào nhiệt độ T_1, T_2 . Thông thường nhiệt độ của một mối hàn được giữ ở giá trị không đổi và biết trước, gọi là nhiệt độ chuẩn ($T_1 = T_{ref}$). Nhiệt độ T_2 của mối hàn thứ hai, khi đặt trong môi trường nghiên



Hình 3.5: Sự thay đổi nhiệt của suất điện động E của một số loại cặp nhiệt.

cứu nó sẽ đạt tới giá trị T_c chưa biết. Nhiệt độ T_c là hàm của nhiệt độ T_x và của các quá trình trao đổi nhiệt (có thể xảy ra).

Việc sử dụng cặp nhiệt có nhiều lợi thế. Kích thước cặp nhiệt nhỏ nên có thể đo nhiệt độ ở từng điểm của đối tượng nghiên cứu và tăng tốc độ đáp ứng (do nhiệt dung nhỏ). Một ưu điểm quan trọng nữa là cặp nhiệt cung cấp suất điện động nên khi đo không cần có dòng điện chạy qua và do vậy không có hiệu ứng đốt nóng.

Tuy nhiên sử dụng cặp nhiệt cũng có điều bất lợi: phải biết trước nhiệt độ so sánh T_{ref} , và do vậy sai số T_{ref} cũng chính bằng sai số của T_c .

Suất điện động của cặp nhiệt trong một dải rộng của nhiệt độ là hàm không tuyến tính của T_c (h. 3.5). Mỗi loại cặp nhiệt có một bảng chuẩn (ghi giá trị

của suất điện động phụ thuộc vào nhiệt độ) và một biểu thức diễn giải sự phụ thuộc của suất điện động vào nhiệt độ. Thí dụ, đối với cặp nhiệt platin - 30%rodi/platin - 6%rodi, trong khoảng nhiệt độ từ 0 °C đến 1820 °C theo chuẩn NF C 42-321 sự phụ thuộc của suất điện động E vào nhiệt độ có dạng:

$$E = \sum_{i=0}^{i=8} a_i T^i \quad (3.29)$$

trong đó E đo bằng μV và T đo bằng $^{\circ}\text{C}$. Giá trị cụ thể của các hệ số a_i trong biểu thức trên như sau:

$a_0 = 0$	$a_1 = -2,4674601620 \cdot 10^{-1}$
$a_2 = 5,9102111169 \cdot 10^{-3}$	$a_3 = -1,4307123430 \cdot 10^{-6}$
$a_4 = 2,1509149750 \cdot 10^{-9}$	$a_5 = -3,1757800720 \cdot 10^{-12}$
$a_6 = 2,4010367459 \cdot 10^{-15}$	$a_7 = -9,0928148159 \cdot 10^{-19}$
$a_8 = 1,3299505137 \cdot 10^{-22}$	

Đối với một số loại cặp nhiệt khác, khoảng nhiệt độ làm việc của chúng có thể chia ra thành những vùng nhỏ. Trong mỗi vùng như thế, mối quan hệ giữa suất điện động và nhiệt độ được mô tả bằng một biểu thức riêng đặc trưng cho vùng.

Nói chung mỗi loại cặp nhiệt có một giới hạn của dải nhiệt độ làm việc, từ -270°C đối với cặp nhiệt đồng/vàng-coban đến 2700°C đối với cặp nhiệt wonfram-reni 5%/wonfram-reni 26%. Như vậy, cặp nhiệt có dải nhiệt độ làm việc rộng hơn nhiều so với nhiệt kế điện trở và đây cũng là một ưu điểm của chúng.

Độ nhạy nhiệt (hay còn gọi là năng suất nhiệt điện) của cặp nhiệt điện ở nhiệt độ T_c được xác định bởi biểu thức:

$$s(T_c) = \frac{dE_{A/B}}{dT_c} \quad (3.30)$$

trong đó s là hàm của nhiệt độ và có đơn vị là $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Thí dụ:

Cặp nhiệt	Fe/ constantan: $s(0^{\circ}\text{C}) = 52,9 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, $s(700^{\circ}\text{C}) = 63,8 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Cặp nhiệt	Pt - Rh(10%) / Pt: $s(0^{\circ}\text{C}) = 6,4 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$; $s(1400^{\circ}\text{C}) = 11,93 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

3.4.2. Các hiệu ứng nhiệt điện

Trong các chuỗi (dây) dẫn điện nối tiếp dạng kim loại-chất lỏng hay kim loại-bán dẫn có các hiệu ứng nhiệt điện (thí dụ hiệu ứng Joule). Chúng được thể hiện thông qua sự chuyển đổi giữa năng lượng của dao động nhiệt và năng lượng điện của các hạt tải chuyển động.

3.4.2.1. Hiệu ứng Peltier

Ở tiếp xúc giữa hai dây dẫn A và B khác nhau về bản chất nhưng cùng một nhiệt độ tồn tại một hiệu điện thế tiếp xúc (h. 3.6a). Hiệu điện thế này chỉ phụ thuộc vào bản chất của vật dẫn và nhiệt độ:

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T \quad (3.31)$$

Đây chính là suất điện động Peltier.

Định luật Volta phát biểu như sau: trong một chuỗi cách nhiệt được cấu thành từ những vật dẫn khác nhau, tổng suất điện động Peltier bằng 0. Thí dụ, trong một chuỗi gồm bốn vật dẫn A B C D mắc nối tiếp (h. 3.6b), tổng suất điện động sẽ bằng không:

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T + P_{D/A}^T = 0 \quad (3.32)$$

Nếu tổng suất điện động trong mạch khác không thì sẽ có dòng điện chạy trong mạch và xảy ra sự tổn hao năng lượng do hiệu ứng Joule, điều này trái với định luật Carnot nói rằng một hệ ở cùng nhiệt độ sẽ không thể tạo ra năng lượng.

Biểu thức (3.32) trên đây có thể được viết lại như sau:

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T = -P_{D/A}^T \quad (3.33)$$

nghĩa là
$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T = P_{A/D}^T \quad (3.34)$$

vì rằng
$$P_{A/D}^T = -P_{D/A}^T \quad (3.35)$$

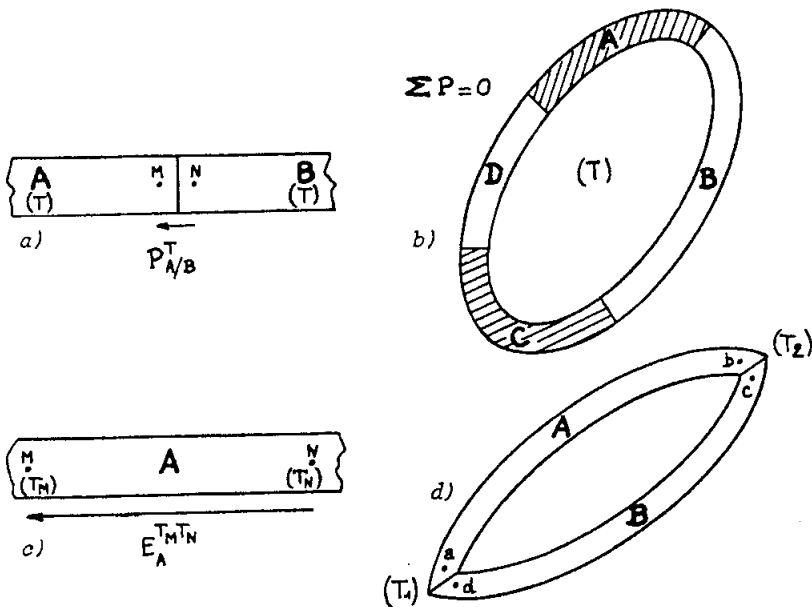
Như vậy có thể kết luận, khi hai vật dẫn A và D được phân cách bởi các vật dẫn trung gian và toàn hệ là đẳng nhiệt thì hiệu điện thế giữa hai vật dẫn A và D ở đâu nút cũng chính bằng hiệu điện thế nếu như chúng (A và D) tiếp xúc trực tiếp với nhau.

3.4.2.2. Hiệu ứng Thomson

Trong một vật dẫn đồng nhất A, giữa hai điểm M và N có nhiệt độ khác nhau sẽ sinh ra một suất điện động (h. 3.6c). Suất điện động này chỉ phụ thuộc vào bản chất của vật dẫn và nhiệt độ T_M, T_N của hai điểm M và N.

$$E_{\Lambda}^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_{\Lambda} dT \quad (3.36)$$

trong đó h_{Λ} là hệ số Thomson



Hình 3.6: Các hiệu ứng nhiệt điện: a) hiệu ứng Peltier, b) định luật Volta, c) hiệu ứng Thomson, d) hiệu ứng Seebeck.

Suất điện động Thomson là hàm của nhiệt độ. Định luật Magnus phát biểu, nếu hai đầu ngoài của một mạch chỉ gồm một vật dẫn duy nhất và đồng chất được duy trì ở cùng một nhiệt độ thì suất điện động Thomson bằng không.

3.4.2.3. Hiệu ứng Seebeck

Giả sử có một mạch kín tạo thành từ hai vật dẫn A B và hai chuyển tiếp của chúng được giữ ở nhiệt độ T_1 và T_2 (xem hình 3.6d), khi đó mạch sẽ tạo

thành một cặp nhiệt điện. Cặp nhiệt điện này gây nên một suất điện động do kết quả tác động đồng thời của hai hiệu ứng Peltier và Thomson. Suất điện động đó gọi là suất điện động Seebeck.

Thật vậy, suất điện động giữa a và b, b và c, c và d, d và a lần lượt bằng:

$$e_{ab} = \int_{T_1}^{T_2} h_A dT \quad e_{bc} = P_{A/B}^{T_2} \quad e_{cd} = \int_{T_2}^{T_1} h_B dT \quad e_{da} = P_{B/A}^{T_1} \quad (3.37)$$

Suất điện động Seebeck sẽ bằng tổng của các suất điện động thành phần Peltier và Thomson ở trên:

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_A - h_B) dT \quad (3.38)$$

Nếu chọn T_1 là nhiệt độ so sánh và lấy $T_1 = 0^\circ\text{C}$, khi đó đối với một cặp vật dẫn A - B cho trước, suất điện động chỉ phụ thuộc vào T_2 .

3.4.3. Phương pháp chế tạo và sơ đồ đo

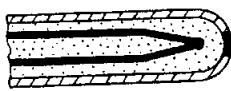
3.4.3.1. Chế tạo cặp nhiệt và vỏ bảo vệ

Trong khi chế tạo cặp nhiệt cần phải tránh tạo ra những cặp nhiệt ký sinh. Nguyên nhân gây ra cặp nhiệt ký sinh là do gập khúc dây, nhiễm bẩn hóa học, bức xạ hạt nhân (biến đổi nguyên tố). Mỗi hàn cũng phải nhỏ tới mức tối đa, bởi vì nếu vùng hàn có kích thước lớn thì giữa các điểm khác nhau có thể nhiệt độ sẽ khác nhau tạo ra suất điện động ký sinh.

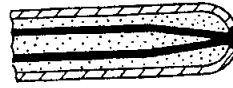
Có ba kỹ thuật chính thường được sử dụng để hàn cặp nhiệt:

- Hàn thiếc khi nhiệt độ sử dụng không cao quá.
- Hàn xì bằng đèn xì axetylen.
- Hàn bằng tia lửa điện.

Để tránh mọi tiếp xúc ở vùng ngoài mối hàn, dây được đặt trong sứ cách điện. Sứ cách điện phải trơ về hóa học và có điện trở lớn. Cấu trúc cặp nhiệt-sứ cách điện thường không bền vững cơ học, bởi vậy để bảo vệ, người ta còn trang bị thêm một lớp vỏ bọc bên ngoài. Vỏ bọc này đảm bảo kín để khí không lọt qua và chống được thăng giáng nhiệt độ đột ngột. Nó thường được làm bằng sứ hoặc bằng thép. Nếu vỏ bằng thép thì mối hàn có thể tiếp xúc với vỏ thép để giảm thời gian đáp ứng (h. 3.7).



mối hàn cách điện



mối hàn không cách điện

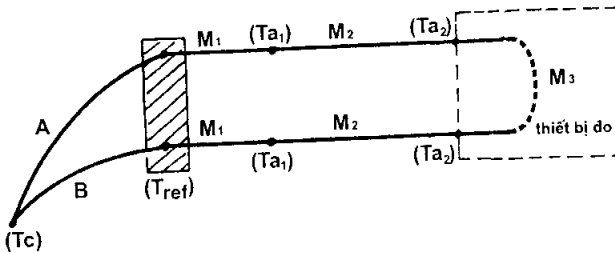
Hình 3.7: Vỏ bọc bảo vệ cặp nhiệt.

3.4.3.2. Sơ đồ đo

Trên hình 3.8 biểu diễn sơ đồ đo thông dụng của cặp nhiệt.

Điều kiện lắp ráp: từng đôi cùng nhiệt độ:

- Các mối hàn A/M₁ và B/M₁ của cặp nhiệt.
- Các mối hàn của các dây kim loại trung gian M₁/M₂ và M₂/M₃.



Hình 3.8.: Sơ đồ lắp ráp cặp nhiệt với thiết bị đo.

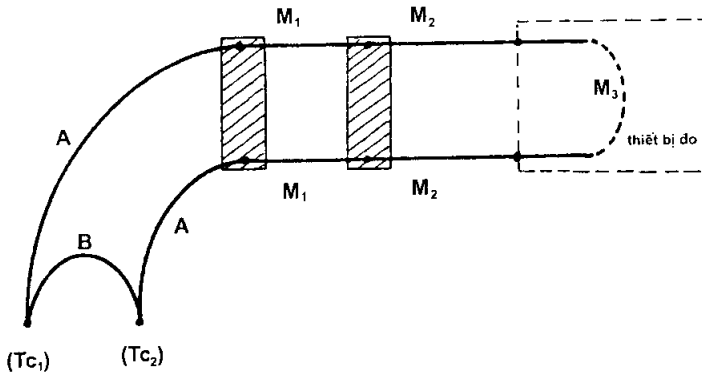
Khi đó trong mạch chỉ có suất điện động Seebeck của cặp nhiệt. Thực vậy, tổng suất điện động trong trường hợp này được viết dưới dạng biểu thức:

$$\begin{aligned}
 e = & P_{\Delta/B}^{T_c} + \int_{T_c}^{T_{ref}} h_B dT + P_{B/M_1}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_{a1}} h_{M_1} dT + P_{M_1/M_2}^{T_{a1}} + \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} h_{M_2} dT + \\
 & + P_{M_2/M_3}^{T_{a2}} + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} h_{M_3} dT + P_{M_3/M_2}^{T_{a1}} + \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} h_{M_2} dT + P_{M_2/M_1}^{T_{a1}} + \\
 & + \int_{T_{a1}}^{T_{ref}} h_{M_1} dT + P_{M_1/A}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_c} h_A dT
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Nghĩa là

$$e = P_{\Delta/B}^{T_c} - P_{A/B}^{T_{ref}} + \int_{T_c}^{T_{ref}} (h_B - h_A) dT = E_{\Delta/B}^{T_c, T_{ref}} \tag{3.40}$$

Sơ đồ vi sai: được áp dụng để đo hiệu nhiệt độ giữa hai điểm đặt ở hai mối hàn A/B của cặp nhiệt. Với điều kiện là các mối hàn giống nhau đặt ở cùng nhiệt độ A/M₁, M₁/M₂, M₂/M₃ trong mạch sẽ xuất hiện suất điện động Seebeck: $E_{A/B}$.



Hình 3.9: Sơ đồ vi sai đo sự khác nhau về nhiệt độ.

Nếu khoảng nhiệt độ từ T_{c1} đến T_{c2} nhỏ, năng suất nhiệt điện có thể coi là không đổi và ta có:

$$E_{A/B}^{T_{c1}T_{c2}} = s(T_{c1} - T_{c2}) \quad (3.41)$$

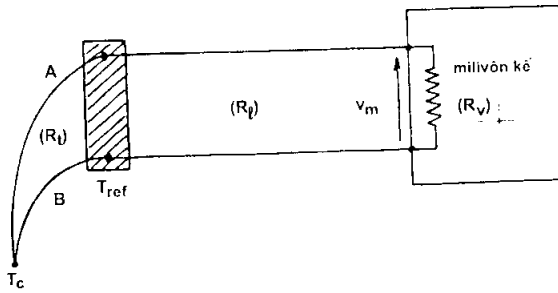
3.4.3.3. Phương pháp đo

Suất điện động Seebeck đo được giữa hai đầu của cặp nhiệt sẽ cung cấp thông tin về nhiệt độ cần đo. Chúng chỉ có thể được xác định chính xác nếu như ta giảm tới mức tối thiểu sự sụt áp do có dòng điện chạy trong các phần tử cặp nhiệt và dây dẫn: nói chung rất khó đoán biết điện trở của chúng vì điện trở là hàm của nhiệt độ môi trường và của nhiệt độ cần đo.

Người ta thường áp dụng hai phương pháp đo suất điện động:

- Sử dụng milivôn kế có điện trở trong rất lớn để giảm sụt thế trên dây dẫn.
- Sử dụng phương pháp xung đối để dòng chạy qua cặp nhiệt bằng không.

Trên hình 3.10 biểu diễn sơ đồ đo suất điện động của cặp nhiệt dùng milivôn kế.



Hình 3.10: Đo suất điện động của cặp nhiệt bằng milivôn kế.

Giả sử: R_t là điện trở của cặp nhiệt,
 R_l là điện trở dây nối,
 R_v là điện trở trong của milivôn kế,

khi đó điện áp giữa hai đầu của milivôn kế được biểu diễn bởi biểu thức:

$$V_m = E_{A/B}^{T_c T_{ref}} \frac{R_v}{R_t + R_l + R_v} \quad (3.42)$$

nghĩa là

$$E_{A/B}^{T_c T_{ref}} = V_m \left[1 + \frac{R_t + R_l}{R_v} \right] \quad (3.43)$$

Vì điện trở của cặp nhiệt và dây nối chưa biết nên để giảm sai số người ta chọn sao cho

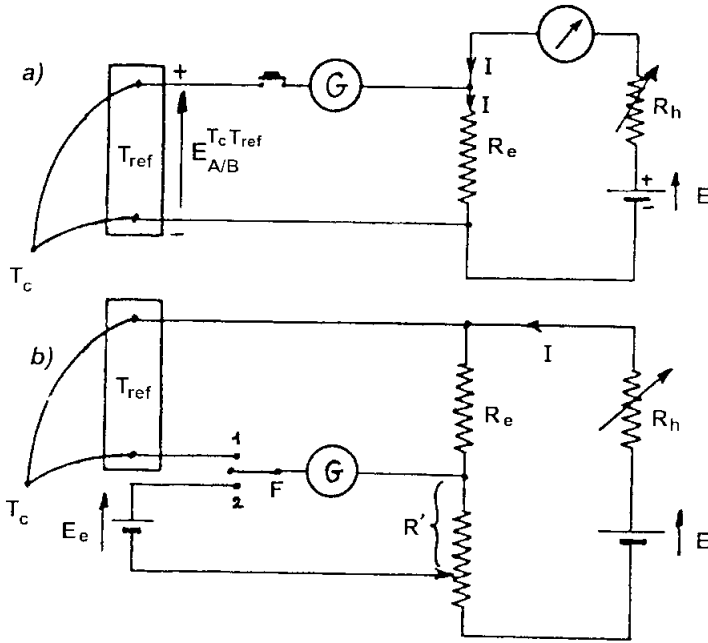
$$R_v \gg R_t + R_l \quad (3.44)$$

Trên hình 3.11 biểu diễn sơ đồ đo suất điện động bằng phương pháp xung đối.

Nguyên tắc của phương pháp xung đối là đấu với suất điện động cần đo một điện áp đối V sao cho điện áp này đúng bằng giá trị của suất điện động. Giá trị của V có thể đo được chính xác, thông thường đây là điện áp rơi trên một điện trở có dòng điện chạy qua.

Cặp nhiệt nối tiếp với một điện kế G và được đấu song song với một điện trở chuẩn R_c . Dòng điện I chạy qua điện trở R_c có thể điều chỉnh được để sao cho kim điện kế chỉ số 0 (nghĩa là dòng điện chạy qua điện kế bằng 0). Ta có:

$$E_{A/B}^{T_c T_{ref}} = R_c I \quad (3.45)$$



Hình 3.11: Đo suất điện động bằng phương pháp xung đối.

Dòng điện I có thể điều chỉnh bằng một biến trở con chạy R_h (mắc nối tiếp với nguồn điện) và được đo bằng một miliampe kế (hình 3.11a). Cũng có thể điều chỉnh và đo I nhờ một pin mẫu dấu theo sơ đồ h. 3.11b. Trong trường hợp hình 3.11b:

$$E_c = R' \cdot I \quad (3.46)$$

do đó:
$$E_{\frac{T_c T_{ref}}{A/B}} = \frac{R_c}{R'} \cdot E_c \quad (3.47)$$

3.4.4. Các loại cặp nhiệt điện thường dùng trong thực tế

Dải nhiệt độ làm việc đối với một cặp nhiệt điện thường bị hạn chế. Ở nhiệt độ thấp năng suất nhiệt điện của nó giảm đi. Ở nhiệt độ cao cặp nhiệt có thể bị nhiễm bẩn do môi trường đo hoặc xảy ra hiện tượng bay hơi một trong các chất thành phần của hợp kim làm cặp nhiệt, hoặc là bị tăng kích thước hạt tinh thể dẫn đến làm tăng độ dòn cơ học, thậm chí có thể bị nóng chảy. Bảng dưới đây liệt kê một số loại cặp nhiệt điện thường gặp trong thực tế.

Bảng 3.3

Cặp nhiệt điện	Nhiệt độ làm việc, °C	E, mV	Độ chính xác
Đồng/Constantan Φ = 1,63 mm	-270 ÷ 370	- 6,258 đến 19,027	(-100 °C ÷ -40 °C): ±2% (-40 °C ÷ 100 °C): ±0,8% (100 °C ÷ 350 °C): ±0,75%
Sắt/Constantan Φ = 3,25 mm	-210 ÷ 800	-8,096 đến 45,498	(0 °C ÷ 400 °C): ±3 °C (400 °C ÷ 800 °C): ±0,75%
Chromel/Alumel Φ = 3,25 mm	-270 ÷ 1250	-5,354 đến 50,633	(0 °C ÷ 400 °C): ±3 °C (400 °C ÷ 1250 °C): ±0,75%
Chromel/Constantan Φ = 3,25 mm	-270 ÷ 870	-9,835 đến 66,473	(0 °C ÷ 400 °C): ±3 °C (400 °C ÷ 1250 °C): ±0,75%
Platin-Rodi(10%)/ Platin Φ = 0,51 mm	-50 ÷ 1500	-0,236 đến 15,576	(0 °C ÷ 600 °C): ±2,5% (600 °C ÷ 1500 °C): ±0,4%
Platin-Rodi(13%)/ Platin Φ = 0,51 mm	-50 ÷ 1500	-0,226 đến 17,445	(0 °C ÷ 538 °C): ±1,4% (538 °C ÷ 1500 °C): ±0,25%
Platin-Rodi(30%)/ Platin- Rodi(6%) Φ = 0,51 mm	0 ÷ 1700	0 đến 12,426	(870 °C ÷ 1700 °C): ±0,5%
Wonfram-Reni (5%)/ Wonfram-Reni (26%)	0 ÷ 2700	0 đến 38,45	

Để đảm bảo độ ổn định của suất điện động, phải ấn định nhiệt độ sử dụng cao nhất cho cặp nhiệt có tính đến các điều kiện thực tế. Dây càng nhỏ thì nhiệt độ cực đại càng thấp. Bảng 3.4 trình bày một thí dụ cho trường hợp cặp nhiệt Chromel/Constantan.

Bảng 3.4

Đường kính dây, mm	3,25	1,63	0,81	0,33
Nhiệt độ cực đại, °C	870	650	540	430

3.5. Đo nhiệt độ bằng diot và tranzito

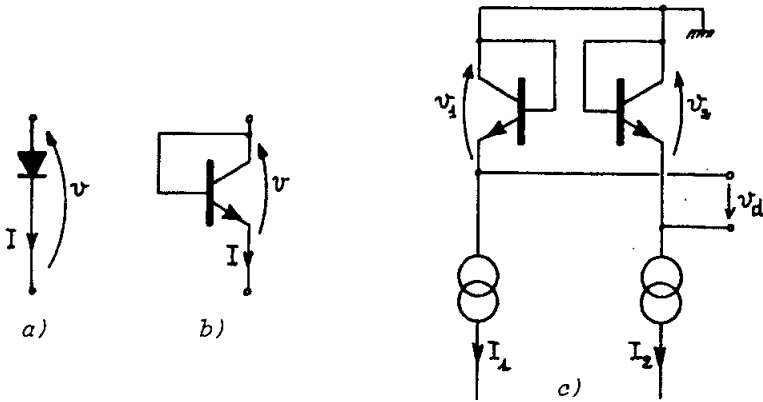
3.5.1. Đặc điểm chung - độ nhạy nhiệt

Có thể đo nhiệt độ bằng cách sử dụng linh kiện nhạy cảm là diot hoặc tranzito mắc theo kiểu diot (nối B với C) phân cực thuận với I không đổi (h. 3.12). Điện áp giữa hai cực sẽ là hàm của nhiệt độ.

Độ nhạy nhiệt của diot hoặc của tranzito mắc theo kiểu diot xác định bởi biểu thức:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (3.48)$$

Giá trị của độ nhạy nhiệt cỡ $-2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Ngoài ra, cũng giống như đối với điện áp V , độ nhạy nhiệt có thể phụ thuộc vào dòng ngược I_0 . Dòng này có thể thay đổi rất khác nhau đối với các linh kiện khác nhau, do vậy nên chọn



Hình 3.12: Các linh kiện sử dụng làm cảm biến nhiệt độ:
a) diot, b) tranzito mắc theo kiểu diot, c) cặp tranzito mắc theo kiểu diot.

các linh kiện có các đặc trưng tương tự (đối với một giá trị dòng cho trước phải có cùng điện áp V và dòng I_0 cũng như nhau).

Để tăng độ tuyến tính và khả năng thay thế, người ta thường mắc theo sơ đồ hình 3.12c, dùng một cặp tranzito đấu theo kiểu diot mắc đối nhau với hai dòng I_1 và I_2 không đối chạy qua và đo hiệu của điện thế B-E. Bằng cách này sẽ loại trừ được ảnh hưởng của dòng ngược I_0 . Độ nhạy nhiệt trong trường hợp này được tính theo biểu thức:

$$S = \frac{d(V_1 - V_2)}{dT} \quad (3.49)$$

hoặc tính bằng số:

$$S = 86,56 \cdot \log \frac{I_1}{I_2} \quad (\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (3.50)$$

Độ nhạy nhiệt này lớn hơn nhiều so với trường hợp dùng cặp nhiệt nhưng nhỏ hơn so với trường hợp nhiệt điện trở. Điều đặc biệt là ở đây không cần nhiệt độ chuẩn.

Dải nhiệt độ làm việc bị hạn chế do sự thay đổi tính chất điện của cảm biến ở các nhiệt độ giới hạn và nằm trong khoảng $T = - 50^{\circ}\text{C} \div 150^{\circ}\text{C}$. Trong khoảng nhiệt độ này cảm biến có độ ổn định cao.

3.5.2. Quan hệ điện áp - nhiệt độ

Xét trường hợp dùng cặp tranzito Q_1 và Q_2 ở hình 3.12c. Giả sử dòng I_0 giống nhau cho hai tranzito, dòng điện chạy qua các tranzito là I_1 và I_2 , điện thế B-E tương ứng là V_1 và V_2 . Khi đó:

$$I_1 = I_0 \exp \frac{qV_1}{KT} \rightarrow V_1 = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (3.51)$$

$$I_2 = I_0 \exp \frac{qV_2}{KT} \rightarrow V_2 = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_2}{I_0} \quad (3.52)$$

Việc đo hiệu thế $V_d = V_1 - V_2$ cho phép loại trừ ảnh hưởng của dòng ngược I_0 :

$$\Rightarrow V_d = V_1 - V_2 = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{KT}{q} \ln n \quad (3.53)$$

n là tỷ số giữa hai dòng điện cố định chạy qua hai tranzito. Tính toán bằng số ta có:

$$V_d = 86,56.T \ln n \quad (3.54)$$

trong đó V_d đo bằng μV và T là nhiệt độ tuyệt đối K.

Thí dụ: với $n = 2$ $V_d = 59,73.T$

Độ nhạy nhiệt có dạng:
$$S = \frac{dV_d}{dT} = \frac{K}{q} \ln n \quad (3.55)$$

$$S = 86,56. \ln n \ (\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}). \quad (3.56)$$

Độ nhạy nhiệt nhỏ hơn so với trường hợp chỉ dùng một diot hoặc một tranzito, nhưng về nguyên tắc không phụ thuộc vào T . Độ tuyến tính trong trường hợp này được cải thiện một cách đáng kể.

CẢM BIẾN VỊ TRÍ VÀ DỊCH CHUYỂN

Ngày nay cảm biến vị trí và dịch chuyển được ứng dụng rất rộng rãi. Đó là vì việc kiểm tra vị trí và dịch chuyển đóng vai trò rất quan trọng đối với hoạt động của nhiều máy móc, công cụ. Hơn nữa, một số đại lượng vật lý có thể đo được thông qua việc xác định sự dịch chuyển của một vật chịu tác động của đại lượng vật lý đó.

Có hai phương pháp cơ bản để xác định vị trí và dịch chuyển. Trong phương pháp thứ nhất (được sử dụng nhiều hơn cả), cảm biến cung cấp một tín hiệu là hàm phụ thuộc vào vị trí của một trong những phần tử của cảm biến, đồng thời phần tử đó có liên quan với vật di động mà ta cần đo sự dịch chuyển. Sự thay đổi của tín hiệu sẽ cho biết độ dịch chuyển của vật thể. Một số cảm biến loại này có cấu tạo bao gồm một trở kháng có một trong những đặc trưng hình học hoặc kích thước thay đổi theo vị trí của phần tử động như: điện thế kế, cuộn cảm có lõi động v.v... Trong phương pháp thứ hai (ít ứng dụng hơn), ứng với một dịch chuyển cơ bản (một đơn vị dịch chuyển), cảm biến sẽ phát ra một xung. Khi đó vị trí và dịch chuyển được xác định bằng cách đếm số xung phát ra.

Một số loại cảm biến không đòi hỏi liên kết cơ học giữa cảm biến và vật cần đo khoảng cách hoặc dịch chuyển. Mối liên hệ giữa vật dịch chuyển với cảm biến thực hiện thông qua vai trò trung gian của điện trường, điện từ trường hoặc điện trường tĩnh điện. Độ lớn của đại lượng trung gian là hàm của khoảng cách giữa vật thể và cảm biến và được xác định bằng phản hồi điện của cảm biến.

Trong chương này sẽ trình bày các loại cảm biến thông dụng dùng để xác định vị trí và dịch chuyển của vật như điện thế kế điện trở, cảm biến cảm ứng.

4.1. Điện thế kế điện trở

Loại cảm biến này có nguyên lý đơn giản, giá cả vừa phải, tín hiệu đo lớn và không đòi hỏi mạch điện đặc biệt để xử lý tín hiệu.

Tuy nhiên sử dụng loại điện thế kế điện trở có sự cọ xát gây tiếng ồn, bị mài mòn, số lần sử dụng hạn chế và chịu ảnh hưởng của môi trường (bụi, ẩm).

4.1.1. Cấu tạo của cảm biến

4.1.1.1. Các dạng hình học

Điện kế gồm một điện trở cố định R_n , trên đó có một tiếp xúc điện có thể di chuyển gọi là con chạy. Con chạy này được gắn cơ học với vật chuyển động cần nghiên cứu (nhưng hoàn toàn cách điện với nhau). Giá trị của điện trở đo giữa con chạy và một đầu của điện trở R_n là hàm phụ thuộc vào vị trí của con chạy (cũng chính là vị trí của vật chuyển động). Mặt khác nó cũng phụ thuộc vào bản thân điện trở R_n . Nếu điện trở R_n được chế tạo đồng đều thì điện kế sẽ tuyến tính và R tỷ lệ với vị trí của con chạy.

Phụ thuộc vào dạng hình học của R_n và dạng chuyển động của con chạy, người ta phân biệt hai loại điện thế kế:

- Điện thế kế dịch chuyển thẳng (h. 4.1a):

$$R(\ell) = \frac{\ell}{L} R_n \quad (4.1)$$

- Điện thế kế dịch chuyển tròn:

$$R(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_M} R_n \quad (4.2)$$

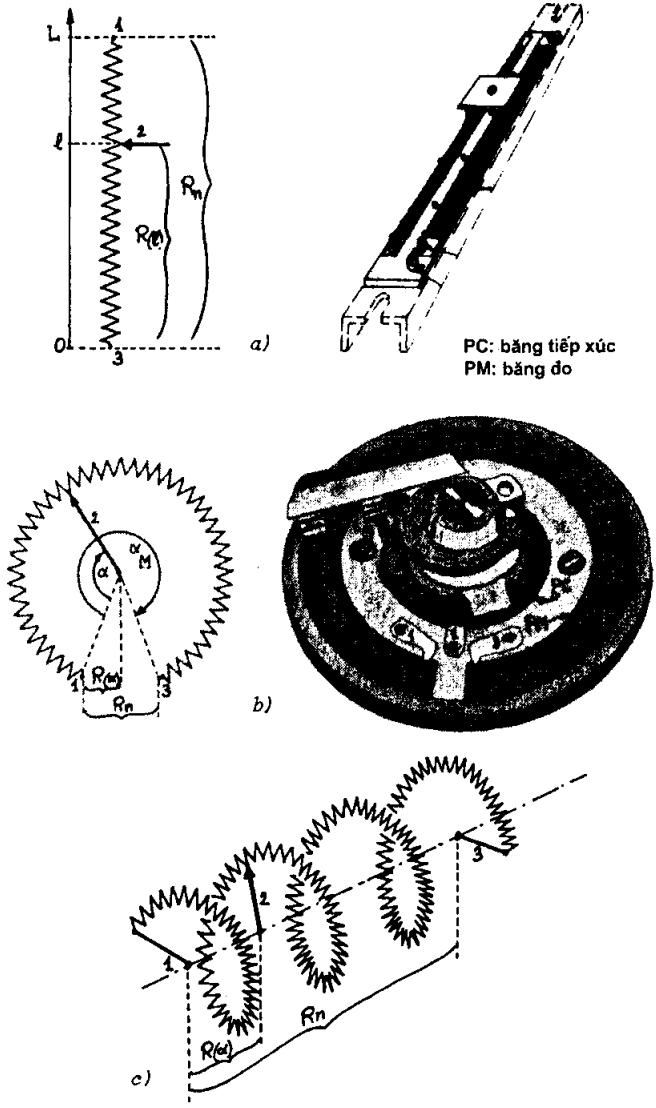
Đối với điện thế kế dịch chuyển tròn $\alpha_M < 360^\circ$ (h. 4.1b), còn đối với điện kế xoắn $\alpha_M > 360^\circ$ (h.4.1c).

Sau đây sẽ xác định một cách tổng quát độ dịch chuyển của con chạy theo x (phụ thuộc ℓ hoặc α) và giá trị X lớn nhất của nó (L, α_M).

4.1.1.2. Điện trở

Các điện trở có thể tồn tại ở dạng cuộn dây hoặc băng dẫn. Điện trở dạng cuộn dây phải không bị mài mòn, đồng thời hệ số nhiệt α_R của điện trở phải nhỏ và ổn định. Các hợp kim thông dụng dùng làm điện trở là Ni-Cr, Ni-Cu,

Ni-Cr-Fe, Ag-Pd. Các dây dẫn này được cuốn trên lõi cách điện (bằng thủy tinh, gốm, nhựa), còn bản thân dây thì được cách điện bằng êmay hoặc bằng một lớp ôxít trên bề mặt.



Hình 4.1: Các dạng điện thế kế:
a) điện kế dịch chuyển thẳng; b) điện kế dịch chuyển tròn; c) điện kế dịch chuyển xoắn.

Các điện trở dạng băng dẫn được chế tạo bằng chất dẻo trộn bột dẫn điện là carbon hoặc kim loại có kích thước hạt cỡ $\sim 10^{-2}\mu\text{m}$. Các hạt sắp xếp không sát nhau nên cấu trúc được coi là không liên tục do đó độ phân giải bị hạn chế.

Các điện trở thường được chế tạo với các giá trị R_n nằm trong khoảng từ 1 k Ω đến 100k Ω , đôi khi có thể đạt tới M Ω . Tùy từng trường hợp cụ thể, độ chính xác của điện trở có thể là 20%, 10% và đôi khi đạt tới 5%. Trên thực tế không đòi hỏi độ chính xác cao vì tín hiệu đo chỉ phụ thuộc vào tỷ số $R(x)/R_n$.

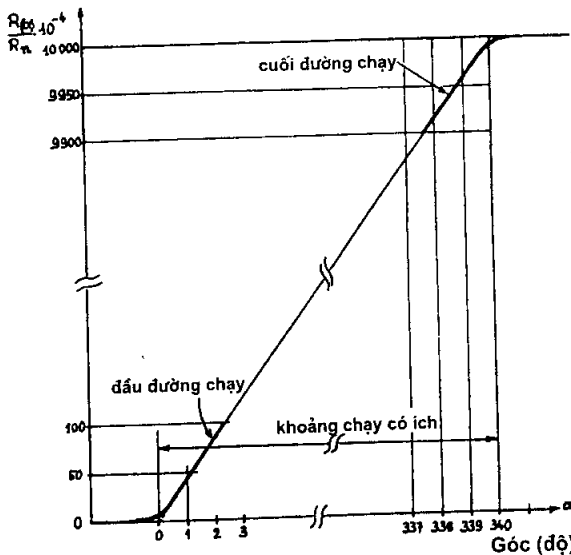
4.1.1.3. Con chạy

Con chạy phải đảm bảo tiếp xúc điện tốt, nghĩa là không gây nên suất điện động tiếp xúc, điện trở tiếp xúc phải nhỏ và ổn định. Ngoài ra phải đảm bảo các tiêu chuẩn trên trong điều kiện có dao động và tốc độ dịch chuyển lớn.

4.1.2. Các đặc trưng

Khoảng chạy có ích của con chạy

Các giá trị của tỷ số $R(x)/R_n$ ở hai đầu của điện trở không ổn định vì thường bị bất định ở cuối đường chạy của con trở hoặc do các chỗ nối mạch điện với nguồn nuôi. Khoảng chạy có ích là khoảng thay đổi của x mà trong khoảng đó $R(x)$ là hàm tuyến tính của dịch chuyển (h. 4.2).



Hình 4.2: Sự thay đổi của tỷ số điện kế phụ thuộc vào vị trí của con chạy.

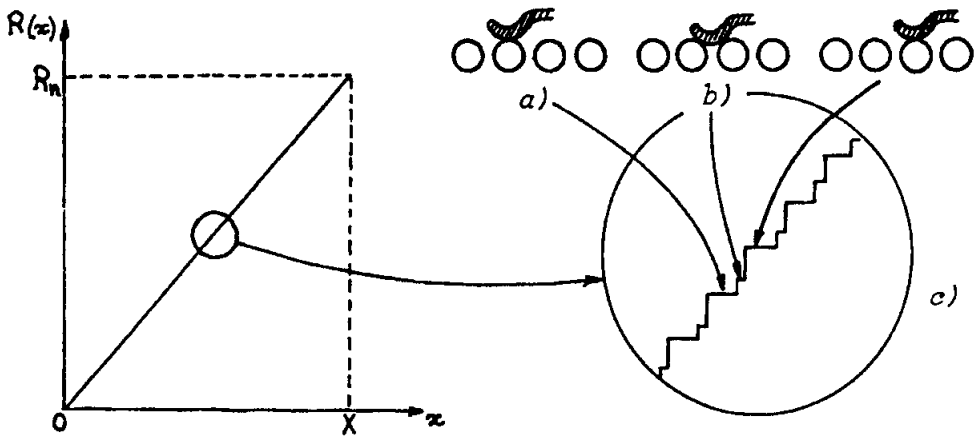
Năng suất phân giải

Các điện trở dạng băng dẫn có năng suất phân giải cao nhất. Năng suất phân giải này bị hạn chế bởi kích thước hạt. Thông thường nó đạt tới giá trị cỡ $0,1 \mu\text{m}$.

Trường hợp điện kế dạng điện trở dây cuốn gồm n vòng dây, có thể phân biệt $2n-2$ vị trí khác nhau về điện của con chạy:

- n vị trí khi con chạy chỉ tiếp xúc với một vòng dây,
- $n-2$ vị trí khi con chạy tiếp xúc đồng thời với hai vòng dây.

Điện thế sẽ thay đổi một cách liên tục khi di chuyển từ vị trí này sang vị trí khác (h. 4.3). Chính vì vậy sự dịch chuyển cực đại cần thiết để đưa con chạy từ một vị trí sang vị trí lân cận tiếp theo sẽ xác định độ phân giải của điện kế. Độ chính xác này phụ thuộc vào hình dáng và đường kính của dây điện trở, thường đạt $\sim 10 \mu\text{m}$.



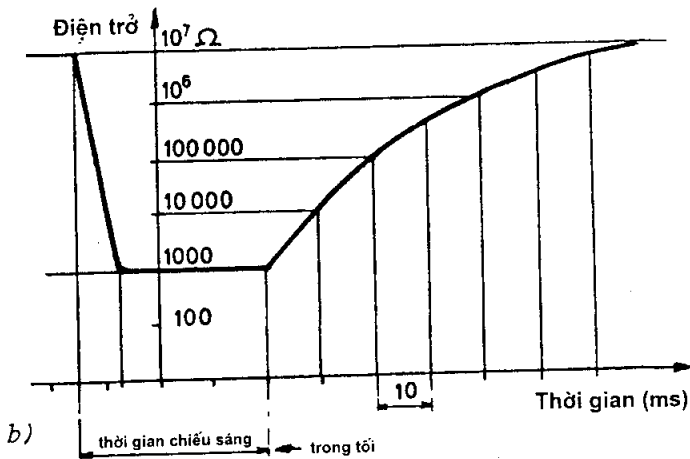
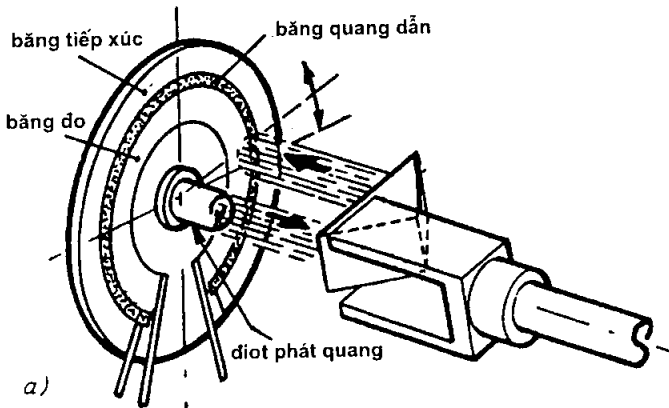
Hình 4.3: Độ phân giải của điện kế dạng cuộn dây.

Thời gian sống

Do có cọ xát giữa con chạy và dây dẫn (hoặc băng dẫn) nên xảy ra sự mài mòn con chạy và điện trở. Đây là nguyên nhân làm hạn chế thời gian sử dụng của dụng cụ. Ngoài ra chế độ sử dụng cũng ảnh hưởng tới thời gian sống của dụng cụ. Theo thống kê, số lần sử dụng của điện kế dạng dây cuốn là 10^6 lần và của điện kế dạng băng dẫn là $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ lần.

4.1.3. Điện thế kế không dùng con chạy cơ học

Những nhược điểm cơ bản của điện thế kế dùng con chạy cơ học là sự cọ xát, tiếng ồn và mất tiếp xúc. Chúng có thể được khắc phục bằng cách sử dụng liên kết quang hoặc từ.

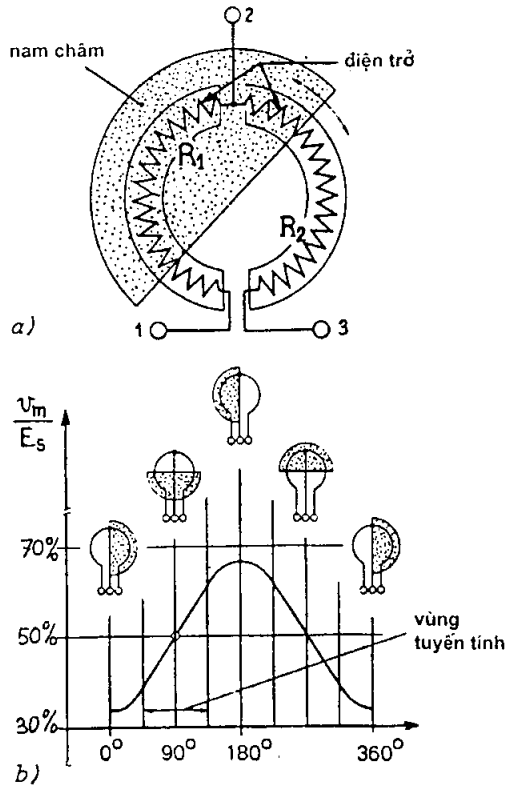


Hình 4.4: Điện thế kế quay dùng con trở quang:

- a)- sơ đồ nguyên lý,
- b)- sự thay đổi của điện trở của vùng quang dẫn dưới tác dụng của hiệu ứng chiếu sáng đột ngột.

Điện thế kế tròn dùng con trở quang có cấu tạo gồm diode phát quang, băng tiếp xúc, băng đo và băng quang dẫn. Băng điện trở đo được phân cách với băng dẫn tiếp xúc bởi một băng quang dẫn rất mỏng (làm bằng CdSe) trên đó có con trở quang dịch chuyển khi trục của điện thế quay (h. 4.4a).

Điện trở của vùng quang dẫn giảm đáng kể trong khu vực được chiếu sáng tạo lên sự liên kết giữa băng đo và băng tiếp xúc. Thời gian đáp ứng của vật liệu quang dẫn (cỡ vài chục ms) quyết định tần số dịch chuyển cực đại của con trở quang (h. 4.4b).



Hình 4.5: Điện thế kế từ: a) sơ đồ nguyên lý, b) đáp ứng điện phụ thuộc vào góc quay,

Điện thế kế từ bao gồm hai từ điện trở R_1 và R_2 mắc nối tiếp (h. 4.5a). Một nam châm vĩnh cửu được gắn với trục quay của điện thế kế sẽ bao phủ một phần của điện trở R_1 và R_2 , phân bố bao phủ này thay đổi theo vị trí góc của trục. Trường cảm ứng từ của nam châm gây nên sự thay đổi đáng kể của điện trở ở những phần của R_1 và R_2 bị ảnh hưởng.

Điện áp nguồn E_s được đặt giữa hai điểm 1 và 3, điện áp đo V_m lấy từ điểm chung (điểm 2) và một trong hai đầu (1 hoặc 3). Biểu thức của điện áp đo được viết dưới dạng:

$$V_m = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_S = \frac{R_1}{R_2} E_S \quad (4.3)$$

trong đó R_1 là hàm phụ thuộc vào vị trí góc của trục quay, vị trí này xác định phần của R_1 chịu ảnh hưởng của từ trường, $R = R_1 + R_2$ là hằng số.

Điện áp đo chỉ tuyến tính trong một khoảng 90° đối với điện kế quay và vài mm đối với điện kế dịch chuyển thẳng (h. 4.5b).

4.2. Cảm biến cảm ứng

4.2.1. Nguyên lý và tính chất

Trong các cảm biến cảm ứng đo vị trí và dịch chuyển, vật cần đo vị trí được gắn vào một phần tử của mạch từ gây nên sự biến thiên từ thông trong cuộn đo. Nếu phần tử động là một lõi sắt từ và dịch chuyển dạng tịnh tiến hoặc quay thì sự dịch chuyển có thể nhận biết dễ dàng thông qua sự thay đổi hệ số tự cảm của cuộn dây hoặc thông qua sự thay đổi của mối liên hệ giữa cuộn sơ cấp và thứ cấp của một biến thế (gây nên sự thay đổi điện áp giữa hai đầu của cuộn thứ cấp).

Nếu phần tử động là một cuộn dây quay tương đối với một cuộn khác cố định, (cuộn thứ nhất là cuộn cảm, cuộn thứ hai là cuộn ứng) thì sự dịch chuyển dạng quay có thể nhận biết thông qua điện áp của cuộn ứng, điện áp này thay đổi theo góc quay.

Thông thường sự thay đổi của hệ số tự cảm L và hệ số cảm ứng M phụ thuộc vào sự dịch chuyển của lõi sắt từ. Sự phụ thuộc này không phải là tuyến tính. Để khắc phục người ta kết hợp hai cuộn dây đối nhau để sao cho với cùng một dịch chuyển thì hệ số L hoặc M biến thiên theo chiều ngược nhau. Như vậy sự không tuyến tính của hai cuộn dây sẽ triệt tiêu nhau.

Các cảm biến cảm ứng được mắc trong mạch có điện áp nguồn dạng hình sin ($E_s \cos \omega_s t$). Điện áp đo V_m (do biến điệu biên độ điện áp nuôi gây nên bởi sự dịch chuyển $x(t)$) được biểu diễn bằng biểu thức:

$$V_m = k \cdot x(t) \cdot E_s \cos(\omega_s t + \phi) \quad (4.4)$$

Như vậy độ dịch chuyển $x(t)$ phụ thuộc vào sự thay đổi của biên độ.

Các cảm biến cảm ứng nhạy với từ trường ký sinh cho nên phải đặt chúng trong vỏ bọc chắn từ trường.

4.2.2. Tự cảm biến thiên

Hệ số tự cảm L của một cuộn dây có N vòng là hàm của từ trở của mạch và được biểu diễn bởi biểu thức:

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (4.5)$$

trong đó:

$$R = \int \frac{dl}{\mu S} \quad (4.6)$$

với μ là độ từ thẩm, S là tiết diện mạch từ.

Khi mạch từ có khoảng cách giữa các lõi sắt khác nhau với tiết diện không đổi:

$$R = \frac{\ell_f}{\mu_0 \mu_f S_f} + \frac{\ell_0}{\mu_0 S_0} \quad (4.7)$$

ℓ_f và ℓ_0 là chiều dài trung bình của một đường sức trong vật liệu sắt từ và trong không khí, S_f và S_0 là tiết diện ngang của mạch từ và của khoảng giữa các lõi từ, μ_f là độ từ thẩm tương đối của vật liệu sắt từ (khoảng 10^3 - 10^4) và $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

4.2.2.1. Mạch từ có khe từ biến thiên

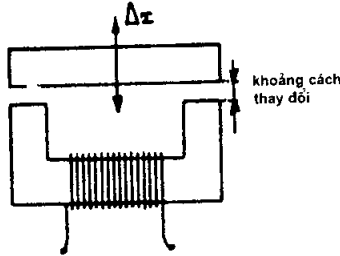
Mạch từ có khe từ (khoảng cách giữa các lõi sắt) biến thiên được biểu diễn trên hình 4.6. Từ công thức tổng quát có thể tìm được biểu thức cho hệ số tự cảm trong trường hợp này:

$$L = \mu_0 N^2 s \frac{1}{\ell_0 + \frac{\ell_f}{\mu_f}} \quad (4.8)$$

Độ cảm ứng phải nhạy với sự thay đổi của khoảng cách giữa các lõi sắt. Vì thế cần phải chọn $\ell_0 \gg \ell_f / \mu_f$. Khi đó biểu thức của L có dạng:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 s}{\ell_0} \quad (4.9)$$

Sự dịch chuyển Δx (xem hình vẽ) kéo theo sự thay đổi $\Delta \ell_0 = 2\Delta x$ của khe từ (giữa các lõi), khi đó hệ số tự cảm sẽ có giá trị mới:



Hình 4.6: Sơ đồ nguyên lý cảm biến sử dụng mạch từ có khoảng cách giữa các lõi sắt biến thiên.

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 s}{\ell_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0}} \quad (4.10)$$

nghĩa là

$$\Delta L = \frac{-2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \frac{\Delta x}{1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0}} \quad (4.11)$$

và

$$\frac{\Delta L}{L} = -2 \frac{\Delta x}{\ell_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0}} \quad (4.12)$$

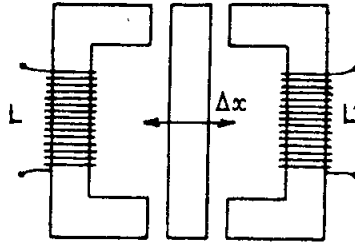
Nếu $\Delta x \ll \ell_0$ sẽ nhận được:

$$\Delta L = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \Delta x \left[1 - \frac{2\Delta x}{\ell_0} + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.13)$$

và độ nhạy S được biểu diễn bởi công thức:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x} = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \left[1 - \frac{2\Delta x}{\ell_0} + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.14)$$

Để tăng độ nhạy và độ tuyến tính của cảm biến người ta kết hợp hai mạch từ như biểu diễn trên hình 4.7.



Hình 4.7: Kết hợp hai mạch từ đối nhau.

Sự thay đổi của hệ số tự cảm của cuộn thứ hai được biểu diễn bằng công thức:

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \frac{\Delta x}{1 - \frac{2\Delta x}{\ell_0}} \quad (4.15)$$

Giả sử $\Delta x \ll \ell_0$, khi đó:

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \Delta x \left[1 + \frac{2\Delta x}{\ell_0} + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.16)$$

Trong trường hợp này hệ số tự cảm L và L' đặt trên hai nhánh của cùng một cầu, điện thế cân bằng của cầu tỷ lệ với hiệu $\Delta L' - \Delta L$, nghĩa là:

$$\Delta L' - \Delta L = \frac{4\mu_0 N^2 s}{\ell_0^2} \cdot \Delta x \left[1 + \left(\frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.17)$$

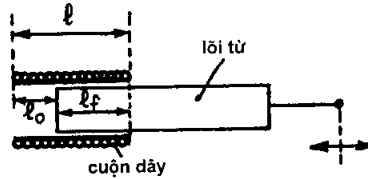
Độ nhạy của cấu trúc này tăng lên hai lần, đặc biệt sự không tuyến tính giảm xuống đáng kể.

4.2.2.2. Cuộn dây có lõi từ

Cuộn dây với độ dài ℓ gồm N vòng dây bên trong có lõi sắt từ được biểu diễn trên hình 4.8. Phần của lõi nằm trong cuộn dây có độ dài ℓ_f thay đổi. Hệ số tự cảm L của cuộn dây phụ thuộc vào chiều dài ℓ_f của lõi từ. Biểu thức của L có dạng:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{\rho^2} \left\{ s_0 \ell + (\mu_r - 1) s_f \ell_f + 2k \sqrt{s_0 [s_0 + (\mu_r - 1) s_f]} \cdot \sqrt{(\ell - \ell_f) \ell_f} \right\} \quad (4.18)$$

trong đó k là hệ số ghép nối và có giá trị nằm trong khoảng 0÷1.



Hình 4.8: Cuộn dây có lõi từ.

Dịch chuyển $\Delta \ell_f$ của lõi từ kéo theo sự thay đổi ΔL của độ tự cảm. Độ tự cảm phụ thuộc vào ℓ_f và là hàm không tuyến tính của $\Delta \ell_f$. Sự không tuyến tính này cũng có thể cải thiện bằng cách ghép hai cuộn dây đồng dạng vào thành hai nhánh kề sát nhau của một cấu điện trở có chung cùng một lõi sắt.

4.2.3. Biến thế vi sai

Biến thế vi sai bao gồm một cuộn sơ cấp và hai cuộn thứ cấp mắc đối xứng so với cuộn sơ cấp. Cuộn sơ cấp được nuôi bằng một suất điện động hình sin:

$$e_1 = E_1 \cos \omega t \quad (4.19)$$

Sự dịch chuyển của lõi sắt từ làm thay đổi mối quan hệ giữa cuộn sơ cấp với từng cuộn thứ cấp (h. 4.9).

Các cuộn thứ cấp được nối ngược với nhau sao cho suất điện động xuất hiện trong chúng (do tương tác với cuộn sơ cấp) triệt tiêu nhau. Các phương trình của mạch sơ cấp và thứ cấp tương ứng như sau:

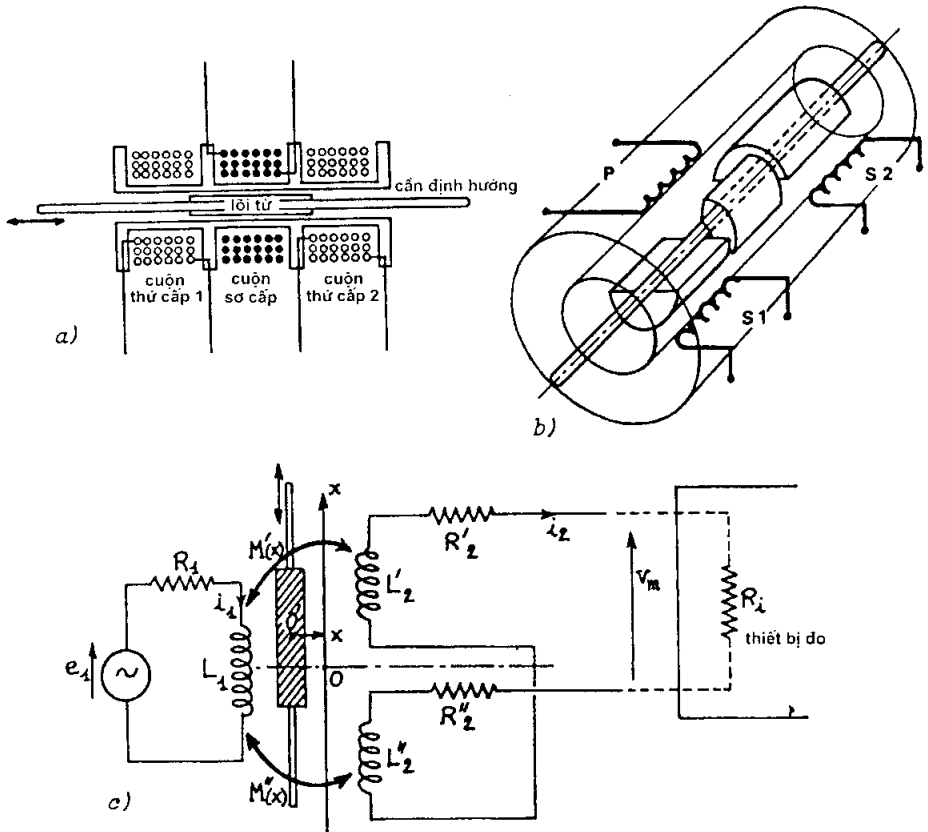
$$e_1 = (R_1 + jL_1 \omega) i_1 + j \{M'(x) - M''(x)\} \omega i_2 \quad (4.20)$$

$$\{R_2' + R_2'' + R_1 + j\omega(L_2' + L_2'')\} i_2 + j\omega \{M'(x) - M''(x)\} i_1 = 0 \quad (4.21)$$

Từ đây có thể tính điện áp đo ở hai đầu cuộn thứ cấp ($V_m = R_1 \cdot i_2$):

$$V_m = \frac{j\omega R_1 \{M'(x) - M''(x)\} e_1}{R_1(R_2 + R_1) + j\omega \{L_2 R_1 + L_1(R_2 + R_1)\} - \omega^2 \{L_1 L_2 + [M'(x) - M''(x)]^2\}} \quad (4.22)$$

trong đó $L_2 = L_2' + L_2''$ và $R_2 = R_2' + R_2''$, M' và M'' là các hệ số cảm ứng tương hỗ.



Hình 4.9: Nguyên lý cấu tạo của cảm biến biến thế vi sai:
 a) dạng dịch chuyển thẳng; b) dạng dịch chuyển quay tròn.
 c) sơ đồ mạch điện tương đương.

Về nguyên tắc, $V_m = 0$ khi $x = 0$ bởi vì lõi từ ở vị trí trung gian và giống nhau đối với từng cuộn thứ cấp.

Trường hợp R_i lớn ($> 50 \text{ K}\Omega$), V_m tỷ lệ tuyến tính với $M''(x) - M'(x)$ và không phụ thuộc vào R_i :

$$V_m = \frac{j\omega \{M''(x) - M'(x)\}}{R_i + jL_1\omega} e_1 \quad (4.23)$$

4.3. Cảm biến tụ điện

4.3.1. Nguyên lý và các đặc trưng

Cảm biến tụ điện gồm một tụ điện phẳng hoặc tụ điện hình trụ có một bản cực có thể di chuyển và được nối cứng với dịch chuyển cần đo. Khi bản cực của tụ điện dịch chuyển sẽ kéo theo sự thay đổi điện dung của tụ.

Điện dung của tụ điện phẳng được biểu diễn bằng công thức:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{D} \quad (4.24)$$

trong đó: A - diện tích nằm giữa hai bản cực,
 D - khoảng cách giữa hai bản cực,
 ϵ_r - hằng số điện môi của môi trường,
 ϵ_0 - hằng số điện môi của chân không.

Trường hợp tụ hình trụ:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0\ell}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.25)$$

trong đó ℓ là chiều sâu mà trụ trong chui vào trụ ngoài, r_1 và r_2 là bán kính của trụ trong và trụ ngoài.

Tụ điện phẳng có thể thay đổi A và cố định D hoặc cố định A và thay đổi D (theo chiều vuông góc với bản cực). Tụ điện hình trụ chỉ có thể thay đổi r .

Các cảm biến tụ điện có đặc điểm là dễ chế tạo, độ bền và độ tin cậy cao, thường dùng điện môi là không khí.

Mỗi cảm biến tụ điện đều được đặc trưng bởi độ nhạy tính theo điện dung hoặc theo trở kháng và độ nhạy tương đối:

- Độ nhạy điện dung: $S_C = \Delta C / \Delta x$
- Độ nhạy trở kháng: $S_Z = \Delta Z / \Delta x$
- Độ nhạy tương đối: $S_r = \Delta C / (C \cdot \Delta x) = -\Delta Z / (Z \cdot \Delta x)$

Thí dụ, nếu độ nhạy điện dung S_C không đổi thì nên chọn sơ đồ sao cho điện áp ra V_m thay đổi giống như ΔC :

$$V_m = k \cdot \Delta C = k \cdot S_C \cdot \Delta x \quad (4.26)$$

trong đó k là hệ số đặc trưng cho sơ đồ được sử dụng.

Ngược lại, nếu S_z không đổi thì nên chọn sơ đồ sao cho:

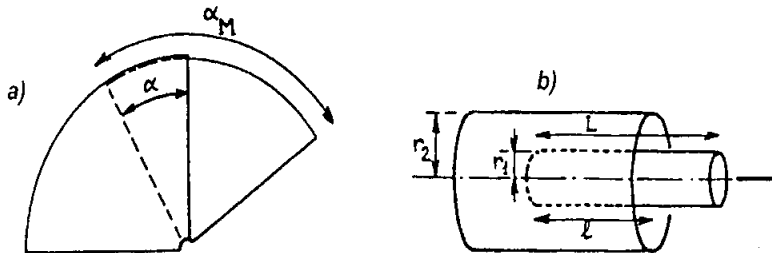
$$V_m = k \cdot \Delta Z = k \cdot S_z \cdot \Delta x \quad (4.27)$$

4.3.2. Tự điện có diện tích bản cực biến thiên

4.3.2.1. Tự đơn

Tự đơn có diện tích biến thiên thường là tự điện phẳng với một bản cực quay (h. 4.10a) hoặc tự điện dạng ống có bản cực dịch chuyển dọc theo trục (h. 4.10b).

Trong cả hai trường hợp điện dung thay đổi tuyến tính theo dịch chuyển x :
 $C(x) = K \cdot x$



Hình 4.10: Nguyên tắc cấu tạo của cảm biến tự điện đơn có diện tích thay đổi:
 a) dịch chuyển quay, b) dịch chuyển thẳng.

Đối với tự quay:
$$K = \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{360 \cdot D} \quad (4.28)$$

$x = \alpha$ [độ].

Đối với tự ống:
$$K = \frac{2\pi\epsilon_0}{\text{Log}(r_2/r_1)} \quad (2.29)$$

$x = l$ [m]

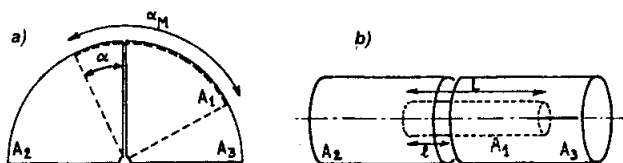
Độ nhạy của cảm biến tự điện không đổi $S_c = K$, nhưng trở kháng là hàm không tuyến tính của x :

$$S_z = -\frac{1}{K\omega} \cdot \frac{1}{x^2} \quad (4.30)$$

Độ nhạy tương đối $S_r = 1/x$. Các độ nhạy S_z và S_r càng lớn khi x càng nhỏ, nhưng cũng trong trường hợp này, với cùng một dịch chuyển dx sự không tuyến tính thể hiện rõ ràng hơn.

4.3.2.2. Tụ kép vi sai

Tụ kép vi sai biểu diễn trên hình 4.11. Bản cực di động A_1 di chuyển giữa hai bản cực cố định A_2, A_3 tạo thành cùng với hai bản cực này hai điện dung C_{21} và C_{31} biến thiên ngược chiều nhau phụ thuộc vào sự dịch chuyển x .



Hình 4.11: Tụ kép vi sai: a) dịch chuyển quay; b) dịch chuyển thẳng.

Vị trí gốc của bản cực di động là vị trí mà bản cực này nằm đối xứng với hai bản cực cố định khi hai điện dung có giá trị bằng nhau, $C_{21} = C_{31}$.

Phụ thuộc vào K và x (như đã xác định ở mục trước) và vào giá trị cực đại của dịch chuyển X , biểu thức của tụ điện được viết như sau:

$$C_{21} = K(X+x) = KX (1+x/X) = C_0(1+x/X) \quad (4.31)$$

$$C_{31} = K(X-x) = KX (1-x/X) = C_0(1-x/X) \quad (4.32)$$

trong đó $C_0 = KX$ với:

$X = L/2$, L là chiều dài của bản cực di động trong trường hợp tụ điện hình trụ;

$X = \alpha_M/2$, α_M là góc ở tâm của bản cực di động trong trường hợp tụ điện quay.

Bằng cách lựa chọn phương pháp đo hợp lý, có thể đạt được các tỷ số điện áp sau đây phụ thuộc tuyến tính vào dịch chuyển:

$$\frac{Z_{31}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{X}\right) \quad (4.33)$$

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{X}\right) \quad (4.34)$$

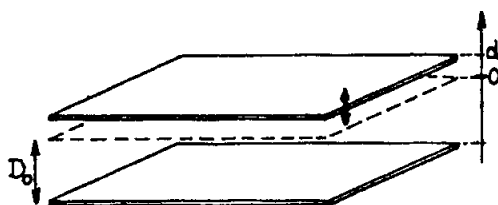
4.3.3. Tụ điện có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên

Đây là loại tụ điện phẳng dùng để đo dịch chuyển thẳng. Tụ điện loại này có thể là tụ đơn chỉ gồm hai bản cực, hoặc là tụ kép cấu tạo từ ba bản cực.

4.3.3.1. Tụ đơn

Tụ điện đơn có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên được biểu diễn trên hình 4.12. Gọi d là dịch chuyển của bản cực động so với khoảng cách gốc ban đầu D_0 , khi đó điện dung của tụ được biểu diễn bởi biểu thức:

$$C(d) = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 + d} \quad (4.35)$$



Hình 4.12: Tụ điện đơn có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên.

Độ nhạy của cảm biến được biểu diễn bằng các biểu thức:

$$S_c = - \frac{\epsilon_0 A}{(D_0 + d)^2} \quad (4.36)$$

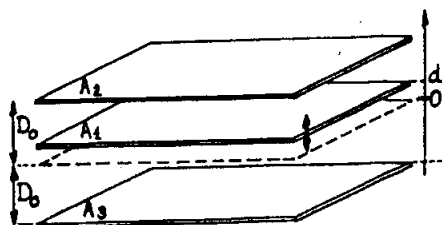
$$S_z = \frac{1}{\epsilon_0 A \omega} \quad (4.37)$$

Trong trường hợp này trở kháng biến thiên tuyến tính theo dịch chuyển. Độ nhạy điện dung lớn khi D_0 nhỏ và S_c coi như không đổi khi $d \ll D_0$. Độ nhạy S_c của tụ có khoảng cách biến thiên lớn hơn rất nhiều so với S_c của tụ có diện tích biến thiên.

Về giới hạn đo, tụ có khoảng cách biến thiên đo được những dịch chuyển nhỏ hơn 1mm ($d < 1 \text{ mm}$), trong khi đó tụ có diện tích biến thiên chỉ đo những dịch chuyển lớn hơn 1 cm ($x > 1 \text{ cm}$).

4.3.3.2. Tụ kép vi sai

Tụ điện kép vi sai có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên biểu diễn trên hình 4.13. Trong trường hợp tụ điện kép vi sai, bản cực A_1 dịch chuyển vuông góc với mặt phẳng của nó giữa hai bản cực cố định A_2 và A_3 .



Hình 4.13: Tụ điện kép vi sai có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên.

Gọi d là dịch chuyển của bản cực di động so với khoảng cách gốc ban đầu D_0 khi nó ở vị trí cách đều hai bản cực cố định, khi đó điện dung của các tụ được biểu diễn bởi biểu thức:

$$C_{21} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 - d} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0} \frac{1}{1 - d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 - d/D_0} \quad (4.38)$$

$$C_{31} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 + d} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0} \frac{1}{1 + d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 + d/D_0} \quad (4.39)$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{D_0} \quad (4.40)$$

Tương tự như trường hợp tụ điện vi sai có diện tích thay đổi, ưu điểm của tụ điện kép vi sai có khoảng cách giữa các bản cực biến thiên là tỷ số điện áp phụ thuộc tuyến tính vào dịch chuyển:

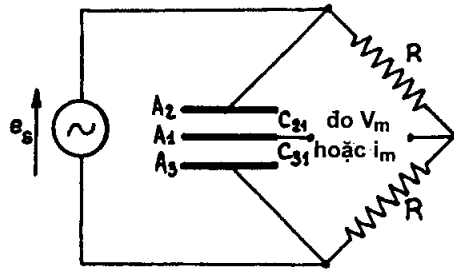
$$\frac{Z_{31}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{21}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d}{D_0}\right) \quad (4.41)$$

$$\frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{31}} = \frac{C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_0}\right) \quad (4.42)$$

4.3.4. Phương pháp đo độ biến thiên điện dung

4.3.4.1. Cầu Sauty và tụ vi sai

Trên hình 4.14 biểu diễn sơ đồ nguyên lý cầu Sauty và tụ vi sai dùng để đo điện áp không cân bằng. Do cấu trúc mạch điện nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của các tụ ký sinh cùng với sự thay đổi của chúng. Do vậy điện áp cần đo sẽ được tính bằng biểu thức:



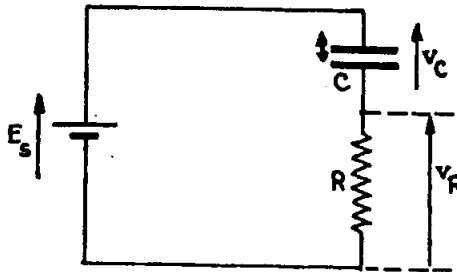
Hình 4.14: Cầu Sauty và tụ điện kép vi sai.

$$V_m = \frac{e_s}{2} \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}} \quad (4.43)$$

Trong cả hai trường hợp dùng tụ điện điện tích thay đổi hoặc tụ điện có khoảng cách giữa các bản cực thay đổi, điện áp đo V_m tỉ lệ tuyến tính với dịch chuyển.

4.3.4.2. Sơ đồ R-C chế độ động

Khi độ dịch chuyển cần đo thay đổi nhanh, có thể dùng sơ đồ đo thể gồm một điện trở R cố định mắc nối tiếp với một tụ điện C biến thiên và sử dụng nguồn nuôi một chiều (h. 4.15).



Hình 4.15: Đo dịch chuyển bằng mạch điện thế gồm điện trở và cảm biến tụ điện

Xét trường hợp điện dung của tụ thay đổi theo hàm sin xung quanh một giá trị cố định C_0 :

$$C = C_0 + C_1 \sin \omega t \quad (4.44)$$

Theo sơ đồ mạch, ta có:

$$V_C + V_R = E_s \quad (4.45)$$

trong đó $V_R = R \cdot i$ và $V_C = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$.

Nếu trong mạch sử dụng tụ điện có khoảng cách giữa các bản cực thay đổi, và giả sử biên độ dịch chuyển d_1 nhỏ so với D_0 :

$$D = D_0 + d_1 \sin \omega t \quad (4.46)$$

khi đó:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 + d_1 \sin \omega t} = C_0 \left(1 - \frac{d_1}{D_0} \sin \omega t\right) \quad (4.47)$$

nghĩa là
$$\frac{C_1}{C_0} = - \frac{d_1}{D_0} \quad (4.48)$$

và
$$V_R = - E_s \frac{d_1}{D_0} \sin \omega t \quad (4.49)$$

Như vậy có thể thấy rằng, ở mọi thời điểm biên độ của điện áp tỷ lệ với dịch chuyển $d = d_1 \sin \omega t$.

4.4. Cảm biến truyền sóng đàn hồi

4.4.1. Nguyên tắc đo

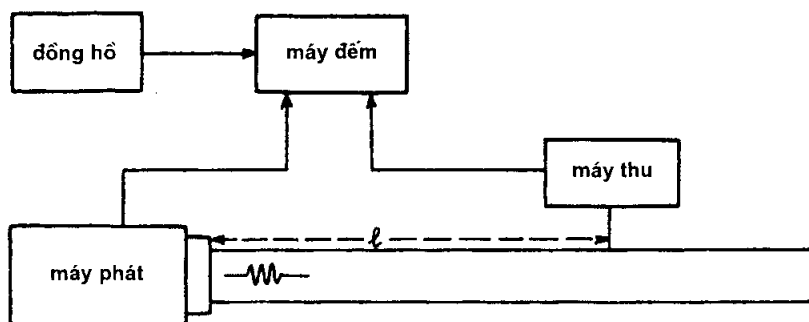
Tốc độ truyền sóng đàn hồi trong chất rắn có giá trị $V \sim 10^3 \text{m/s}$. Tốc độ này nhỏ hơn khoảng 10^5 lần tốc độ truyền sóng điện từ trong chân không.

Giữa hai điểm trong vật rắn cách nhau một khoảng bằng l , thời gian truyền sóng $t_p = l/V$, nghĩa là $t_p \sim \text{ms}$ khi $l \sim \text{m}$ và $t_p \sim \mu\text{s}$ khi $l \sim \text{mm}$. Thời gian t_p có thể đo được một cách dễ dàng, bởi vậy nếu biết tốc độ truyền sóng V thì có thể xác định được khoảng cách l .

Cảm biến truyền sóng đàn hồi có cấu tạo bao gồm:

- Vật rắn truyền sóng (dạng tấm, thanh hoặc ống).
- Máy phát sóng đàn hồi gắn với vật rắn truyền sóng.
- Bộ thu sóng đặt cách máy phát một khoảng l cần đo. Máy thu có nhiệm vụ chuyển tín hiệu sóng thu được thành tín hiệu điện.

Thời gian t_p từ khi tín hiệu xuất hiện ở máy phát đến khi nó được tiếp nhận ở máy thu có thể đo được nhờ thiết bị có sử dụng đồng hồ đếm xung có chu kỳ là t_H (h. 4.16).



Hình 4.16: Sơ đồ khối của thiết bị đo thời gian truyền sóng bằng phương pháp đếm xung.

Máy đếm hoạt động khi bắt đầu phát sóng và đóng lại khi tín hiệu đến máy thu. Gọi số xung đếm được là N , thời gian giữa phát và thu tín hiệu xung sẽ là

$$t_p = N \cdot t_H \quad (4.50)$$

và
$$l = V \cdot N \cdot t_H \quad (4.51)$$

Khoảng cách l giữa máy phát và máy thu có thể là đối tượng đo thứ nhất, song nó cũng có thể là đại lượng đo thứ cấp khi giá trị của nó được xác định bởi một đại lượng cần đo (như áp suất, nhiệt độ, lực, biến dạng) tác dụng lên vật trung gian (đóng vai trò là môi trường truyền sóng).

4.4.2. Cấu tạo của cảm biến

Máy phát sóng đàn hồi thường sử dụng hiệu ứng từ giảo hoặc hiệu ứng áp điện. Máy thu dựa trên cơ sở sử dụng hiệu ứng ngược với máy phát hoặc các hiệu ứng vật lý sinh ra trong vật rắn khi có sóng đàn hồi đi qua. Các hiệu ứng vật lý sử dụng trong máy thu có thể là hiệu ứng biến dạng hoặc điện trường.

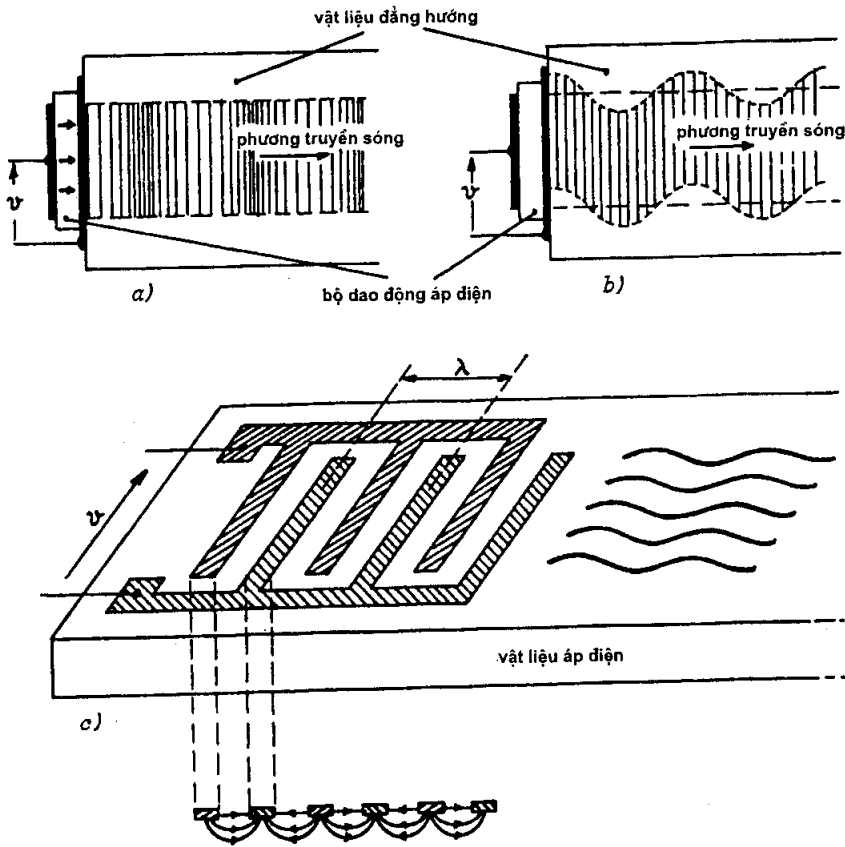
Tùy thuộc vào dạng kích thích, sóng đàn hồi có thể là:

- Sóng khối, dọc hoặc ngang;
- Sóng bề mặt.

Sóng khối dọc truyền cho các phân tử của vật rắn dịch chuyển xen kẽ theo

phương truyền sóng tạo nên sự nén rồi lại nở của thể tích. Sóng này được kích thích bằng phần tử áp điện rung theo bề dày (h. 4.17a).

Sóng khối ngang gây dịch chuyển vuông góc với phương truyền sóng, tạo ra chuyển động trượt tương đối giữa các lớp của vật rắn. Nguồn kích thích trong trường hợp này là phần tử áp điện rung theo mặt cắt (h. 4.17b).



Hình 4.17: Các dạng sóng đàn hồi: a) sóng dọc; b) sóng ngang; c) sóng bề mặt và dạng điện cực kích thích (hoặc thu).

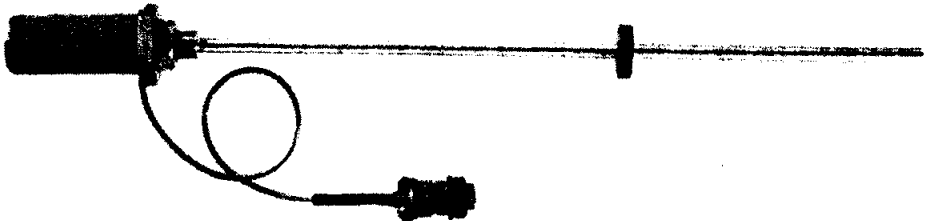
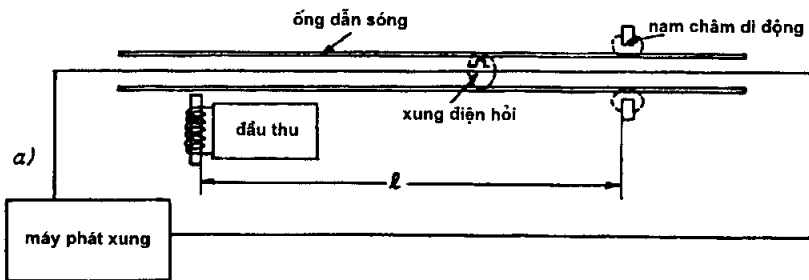
Sóng bề mặt có một thành phần dọc và một thành phần ngang. Biên độ của chúng hầu như bằng 0 ở độ sâu 2λ dưới bề mặt. Nguồn kích thích sóng bề mặt là một hệ điện cực kiểu răng lược cài nhau phủ trên bề mặt vật liệu áp điện (h. 4.17c). Khoảng cách giữa hai răng kế nhau của điện cực phải bằng λ để có thể gây ra biến dạng khi có điện áp V cùng pha đặt vào và để tăng hiệu

ứng của chúng. Máy thu sóng bề mặt đặt cố định vào vật rắn cũng có cấu tạo tương tự như máy phát sóng bề mặt. Khi có sóng đàn hồi đi qua, phần bề mặt của vật rắn nằm dưới các răng của điện cực sẽ bị biến dạng và do đó giữa các điện cực này xuất hiện một điện áp (do hiệu ứng áp điện gây nên).

4.3.2.1. Cảm biến âm từ

Sóng đàn hồi phát ra nhờ sử dụng hiệu ứng Wiedemann: hiện tượng xoắn một ống trụ sắt từ khi nó chịu tác dụng đồng thời của một từ trường dọc và một từ trường tròn ngang.

Sóng đàn hồi được thu trên cơ sở sử dụng hiệu ứng Villari: sức căng cơ học làm thay đổi khả năng từ hoá và độ từ thẩm của vật liệu sắt từ.



Hình 4.18: Cảm biến âm từ: a) sơ đồ nguyên lý; b) hình thức thể hiện.

Trên hình 4.18 biểu diễn sơ đồ nguyên lý và cấu tạo của cảm biến âm từ. Cấu tạo của cảm biến bao gồm:

- Một ống rỗng bằng hợp kim sắt từ xung quanh có một nam châm trượt. Nam châm này gắn với vật chuyển động cần xác định vị trí.
- Một dây dẫn nằm giữa trục của ống và được nối với máy phát xung điện.
- Một máy thu gồm một cuộn cảm có lõi được nối cơ học với ống.

Hoạt động của cảm biến như sau: một xung điện được đặt vào dây dẫn nằm trong ống, xung này truyền với tốc độ ánh sáng c , từ trường do nó sinh ra có đường sức tròn với tâm nằm trên trục của ống. Khi sóng điện từ truyền tới chỗ nam châm, sự kết hợp của hai từ trường sẽ làm cho ống xoắn cục bộ (do hiệu ứng Wiedemann). Xoắn cục bộ này truyền đi dưới dạng sóng đàn hồi với vận tốc V . Khi sóng đến máy thu nó sẽ làm thay đổi độ từ hóa (hiệu ứng Villari) gây nên tín hiệu điện đáp ứng.

Nếu gọi t_p là khoảng thời gian từ khi phát xung "hỏi" vào dây dẫn cho đến khi nhận được xung đáp ứng thì do $V \ll c$ nên trên thực tế

$$t_p = \frac{\ell}{V} \quad (4.52)$$

trong đó ℓ là khoảng cách từ nam châm đến đầu thu, t_p được đo bằng phương pháp đếm xung.

Các đặc trưng cơ bản của cảm biến này như sau:

- Dải đo: 125mm ÷ 3048mm;
- Độ tuyến tính: 0,05% dải đo;
- Độ lặp lại: 0,01% dải đo;
- Nhiệt độ: 55°C đến 125°C.

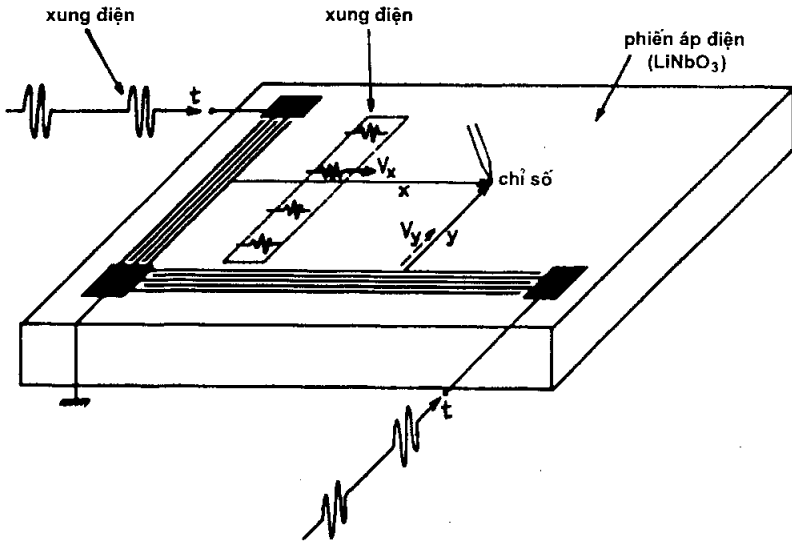
4.3.2.2. Cảm biến hai chiều dùng sóng bề mặt

Cảm biến hai chiều dùng sóng bề mặt sử dụng để xác định tọa độ X, Y của các điểm nằm trên hệ trục tọa độ vuông góc. Chúng được ứng dụng để thu thập dữ liệu đồ thị theo điểm.

Trên hình 4.19 biểu diễn một cảm biến hai chiều dùng sóng bề mặt. Cảm biến có cấu tạo bao gồm hai hệ điện cực răng lược đặt vuông góc với nhau và phủ trên bề mặt của một phiến tinh thể áp điện làm bằng LiNbO_3 (dài: 8cm, rộng: 2,6cm, dày: 1mm).

Các điện cực là nguồn phát sóng bề mặt theo hai chiều vuông góc OX và OY. Các nguồn được kích thích từng loạt. Vận tốc truyền sóng: theo trục OX $V_x = 4000$ m/s và theo trục OY $V_y = 3600$ m/s.

Máy thu có một đầu nhọn bằng kim loại tiếp xúc với phiến tinh thể và đóng vai trò như một ăng ten nhạy với điện trường sinh ra trên bề mặt khi có sóng đàn hồi đi qua. Thời gian truyền sóng giữa nguồn và điểm đo được xác định bằng phương pháp đếm xung đồng hồ giữa thời điểm phát và nhận xung.



Hình 4.19: Cảm biến hai chiều dùng sóng bề mặt.

Gọi N_x và N_y là số xung đếm được theo trục OX và OY thì tọa độ theo hai trục được tính như sau:

$$X = V_x N_x t_H \quad (4.53)$$

$$Y = V_y N_y t_H \quad (4.54)$$

trong đó t_H là chu kỳ của đồng hồ.

CHƯƠNG 5

CẢM BIẾN BIẾN DẠNG

Xác định ứng lực cơ học tác động lên các cấu trúc trong những điều kiện xác định là vấn đề hàng đầu trong việc đánh giá độ an toàn cho hoạt động của thiết bị. Kết quả của sự tác động này là sự biến dạng của môi trường chịu ứng lực. Quan hệ giữa ứng lực và biến dạng có thể được làm sáng tỏ bằng lý thuyết sức bền vật liệu và dựa vào mối quan hệ đó người ta tính được ứng lực khi đo biến dạng do nó gây nên. Các cảm biến dùng để đo biến dạng cũng chính là các đầu đo biến dạng. Có hai loại đầu đo biến dạng:

- Đầu đo điện trở là loại thường được sử dụng. Nó được dán trực tiếp trên cấu trúc chịu biến dạng. Các đầu đo loại này có kích thước nhỏ, từ mm đến cm, cho nên có thể đo theo điểm.
- Đầu đo dạng dây rung được dùng trong xây dựng. Đầu đo được làm bằng một sợi dây kim loại căng giữa hai điểm của cấu trúc cần đo biến dạng (khoảng cách giữa hai điểm ~ 10 cm). Tần số dao động của dây là hàm của sức căng cơ học, tần số này thay đổi khi điểm tựa của hai đầu dây bị biến dạng.

Ứng dụng của cảm biến biến dạng không chỉ giới hạn ở việc đo ứng lực cơ học. Trên thực tế, tất cả các đại lượng vật lý, đặc biệt là các đại lượng cơ học, đều có thể đo được bằng đầu đo biến dạng nếu tác động của chúng lên một vật trung gian làm cho vật này bị biến dạng. Thí dụ, các đại lượng như áp suất, lực, gia tốc đều có thể đo được bằng đầu đo biến dạng.

Trong chương này, sau khi trình bày nguyên lý chung của cảm biến biến dạng sẽ đề cập đến các cảm biến thường dùng trong công nghiệp như đầu đo điện trở kim loại, đầu đo điện trở bán dẫn - áp điện trở, ứng suất kế dây rung và các đầu đo dùng trong chế độ động.

5.1. Các định nghĩa và nguyên lý chung

5.1.1. Định nghĩa một số đại lượng cơ học

Biến dạng ε : là tỷ số giữa độ biến thiên kích thước Δl và kích thước ban đầu l :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (5.1)$$

Biến dạng đàn hồi: là biến dạng mà bản thân nó sẽ mất đi đồng thời cùng với ứng lực gây ra nó.

Ứng lực σ được đo bằng lực tác dụng trên một đơn vị diện tích của tiết diện chịu lực (F/s).

Giới hạn đàn hồi: là ứng lực tối đa không gây nên biến dạng cố định có giá trị lớn hơn 0,2%. Độ lớn của giới hạn đàn hồi được đo bằng kg lực/mm². Thí dụ, giới hạn đàn hồi của một số vật liệu như sau:

- thép: từ 20 đến 80;
- đồng: từ 3 đến 12;
- chì: từ 0,4 đến 1.

Định luật Hooke nói về mối quan hệ giữa ứng lực và biến dạng được phát biểu như sau: trong vùng giới hạn đàn hồi, ứng lực tỷ lệ với biến dạng do nó gây nên.

Modun Young Y: xác định biến dạng theo phương của ứng lực.

$$\varepsilon_{//} = \frac{1}{Y} \frac{F}{S} = \frac{1}{Y} \sigma \quad (5.2)$$

Đơn vị đo modun Young là kg lực/mm². Modun Young của một vật liệu thường có một khoảng giá trị:

- thép: từ 18000 đến 29000;
- đồng: từ 9900 đến 14000;
- chì: từ 500 đến 1800.

Hệ số Poisson ν : xác định biến dạng theo phương vuông góc với ứng lực:

$$\varepsilon_{\perp} = -\nu \varepsilon_{//} \quad (5.3)$$

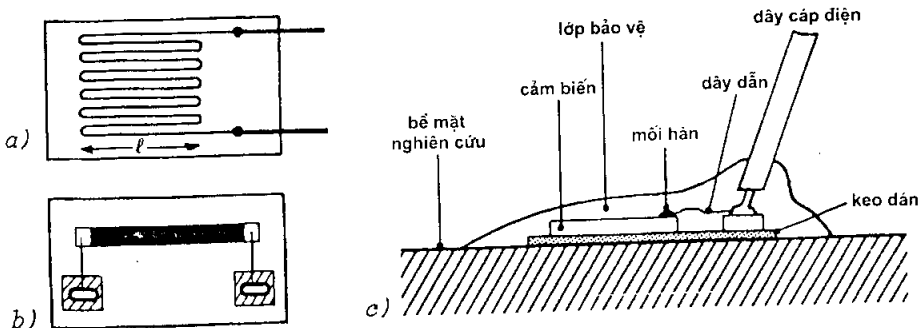
Trong vùng đàn hồi: $\nu \approx 0,3$.

5.1.2. Nguyên lý chung

Trong quá trình đo, các đầu đo biến dạng loại điện trở thường được dán trực tiếp lên bề mặt của cấu trúc cần khảo sát. Vì vậy, sự biến dạng của cấu trúc ở chỗ dán cảm biến làm cho cảm biến cũng bị biến dạng theo và dẫn đến sự thay đổi điện trở của nó.

Phạm vi biến dạng có thể đo được với độ chính xác $\sim 0,1\%$ là khoảng từ $\pm 10^{-5}$ đến $\pm 2 \cdot 10^{-1}$. Giới hạn dưới bị hạn chế bởi nhiễu của cảm biến và của mạch điện. Giới hạn trên bị hạn chế bởi độ đàn hồi của đầu đo và của chất kết dính dùng để gắn đầu đo với vật biến dạng.

Trong trường hợp tổng quát, đầu đo là một lưới làm bằng dây dẫn có điện trở suất ρ , tiết diện s và chiều dài $n\ell$ (ℓ là chiều dài của một đoạn dây, n là số đoạn dây). Thường thì $n = 10 \div 20$ đối với đầu đo kim loại và $n = 1$ đối với đầu đo bán dẫn (h. 5.1a,b).



Hình 5.1: Đầu đo điện trở: a) đầu đo dùng dây kim loại; b) đầu đo bán dẫn; c) cách cố định đầu đo trên bề mặt khảo sát.

Cảm biến được cố định trên đế cách điện (làm bằng giấy hoặc chất dẻo), còn đế thì được gắn vào cấu trúc nghiên cứu (h. 5.1c). Kết quả là cảm biến cũng chịu một biến dạng như biến dạng của cấu trúc.

Điện trở của cảm biến được biểu diễn bởi biểu thức $R = \rho \ell / S$. Do chịu ảnh hưởng của biến dạng nên điện trở của cảm biến thay đổi đi một lượng ΔR , nghĩa là:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \ell}{\ell} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (5.4)$$

Biến dạng dọc của dây kéo theo sự thay đổi kích thước theo chiều ngang a , b (nếu mặt cắt của dây hình chữ nhật) hoặc d (nếu dây có tiết diện tròn). Với một hệ số tỷ lệ ν , quan hệ giữa biến dạng ngang và biến dạng dọc tuân theo định luật:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.5)$$

trong đó ν là hệ số Poisson. Trong vùng biến dạng đàn hồi $\nu \approx 0,3$. Vì tiết diện của dây $S = ab$ hoặc $S = \pi d^2/4$ nên

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.6)$$

Đầu đo kim loại và đầu đo bán dẫn khác nhau ở tỷ số $\frac{\Delta \rho}{\rho}$.

Đầu đo kim loại: Đối với đầu đo kim loại, mối quan hệ Bridman dẫn đến hệ thức giữa điện trở suất và sự thay đổi thể tích như sau:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} \quad (5.7)$$

trong đó C là hằng số Bridman. Vì $V = S\ell$ nên:

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.8)$$

và
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C(1 - 2\nu) \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.9)$$

do đó
$$\frac{\Delta R}{R} = \{(1 + 2\nu) + C(1 - 2\nu)\} \frac{\Delta \ell}{\ell} = K \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.10)$$

trong đó K là hệ số đầu đo và được viết bởi biểu thức:

$$K = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu) \quad (5.11)$$

Vì $\nu \approx 0,3$ và $C \sim 1$ nên đầu đo kim loại thường có $K \approx 2$.

Đầu đo bán dẫn: Đối với đầu đo bán dẫn, sự phụ thuộc của điện trở suất vào ứng lực σ và hệ số áp điện trở π được biểu diễn bởi biểu thức:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma = \pi Y \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.12)$$

trong đó Y là modun Young. Sự thay đổi điện trở của cảm biến bán dẫn có dạng:

$$\frac{\Delta R}{R} = \{(1 + 2\nu) + \pi Y\} \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (5.13)$$

trong đó $K = 1 + 2\nu + \pi Y$ (5.14)

Trong điều kiện sử dụng thông thường, $K \approx 100 \div 200$, dấu của K phụ thuộc vào loại dẫn.

Đầu đo bán dẫn thích hợp với với những trường hợp đo những biến dạng nhỏ. Chúng được sử dụng trong các thiết bị đo lực, áp suất và gia tốc. Tuy nhiên, so với đầu đo kim loại chúng có độ tuyến tính thấp hơn và độ nhạy nhiệt cao hơn.

Điện trở của đầu đo (kim loại hoặc bán dẫn) có các giá trị chuẩn với độ chính xác $\pm 0,2 \div \pm 10\%$ và nằm trong khoảng từ 100Ω đến $5000k\Omega$.

5.2. Đầu đo điện trở kim loại

Điện trở suất ρ của phần lớn các kim loại giảm khi áp suất tác dụng lên chúng tăng lên. Dưới tác dụng của áp suất, thể tích của kim loại giảm xuống, khoảng cách giữa các nguyên tử cũng giảm đi, lực liên kết tăng lên. Khi lực liên kết tăng thì dao động của nguyên tử giảm xuống và vì thế xác suất tán xạ cũng giảm theo. Kết quả của những tác động trên đây làm cho điện trở suất của kim loại giảm xuống.

5.2.1. Vật liệu và phương pháp chế tạo

Các kim loại sử dụng làm điện trở phần lớn thuộc họ hợp kim Ni. Bảng 5.1 liệt kê thành phần các hợp kim thường sử dụng và hệ số đầu đo tương ứng.

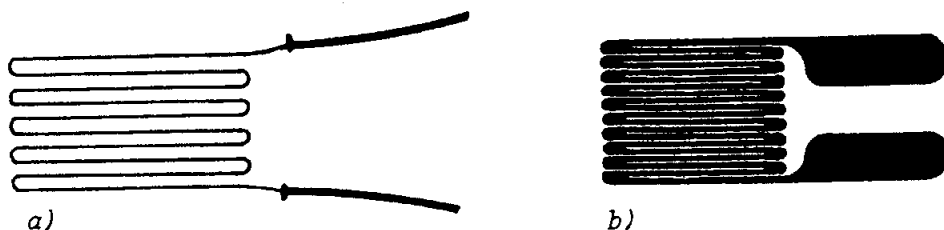
Các vật liệu khác nhau ở tính chất nhiệt (hệ số giãn nở, hệ số điện trở) và độ ổn định của chúng ở nhiệt độ cao.

Các đầu đo dùng dây dẫn biểu diễn trên hình 5.2a có các thông số như sau:

- Đường kính dây dẫn: $d \approx 20 \mu\text{m}$,
- Bề dày giá đỡ: 0,1 mm (giấy), hoặc 0,03 mm (nhựa polyimide, epoxy).

Bảng 5.1

Hợp kim	Thành phần	K
Constantan	45% Ni, 55% Cu	2,1
Isoelastic	52% Fe, 36% Ni, 8% Cr, (MnMo)	3,5
Karma	74% Ni, 20% Cr, 3% Cu, 3% Fe	2,1
Nichrome V	80% Ni, 20% Cr	2,5
Bạch kim-Vonfram	92% Pt, 8% W	4,1



Hình 5.2: Các dạng đầu đo dùng dây dẫn kim loại:
a) đầu đo dùng dây dẫn; b) đầu đo dùng lưới màng.

Các đầu đo dùng lưới màng (h. 5.2b) thường chế tạo bằng phương pháp mạch in để giảm kích thước và cho phép đo theo điểm.

5.2.2. Các đặc trưng chủ yếu

Điện trở suất:

Điện trở suất ρ của vật liệu dùng làm dây dẫn phải đủ lớn để không cần đến dây quá dài làm tăng kích thước cảm biến, song cũng không nên giảm tiết diện dây dẫn quá nhiều để không làm giảm dòng đo và do đó không làm giảm độ nhạy.

Hệ số đầu đo K:

Thông thường K có giá trị nằm trong khoảng $2 \pm 0,1$, ngoại trừ trường hợp isoelastic $K = 3,5$ và hợp kim platin-vonfram $K = 4,1$.

Ảnh hưởng của ứng lực đến độ tuyến tính:

Trong giới hạn đàn hồi, hệ số đầu đo không đổi do đó mối quan hệ giữa sự thay đổi của điện trở và biến dạng là tuyến tính. Khi dây dẫn bị biến dạng và nằm ngoài vùng giới hạn đàn hồi, $|\Delta \ell / \ell| > 0,5\% \div 20\%$ tùy thuộc vào loại vật liệu, hệ số Poisson bằng 0,5 và hệ số đầu đo đạt giá trị gần bằng 2.

Đối với hợp kim isoelastic : $K = 3,5$ khi $|\Delta \ell / \ell| < 0,65\%$. Ở ngoài giới hạn này, nghĩa là khi $|\Delta \ell / \ell| > 0,65\%$, $K = 2$.

Ảnh hưởng của nhiệt độ:

Nói chung K ít chịu ảnh hưởng của nhiệt độ, ngoại trừ trường hợp isoelastic. Trong một khoảng nhiệt độ tương đối rộng, $-100^\circ\text{C} < T < 300^\circ\text{C}$, biểu thức của K có dạng:

$$K(T) = K_0 \{1 + \alpha_K (T - T_0)\} \quad (5.15)$$

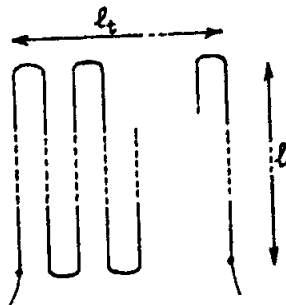
trong đó K_0 là hệ số đầu đo ở nhiệt độ chuẩn T_0 (thông thường $T_0 = 25^\circ\text{C}$).

Giá trị của α_K đối với một số chất như sau:

- Nichrome V: $\alpha_K = -0,04\%/^\circ\text{C}$,
- Constantan: $\alpha_K = +0,01\%/^\circ\text{C}$.

Độ nhạy ngang:

Ngoài các đoạn nhánh dọc có điện trở R_L còn có các đoạn vuông góc với các nhánh dọc có tổng độ dài ℓ_t và điện trở R_t , các đoạn này nhạy với biến dạng ngang (h. 5.3).



Hình 5.3: Nhánh ngang của đầu đo dạng lưới.

Điện trở của cảm biến là tổng điện trở của các đoạn dây dọc và ngang, nghĩa là $R = R_L + R_t$, do đó

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_L}{R} + \frac{\Delta R_t}{R} \quad (5.16)$$

với
$$\frac{\Delta R_L}{R_L} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (5.17)$$

và
$$\frac{\Delta R_t}{R_t} = K \cdot \frac{\Delta l_t}{l_t} \quad (5.18)$$

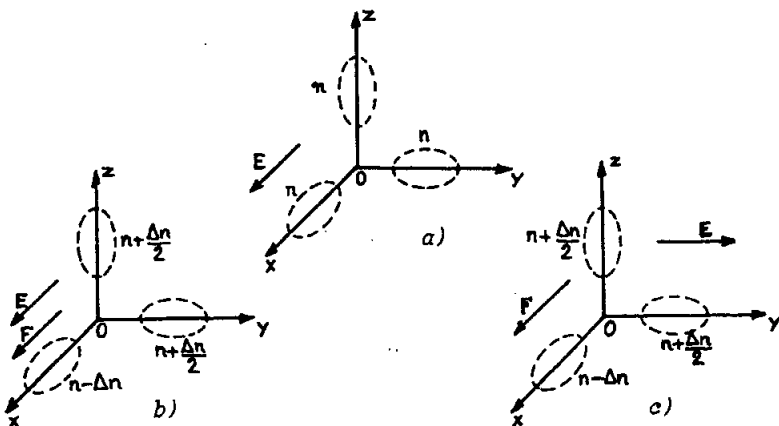
Trên thực tế người ta chế tạo sao cho $R_t \ll R_L$ để giảm kích thước phần dây ngang.

5.3. Đầu đo điện trở bán dẫn - áp điện trở

5.3.1. Hiệu ứng áp trở trong chất bán dẫn

Mô hình thung lũng năng lượng:

Mô hình thung lũng năng lượng cho phép giải thích hiệu ứng áp điện trở trong silic pha tạp loại N. Trong tinh thể silic loại N với cấu trúc lập phương gồm ba trục x, y, z , dọc theo mỗi trục đều có một mức năng lượng nhỏ nhất của vùng, gọi là thung lũng năng lượng. Vì lý do đối xứng, ba thung lũng đồng dạng với nhau và có số điện tử dẫn bằng nhau (h. 5.4a).



Hình 5.4: Sự phân chia điện tử theo mô hình thung lũng năng lượng dưới tác dụng của điện trường: a) không có ứng lực; b) ứng lực song song; c) ứng lực vuông góc.

Trong mỗi thung lũng, độ linh động của điện tử $\mu_{//}$ dọc theo trục tương ứng là nhỏ nhất. Ngược lại, độ linh động μ_{\perp} của điện tử theo hai hướng vuông góc với trục tương ứng là lớn nhất.

Độ dẫn theo bất kỳ một trục nào đó được biểu diễn bởi biểu thức:

$$\sigma = qn (\mu_{//} + 2\mu_{\perp}) \quad (5.19)$$

trong đó n là mật độ điện tử trong mỗi thung lũng. Số hạng $qn\mu_{//}$ biểu diễn sự phân bố điện tử trong thung lũng song song với điện trường, và số hạng $qn\mu_{\perp}$ biểu diễn sự phân bố điện tử trong từng thung lũng vuông góc với điện trường.

Khi có ứng lực tác dụng, kích thước ô mạng tinh thể thay đổi kéo theo sự thay đổi của nồng độ điện tử trong thung lũng. Thí dụ lực kéo dọc theo trục OX làm di chuyển một phần điện tử Δn của thung lũng x sang thung lũng y và z , điều này dẫn đến sự thay đổi độ dẫn. Khi điện trường song song với ứng lực (h. 5.4b), sự thay đổi độ dẫn (hiệu ứng dọc) được biểu diễn bằng biểu thức:

$$\Delta\sigma_{\ell} = q(-\Delta n\mu_{//} + \Delta n\mu_{\perp}) = q\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_{//}) \quad (5.20)$$

và $\Delta\sigma_{\ell} > 0$ vì $\mu_{\perp} \gg \mu_{//}$.

Khi điện trường vuông góc với ứng lực $E \perp F$ (h. 5.4c), sự biến thiên của độ dẫn (hiệu ứng ngang) được viết bởi biểu thức:

$$\Delta\sigma_t = q\left(\frac{\Delta n}{2}\mu_{//} + \frac{\Delta n}{2}\mu_{\perp} - \Delta n\mu_{\perp}\right) = \frac{q}{2}\Delta n(\mu_{//} - \mu_{\perp}) \quad (5.21)$$

và
$$\Delta\sigma_t = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{\ell} \quad (5.22)$$

Khi bị nén, điện tử di chuyển theo chiều ngược lại, từ mỗi thung lũng y và z có $\Delta n/2$ điện tử chuyển sang x . Biểu thức viết cho sự thay đổi độ dẫn sẽ là:

- Theo hiệu ứng dọc
$$\Delta\sigma_{\ell} = q\Delta n(\mu_{//} - \mu_{\perp}) \quad (5.23)$$

- Theo hiệu ứng ngang
$$\Delta\sigma_t = \frac{q}{2}\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_{//}) \quad (5.24)$$

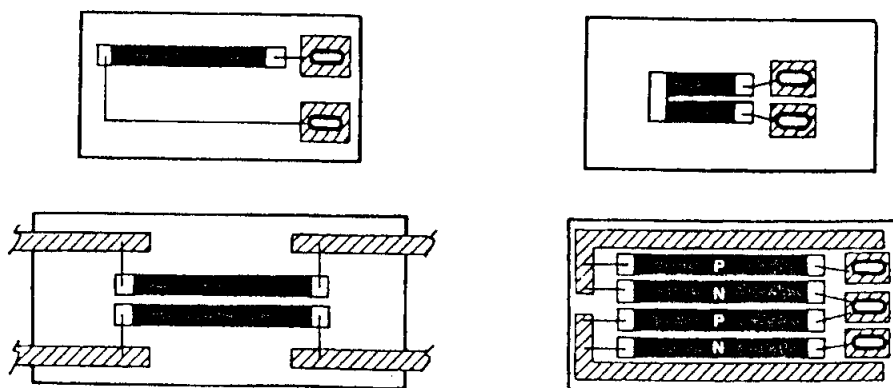
Trong trường hợp silic loại P, hiệu ứng dọc quan sát được theo hướng đường chéo của hình lập phương cũng như hiệu ứng ngang nhưng có dấu ngược lại với trường hợp silic loại N. Mô hình thung lũng năng lượng không giải thích được trường hợp này. Khi biến dạng không đẳng hướng, sự đối xứng của trường tinh thể bị phá vỡ, sự suy biến của mức năng lượng cực đại vùng hoá trị mất đi. Cực đại của hai nhánh năng lượng lỗ trống nặng và lỗ trống nhẹ (trong silic) dịch chuyển ngược chiều nhau $\delta p_n = \delta p_l$. Sự dịch chuyển này làm thay đổi nồng độ lỗ trống nặng và lỗ trống nhẹ dẫn đến làm thay đổi độ dẫn.

5.3.2. Cấu tạo của đầu đo bán dẫn

Có hai loại đầu đo bán dẫn phụ thuộc vào kiểu chế tạo chúng. Đó là loại cắt và loại khuếch tán.

Đầu đo loại cắt:

Đầu đo loại cắt chỉ gồm một mẫu cắt từ tấm đơn tinh thể silic pha tạp. Sơ đồ cấu tạo của loại này biểu diễn trên hình 5.5.



Hình 5.5: Đầu đo bán dẫn chế tạo từ mẫu cắt của đơn tinh thể silic.

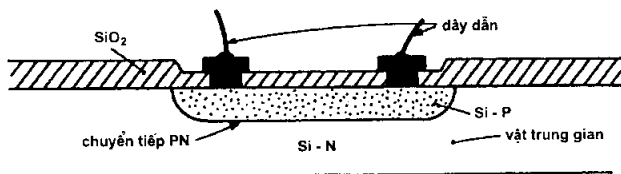
Mẫu cắt song song với đường chéo của tinh thể lập phương đối với silic loại P và song song với cạnh lập phương nếu là silic loại N. Các mẫu cắt này được dán lên một giá đỡ bằng nhựa. Kích thước của mẫu cắt như sau:

- Chiều dài L: từ 0,1mm đến vài mm;
- Chiều dày: $\sim 10^{-2}$ mm

Vì chỉ là một mẫu cắt có kích thước nhỏ như vậy nên đầu đo có độ nhạy ngang gần như bằng không.

Đầu đo loại khuếch tán:

Trong đầu đo loại khuếch tán, điện trở của đầu đo được tạo nên bằng cách khuếch tán tạp chất vào một phần của đế đơn tinh thể silic đã pha tạp (h. 5.6). Điện trở loại N nhận được bằng cách khuếch tán vào đế silic loại P một tạp chất thuộc nhóm V trong bảng tuần hoàn (như P, Sb). Còn nếu khuếch tán



Hình 5.6: Cấu trúc của đầu đo loại khuếch tán.

tạp chất thuộc nhóm III (như Ga, In) vào đế silic loại N thì sẽ nhận được điện trở loại P. Chuyển tiếp giữa đế và vùng khuếch tán tạo nên một diot, nó phải luôn luôn ở trạng thái phân cực ngược (vùng P âm hơn vùng N) để cho điện trở của cảm biến cách biệt với đế silic. Toàn bộ cấu trúc được bảo vệ bằng một lớp SiO_2 có mở hai cửa sổ để phủ kim loại làm tiếp xúc dẫn điện ra ngoài cho điện trở.

Đôi khi người ta dùng phương pháp này để tạo ra bốn điện trở đồng dạng trên cùng một đế rồi nối chúng với nhau bằng kỹ thuật phủ kim loại để tạo thành một cầu Wheatstone hoàn chỉnh. Đế silic đóng vai trò là vật trung gian (thí dụ dạng màng mỏng để đo áp suất). Cách chế tạo này tạo nên sự giống nhau về hệ số dẫn nở nhiệt giữa đầu đo và đế.

5.3.3. Các đặc trưng chủ yếu của đầu đo bán dẫn

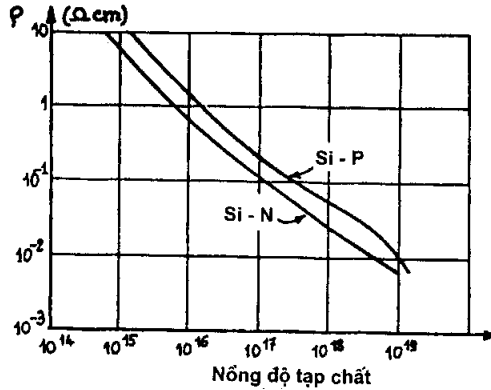
Đối với các đầu đo bán dẫn, độ pha tạp là yếu tố quyết định đến các đặc trưng của chúng. Nói chung, khi độ pha tạp tăng, hệ số đầu đo K giảm, độ nhạy nhiệt giảm xuống, nhưng ngược lại, độ tuyến tính tăng lên. Độ nhạy nhiệt giảm sẽ cho phép mở rộng dải nhiệt độ làm việc. Độ nhạy với bức xạ cũng giảm xuống khi độ pha tạp tăng lên.

5.3.3.1. Điện trở

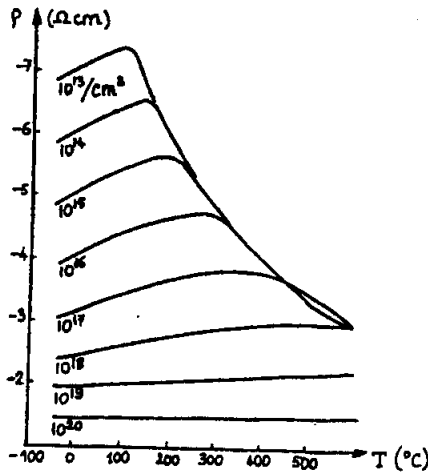
Theo mức độ tăng dần của nồng độ pha tạp, mật độ hạt dẫn trong vật liệu tăng lên và do vậy điện trở suất ρ của nó giảm xuống (h. 5.7). Biểu thức chung của điện trở suất có dạng:

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (5.25)$$

trong đó q là giá trị tuyệt đối của điện tích điện tử hoặc lỗ trống ($1,6 \cdot 10^{-19}C$), n và p là mật độ điện tử và lỗ trống tự do, μ_n và μ_p là độ linh động của chúng.



Hình 5.7: Sự phụ thuộc của điện trở suất của silic vào nồng độ pha tạp.



Hình 5.8: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở của đầu đo.

Trên hình 5.8 biểu diễn sự thay đổi của điện trở theo nhiệt độ phụ thuộc vào nồng độ pha tạp. Khi nhiệt độ nhỏ hơn $120^{\circ}C$ điện trở suất tăng theo nhiệt

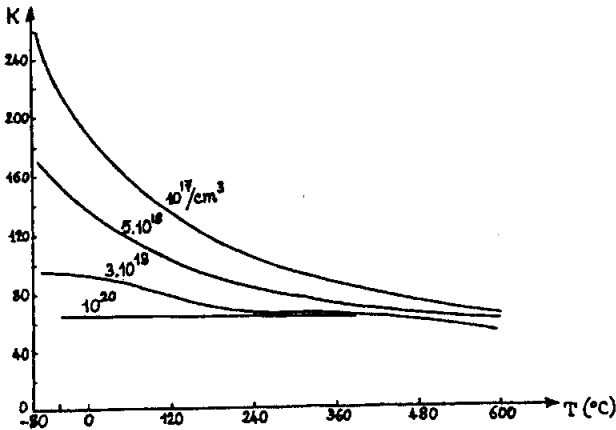
độ, và hệ số nhiệt độ của nó có giá trị dương giảm dần khi độ pha tạp tăng lên. Ở nhiệt độ cao, điện trở suất giảm khi nhiệt độ tăng và hệ số nhiệt độ của nó có giá trị âm không phụ thuộc vào độ pha tạp.

5.3.3.2. Hệ số đầu đo

Hệ số đầu đo K phụ thuộc vào độ pha tạp. Khi độ pha tạp tăng lên, hệ số đầu đo giảm (h. 5.9).

Thí dụ: Đầu đo bán dẫn Kulite được chế tạo với hai model khác nhau:

- Model H: $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$
 $K = 175$
- Model K: $N_d = 10^{20} \text{cm}^{-3}$
 $K = 45$



Hình 5.9: Sự phụ thuộc của K vào nồng độ pha tạp.

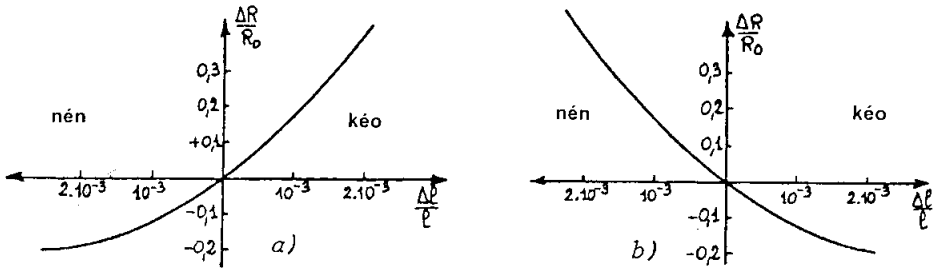
Ảnh hưởng của biến dạng:

Nói chung, sự thay đổi điện trở của đầu đo bán dẫn phụ thuộc không tuyến tính vào biến dạng ϵ :

$$\frac{\Delta R}{R} = K_1 \epsilon + K_2 \epsilon^2 + K_3 \epsilon^3 \quad (5.26)$$

Các hệ số K_i phụ thuộc vào pha tạp và nói chung có thể hạn chế biểu thức trên ở số hạng thứ hai. Các giá trị của K_2 nằm trong khoảng từ 10^3 đến 10^4 .

Trên hình 5.10 biểu diễn sự thay đổi điện trở của các đầu đo silic loại P và loại N.



Hình 5.10: Sự phụ thuộc không tuyến tính của điện trở vào biến dạng: a) silic loại p; b) silic loại n.

Từ đồ thị có thể thấy rằng đầu đo loại P tuyến tính hơn khi nó chịu tác động của lực kéo, và đầu đo loại N tuyến tính hơn khi bị nén.

Từ biểu thức (5.26) có thể suy ra biểu thức của hệ số đầu đo K:

$$K = K_1 + K_2\varepsilon + K_3\varepsilon^2 \quad (5.27)$$

Hệ số đầu đo K phụ thuộc vào biến dạng, nhưng có thể xác định một giá trị cực đại của biến dạng ε mà nhỏ hơn giá trị này có thể xem K là hằng số.

Ảnh hưởng của nhiệt độ:

Hệ số đầu đo giảm khi nhiệt độ tăng. Tuy nhiên khi pha tạp mạnh, hệ số đầu đo ít phụ thuộc vào nhiệt độ. Khi nồng độ pha tạp cỡ $N_d = 10^{20} \text{cm}^{-3}$ thì K hầu như không phụ thuộc vào nhiệt độ (xem lại hình 5.9). Đối với hai model đầu đo Kulite, các thông số của K như sau:

- Model H: K giảm 23% khi $\Delta T = 55^\circ \text{C}$;
- Model K: K là hằng số.

5.4. Đầu đo trong chế độ động

5.4.1. Tần số sử dụng tối đa

Tần số làm việc của đầu đo không phụ thuộc vào vật liệu chế tạo: silic có thể truyền không suy giảm các dao động với tần số lớn hơn 10^6 Hz . Tuy vậy tần số làm việc lại phụ thuộc vào phương pháp gắn đầu đo và kích thước của nó.

Chiều dài ℓ của các nhánh phải nhỏ hơn nhiều lần so với chiều dài bước sóng λ của dao động cơ học để sao cho các biến dạng đo được gần như đồng dạng trong phạm vi của đầu đo.

Qui tắc chung đã được chấp nhận về tương quan giữa kích thước ℓ của đầu đo và chiều dài bước sóng qui định:

$$\ell \leq 0,1\lambda \quad (5.28)$$

Chiều dài bước sóng λ của dao động dọc được đo bằng tỷ số:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (5.29)$$

trong đó V là vận tốc âm trong vật liệu và f là tần số dao động. Biểu thức của V có dạng:

$$V = \sqrt{\frac{Y}{d} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.30)$$

trong đó Y là modun Young, ν là hệ số Poisson và d là trọng lượng riêng của vật liệu. Vận tốc truyền sóng trong thép $V = 5810\text{m/s}$.

Tính đến qui tắc chung vừa nêu trên, tần số sử dụng cực đại của một đầu đo có chiều dài nhánh ℓ sẽ là:

$$f_{\max} = \frac{V}{10\ell} \quad (5.31)$$

Đối với vật liệu thép, $f_{\max} \approx 60\text{kHz}$ khi $\ell = 1\text{cm}$.

5.4.2. Giới hạn mỏi

Biến dạng lặp lại nhiều lần sẽ dẫn đến làm tăng điện trở của đầu đo. Đó là hiệu ứng mỏi. Hiệu ứng này càng mạnh hơn khi biên độ biến dạng tăng lên.

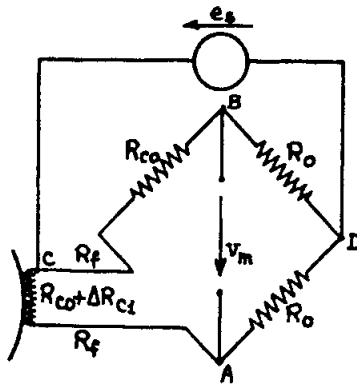
Giới hạn mỏi được xác định bởi số chu kỳ biến dạng N với biên độ cho trước gây nên biến thiên điện trở tương đương với biến dạng giả định bằng 10^{-4} .

Đối với biên độ biến dạng cỡ $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ giới hạn mỏi phụ thuộc vào dạng đầu đo và nằm trong khoảng từ 10^4 (vật liệu constantan) đến 10^8 (vật liệu isoelastic) chu kỳ.

5.5. Phương pháp đo

Có nhiều sơ đồ đo bằng cầu Wheatstone. Dưới đây chỉ xét sơ đồ sử dụng một đầu đo (h. 5.11). Sơ đồ này thường được ứng dụng để phân tích ứng lực. Các ký hiệu trên sơ đồ như sau:

- R_0 : điện trở cố định;
- R_c : điện trở của đầu đo tích cực;
- R_{co} : điện trở của đầu đo thụ động;
- R_f : điện trở dây nối



Hình 5.11: Cầu Wheatstone dùng một đầu đo.

Để đảm bảo độ chính xác của phép đo, điện trở R_f của từng dây phải nhỏ hơn rất nhiều so với điện trở của đầu đo: $R_f \ll R_c$.

Trong trường hợp thông thường đối với một cầu có bốn điện trở bằng nhau ở trạng thái cân bằng, điện áp không cân bằng được biểu diễn bởi biểu thức:

$$V_m = \frac{e_s \cdot \Delta R_c}{4 R_{co} + R_{fo}} = \frac{e_s \cdot \Delta R_c}{4 R_{co}} \cdot \frac{1}{1 + R_{fo}/R_{co}} \quad (5.32)$$

nghĩa là

$$V_m = \frac{e_s}{4} K \frac{\Delta l}{l} \frac{1}{1 + \frac{R_{fo}}{R_{co}}} \quad (5.33)$$

R_{fo} là giá trị của R_f đo khi cầu cân bằng. Nếu điều kiện $R_{fo}/R_{co} \ll 1$ không được thỏa mãn thì cần phải tính đến điện trở của dây nối khi tính toán giá trị của biến dạng.

5.6. Ứng suất kế dây rung

Ứng suất kế dây rung dùng để theo dõi kiểm tra các công trình xây dựng như đập, cầu, đường hầm... Cấu tạo của ứng suất kế gồm một dây thép căng giữa hai giá gắn vào cấu trúc cần nghiên cứu biến dạng. Khi có biến dạng, sự căng cơ học của dây thay đổi kéo theo sự thay đổi của tần số dao động N của dây. Như vậy đo tần số dao động của dây có thể biết được độ lớn của biến dạng.

Ưu điểm của ứng suất kế rung là có cấu trúc chắc chắn, thời gian sống dài, độ tin cậy cao. Các thiết bị loại này có thể làm việc trong môi trường ẩm, có phóng xạ. Các tín hiệu thu được từ ứng suất kế có thể dễ dàng biến đổi thành dạng số tiện lợi cho việc xử lý dữ liệu.

Tần số cơ bản N của các dao động cơ học của một dây căng giữa hai điểm cách nhau một khoảng l và chịu lực F tác dụng được biểu diễn bởi công thức:

$$N = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{S \cdot d}} \quad (5.34)$$

trong đó S là tiết diện và d là khối lượng riêng của dây.

Dưới tác dụng của ứng suất F/S , dây bị dài thêm một lượng Δl sao cho:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{Y} \frac{F}{S} \quad (5.35)$$

trong đó Y là môđun Young của vật liệu dây.

Tần số N liên hệ với biến dạng bằng biểu thức:

$$N = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Y \Delta l}{d l}} \quad (5.36)$$

hoặc ngược lại:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{4l^2 d}{Y} N^2 = K \cdot N^2 \quad (5.37)$$

Giả sử Δl_0 là độ kéo dài ban đầu và N_0 là tần số tương ứng khi chưa có biến dạng:

$$\frac{\Delta \ell_0}{\ell} = K.N_0^2 \quad (5.38)$$

Khi có biến dạng, độ kéo dài tổng cộng của dây và tần số dao động tương ứng sẽ là $\Delta \ell_1$ và N_1 :

$$\frac{\Delta \ell_1}{\ell} = K.N_1^2 \quad (5.39)$$

Như vậy độ kéo dài của dây gây nên bởi biến dạng sẽ bằng $\Delta \ell = \Delta \ell_1 - \Delta \ell_0$, nghĩa là

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = K.(N_1^2 - N_0^2) \quad (5.40)$$

Biết các giá trị N_0 và N_1 có thể tính được biến dạng của cấu trúc.

CHƯƠNG 6

CẢM BIẾN VẬN TỐC

Trong công nghiệp, việc đo vận tốc, trong phần lớn các trường hợp, thường là đo tốc độ quay của máy. Ở đây muốn nói đến việc theo dõi tốc độ vì nguyên nhân an toàn hoặc để khống chế các điều kiện đặt trước cho hoạt động của máy móc, thiết bị. Trong trường hợp chuyển động thẳng, việc đo vận tốc dài cũng thường được chuyển sang đo tốc độ quay. Bởi vậy các cảm biến đo vận tốc góc chiếm vị trí ưu thế trong lĩnh vực đo tốc độ.

Các cảm biến công nghiệp dùng để đo vận tốc dựa trên định luật Faraday:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (6.1)$$

với e là suất điện động xuất hiện khi từ thông thay đổi một lượng $d\phi$ trong khoảng thời gian dt . Từ thông đi qua một mạch là một hàm số dạng:

$$\phi(x) = \phi_0 \cdot F(x) \quad (6.2)$$

trong đó x là biến số của vị trí thay đổi theo đường thẳng hoặc vị trí theo góc quay.

Mọi sự chuyển động tương đối giữa nguồn từ thông (phần cảm) và mạch có từ thông đi qua (phần ứng) sẽ làm xuất hiện trong mạch một suất điện động có biên độ tỷ lệ với tốc độ dịch chuyển. Suất điện động này chứa đựng trong nó tín hiệu ra của cảm biến:

$$e = - \phi_0 \frac{dF(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (6.3)$$

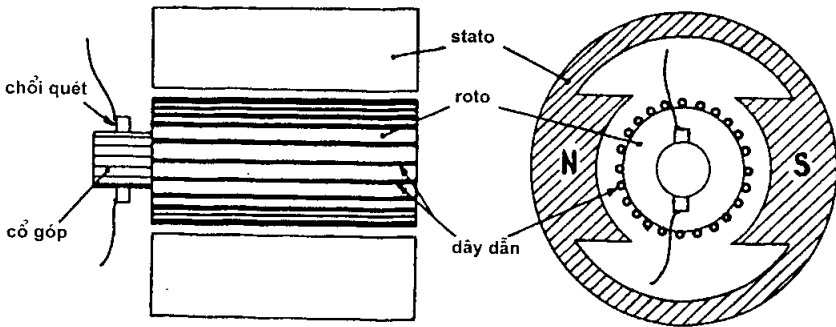
Các tốc độ kể hoạt động theo nguyên lý trên đây gọi là tốc độ kể vòng loại điện từ.

Khi một phần tử động chuyển động tuần hoàn, thí dụ chuyển động quay, có thể xác định vận tốc của nó bằng cách đo tần số. Thí dụ, một đĩa trên đó có bố trí một phần trong suốt và một phần không trong suốt được gắn với trục quay. Cho chùm sáng chiếu qua đĩa đến một đầu thu quang. Xung điện lấy từ đầu thu có tần số tỷ lệ với vận tốc quay cần đo. Tốc độ kế hoạt động theo nguyên lý vừa mô tả gọi là tốc độ kế vòng loại xung.

6.1. Tốc độ kế điện từ đo vận tốc góc

6.1.1. Tốc độ kế dòng một chiều

Các phần tử cấu tạo cơ bản của một tốc độ kế dòng một chiều biểu diễn trên hình 6.1. Stator (phần cảm) là một nam châm điện hoặc nam châm vĩnh cửu có hai cực nam và bắc nằm phía ngoài cùng.



Hình 6.1: Nguyên lý cấu tạo của máy phát dòng một chiều.

Roto (phần ứng) là một trục sắt gồm nhiều lớp ghép lại và quay giữa các cực của stator. Mặt chu vi của roto có khắc các rãnh song song với trục và cách đều nhau, tổng các rãnh là một số chẵn ($n = 2k$). Trong mỗi rãnh có đặt một dây dẫn bằng đồng, gọi là dây chính. Chúng được nối với nhau từng đôi bằng các dây phụ ở hai đầu theo đường kính trục.

Cực góp là một hình trụ đồng trục với roto nhưng có bán kính nhỏ hơn. Trên bề mặt cực góp có các lá đồng cách điện với nhau, mỗi lá được nối với một dây đồng chính của roto.

Hai chổi quét được áp sát vào cực góp sao cho ở mọi thời điểm chúng luôn luôn tiếp xúc với hai lá đồng đối diện nhau. Hai chổi này được đặt dọc theo

đường trung tính vuông góc với hướng trung bình của từ trường để nhận được suất điện động lớn nhất.

Dưới đây tính suất điện động cho một dây dẫn chính, dây thứ j . Khi dây quay quanh trục trong từ trường, ở hai đầu dây xuất hiện một suất điện động e_j :

$$e_j = - \frac{d\phi_j}{dt} \quad (6.4)$$

$d\phi_j$ là từ thông mà dây cắt trong khoảng thời gian dt .

$$d\phi_j = d\bar{s}_c d\bar{B}_j = ds_c \cdot B_{jN} \quad (6.5)$$

trong đó ds_c là tiết diện bị cắt trong khoảng thời gian dt , B_j là thành phần \vec{B} vuông góc với ds_c . Tiết diện bị cắt được tính bởi tích số:

$$ds_c = \ell \cdot v \cdot dt \quad (6.6)$$

trong đó ℓ là chiều dài dây dẫn và v là vận tốc dài của nó.

$$v = \omega r \quad (6.7)$$

ω và r là vận tốc góc và bán kính tương ứng của roto. Cuối cùng biểu thức của suất điện động của một dây dẫn sẽ là:

$$e_j = -\omega \cdot r \cdot \ell \cdot B_{jN} \quad (6.8)$$

Với dây dẫn ở phía đối diện, theo nguyên lý đối xứng, suất điện động của nó sẽ là:

$$e_{j'} = \omega \cdot r \cdot \ell \cdot B_{jN} \quad (6.9)$$

Sau khi tính toán, biểu thức của suất điện động ứng với một nửa số dây ở bên phải đường trung tính có dạng:

$$E_r = - \frac{\omega}{2\pi} n \cdot \phi_0 = -N \cdot n \cdot \phi_0 \quad (6.10)$$

trong đó N là số vòng quay trong một dây, n là tổng số dây chính trên roto, ϕ_0 là từ thông xuất phát từ cực nam châm.

Với nửa số dây bên trái:

$$E_l = \frac{\omega}{2\pi} n \cdot \phi_0 = Nn \cdot \phi_0 \quad (6.11)$$

Nguyên tắc cuốn dây là nối 2k dây với nhau thành hai cụm sao cho mỗi cụm có k dây mắc nối tiếp với nhau, còn hai cụm thì mắc ngược pha nhau, mỗi cụm cho một suất điện động E:

$$E = \frac{\omega}{2\pi} n \cdot \phi_0 = N \cdot n \cdot \phi_0 \quad (6.12)$$

Suất điện động E này được đưa ra mạch ngoài bằng cách dùng hai chổi quét. Nó tỷ lệ với vận tốc góc ω .

Ưu điểm của thiết bị là tín hiệu đầu ra đổi dấu khi đổi chiều quay.

Trong khi chế tạo, người ta thường sử dụng nam châm vĩnh cửu để tránh phải dùng nguồn kích thích. Các vật liệu sử dụng có độ từ dư Br và độ kháng từ Hc như sau:

- Ferit cứng: hỗn hợp oxit kim loại

$$Br = 0,2 \div 0,4T; \quad Hc = 100 \div 250 \text{ KA/m.}$$

- Alnico: hợp kim Fe-Ni-Co-Al-Cu

$$Br = 0,8 \div 1,3 \text{ T}; \quad Hc = 50 \div 80 \text{ KA/m.}$$

- Vật liệu đất hiếm: Co - Samari:

$$Br = 0,8 \div 1T; \quad Hc = 600 \div 700 \text{ KA/m.}$$

- Ticonal: hợp kim của Alnico và titan:

$$Br = 0,7 \div 0,8T; \quad Hc = 120 \div 160 \text{ KA/m.}$$

6.1.2. Tốc độ kế dòng xoay chiều

Tốc độ kế dòng xoay chiều có ưu điểm là không có ổ góp và chổi quét nên có tuổi thọ cao, không có thanh giáng và sụt thế trên chổi. Nhược điểm của nó là mạch điện phức tạp hơn, ngoài ra để xác định biên độ cần phải chỉnh lưu và lọc tín hiệu.

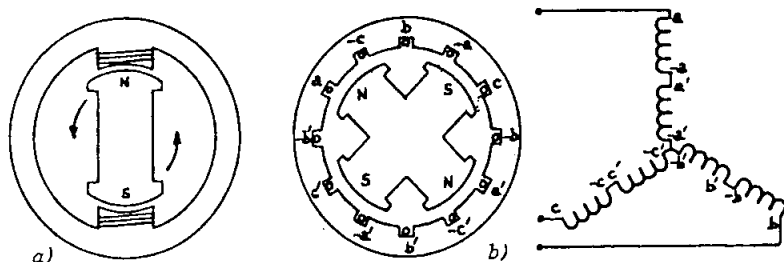
6.1.2.1. Máy phát đồng bộ

Đây chính là máy phát xoay chiều nhỏ. Roto của máy phát đồng bộ được gắn với trục cần đo tốc độ quay. Roto này là một nam châm hoặc một tập hợp của nhiều nam châm nhỏ (h. 6.2). Stato được cuốn dây làm phân cảm ứng, có thể là một pha hoặc nhiều pha, là nơi cung cấp suất điện động hình sin có biên độ tỷ lệ với tốc độ quay ω của roto, nghĩa là:

$$e = E \sin \Omega t \quad (6.13)$$

trong đó $E = K_1 \omega$, $\Omega = K_2 \omega$ và K_1, K_2 là các thông số đặc trưng cho máy phát.

Giá trị của ω có thể tính được theo E hoặc Ω .



Hình 6.2: Máy phát đồng bộ: a) một pha; b) ba pha.

Xác định ω từ biên độ của suất điện động:

Cuộn cảm ứng có trở kháng trong

$$Z_i = R_i + jL_i \Omega \quad (6.14)$$

trong đó R_i và L_i là điện trở và tự cảm của cuộn dây. Điện áp ở hai đầu cuộn ứng với tải R có giá trị:

$$U = \frac{R_i E}{\sqrt{(R + R_i)^2 + (L_i \Omega)^2}} = \frac{R K_1 \omega}{\sqrt{(R + R_i)^2 + (K_2 L_i \omega)^2}} \quad (6.15)$$

Nói chung điện áp U không phải là hàm tuyến tính của tốc độ quay ω . Để sử dụng máy phát như một cảm biến vận tốc phải thỏa mãn điều kiện $R \gg Z_i$ tức là tải R phải lớn hơn rất nhiều so với trở kháng của cuộn dây, đồng thời tốc độ quay ω của cuộn dây phải rất lớn để sao cho trên thực tế có được $U \cong E$.

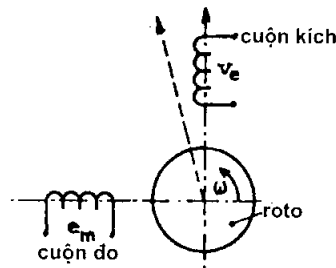
Ở đầu ra điện áp phải được chỉnh lưu để nhận được điện áp một chiều. Điện áp này không phụ thuộc vào chiều quay và hiệu suất lọc giảm đi khi tần số thấp. Ngoài ra, sự có mặt của bộ lọc sẽ làm tăng thời gian đáp ứng của cảm biến. Tốc độ quay có thể được xác định bằng cách đo tần số của suất điện động. Phương pháp này đặc biệt quan trọng khi phải đo trên khoảng cách lớn.

Tín hiệu từ máy phát đồng bộ có thể truyền đi xa và sự suy giảm tín hiệu trên đường đi không ảnh hưởng đến độ chính xác của phép đo (vì đo tần số).

6.1.2.2. Máy phát không đồng bộ

Cấu tạo của máy phát không đồng bộ tương tự như động cơ không đồng bộ hai pha (h. 6.3). Roto là một hình trụ kim loại mảnh và di từ được quay với vận tốc ω cần đo, khối lượng và quán tính của nó không đáng kể. Stato làm bằng tôn từ tính có hai cuộn dây được bố trí như trên hình vẽ. Cuộn dây thứ nhất đóng vai trò cuộn kích được cung cấp điện áp v_e với biên độ V_e và tần số ω_e ổn định:

$$v_e = V_e \cos \omega_e t \tag{6.16}$$



Hình 6.3: Nguyên tắc cấu tạo máy phát không đồng bộ.

Cuộn dây thứ hai gọi là cuộn dây đo. Giữa hai đầu của cuộn này sẽ xuất hiện suất điện động e_m có biên độ tỷ lệ với vận tốc góc cần đo:

$$e_m = E_m \cos (\omega_e t + \phi) = k \omega V_e \cos (\omega_e t + \phi) \tag{6.17}$$

trong đó k là hằng số phụ thuộc vào cấu trúc cụ thể của máy, ϕ là độ lệch pha.

Độ lệch pha ϕ thay đổi vài độ trong dải tốc độ, nhưng khi đổi chiều quay độ lệch pha sẽ thay đổi một lượng bằng π .

6.2. Tốc độ kế điện từ đo vận tốc dài

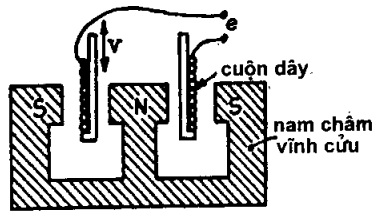
Khi độ dịch chuyển của đối tượng nghiên cứu quá lớn ($>1m$) việc đo vận tốc dài phải chuyển thành đo vận tốc góc. Điều này có thể thực hiện được nhờ sử dụng các bánh lăn hoặc một vật quay sao cho tốc độ quay tỷ lệ với tốc độ dịch chuyển thẳng.

Trong trường hợp dịch chuyển thẳng có biên độ nhỏ, có thể chế tạo cảm biến vận tốc bằng cách kết hợp một nam châm và một cuộn dây, một trong hai sẽ là cố định, còn vật thứ hai gắn với vật chuyển động. Khi đó chuyển động tương đối giữa cuộn dây và nam châm sẽ gây nên trong cuộn dây một suất điện động tỷ lệ với vận tốc cần đo.

Nếu cuộn dây là động, nó sẽ được đặt trong từ trường xuyên tâm của nam châm như biểu diễn trên hình 6.4. Biểu thức của suất điện động xuất hiện trong cuộn dây có dạng:

$$e = 2\pi.r.n.B.v = \ell .B.v \quad (6.18)$$

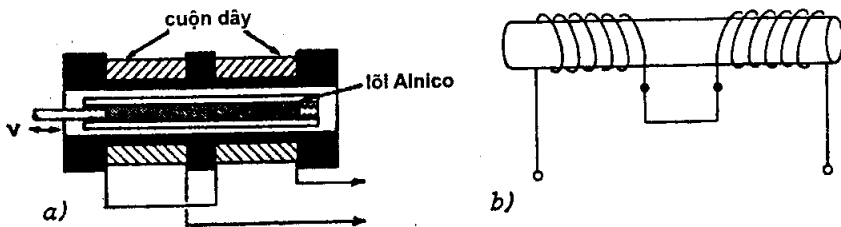
trong đó r là bán kính của vòng dây và n là số vòng dây, ℓ là tổng chiều dài của dây cuốn, B là giá trị của cảm ứng từ và v là tốc độ dịch chuyển của cuộn dây.



Hình 6.4: Cảm biến dùng cuộn dây động.

Tốc độ kế loại này đo được độ dịch chuyển cực đại khoảng vài mm với độ nhạy khoảng 1 V/(m/s).

Khi độ dịch chuyển lớn hơn, tới 0,5 m, nam châm sẽ di chuyển theo trục của hai cuộn dây (h. 6.5).



Hình 6.5: Cảm biến dùng nam châm động.

Trong trường hợp này, khi nam châm chuyển động, suất điện động cảm ứng trong từng cuộn dây sẽ tỷ lệ với tốc độ của nam châm nhưng có dấu ngược nhau vì các cực ngược nhau chuyển động trong hai cuộn dây. Chính vì vậy

hai cuộn dây được đấu nối tiếp và ngược chiều để nhận được suất điện động khác không.

Thí dụ: Cảm biến đo vận tốc dài 7L20VT.Z (Schaevit) có các thông số kỹ thuật như sau:

- Bước chạy cực đại: 500 mm
- Độ nhạy: 8 mV/ (mm/s).

6.3. Tốc độ kế xung đo tốc độ quay

Trong tốc độ kế xung đo tốc độ quay, vật trung gian thường dùng là đĩa gắn liền với trục quay cần đo tốc độ. Đĩa này có cấu tạo tuần hoàn: bề mặt của đĩa được chia thành p phần bằng nhau (chia theo góc ở tâm), mỗi phần mang một dấu hiệu đặc trưng như lỗ, đường vát, răng.

Một cảm biến thích hợp được đặt đối diện với vật trung gian để ghi nhận một cách ngắt quãng mỗi khi có một dấu hiệu đi qua và mỗi lần như vậy nó cung cấp một tín hiệu xung. Biểu thức của tần số f của các tín hiệu xung này được viết dưới dạng:

$$f = p.N \tag{6.19}$$

trong đó f là tần số đo bằng Hz, p là số lượng dấu hiệu trên đĩa và N là số vòng quay của đĩa trong một giây.

Việc lựa chọn loại cảm biến thích hợp để ghi nhận tín hiệu liên quan đến bản chất của vật quay và các dấu hiệu trên đó. Thí dụ:

- Cảm biến từ trở biến thiên sử dụng khi vật quay là sắt từ;
- Cảm biến Hall hoặc cảm biến từ điện trở dùng trong trường hợp vật quay là một hay nhiều nam châm, hoặc khi vật quay tạo thành màn chắn từ một cách tuần hoàn giữa một nam châm bất động và một cảm biến.
- Cảm biến quang cùng một nguồn sáng được dùng khi trên vật trung gian quay có các lỗ, đường vát hoặc mặt phản xạ.

Ưu điểm của tốc độ kế xung:

Tốc độ kế xung có cấu tạo đơn giản, chắc chắn, chịu đựng tốt trong môi trường độc hại (thí dụ như bức xạ hạt nhân). Mặt khác, thông tin thu nhận là tần số nên có khả năng chống nhiễu, chống suy giảm và dễ biến đổi sang dạng số.

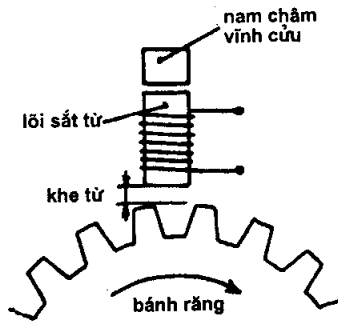
Mạch đo:

Mạch đo bao gồm một máy đo tần số hoặc bộ biến đổi tần số-điện áp. Bộ biến đổi tần số-điện áp bao gồm:

- Tầng phối hợp trở kháng và tạo dạng tín hiệu xung (thí dụ trigger Schmitt).
- Mạch monostable: với mỗi xung do tầng trước cung cấp nó cho một xung có biên độ và độ dài T_0 cố định, T_0 phải nhỏ hơn chu kỳ lặp ngắn nhất.
- Bộ lọc thấp tần có điện áp ra là thành phần một chiều bằng giá trị trung bình của các xung do monostable phát ra và tỷ lệ với $f.T_0$.

6.3.1. Cảm biến từ trở biến thiên

Trong cảm biến từ trở biến thiên cuộn đo có lõi từ chịu tác động của từ trường của một nam châm vĩnh cửu. Cuộn này đặt đối diện với một đĩa quay làm bằng vật liệu sắt từ có khía răng (hoặc bánh răng). Khi đĩa quay, từ trở của mạch từ của cuộn dây biến thiên một cách tuần hoàn làm xuất hiện trong cuộn dây một suất điện động có tần số tỷ lệ với tốc độ quay (h. 6.6).



Hình 6.6: Nguyên lý cấu tạo của cảm biến từ trở biến thiên.

Biên độ E của suất điện động trong cuộn dây phụ thuộc vào hai yếu tố chủ yếu:

- Khoảng cách giữa cuộn dây và đĩa quay: khoảng cách này (chính là khe từ) càng lớn thì biên độ của suất điện động càng nhỏ. Thông thường sự thay đổi khoảng cách này không vượt quá vài mm.
- Tốc độ quay: về nguyên tắc biên độ của suất điện động tỷ lệ thuận với tốc độ quay. Khi tốc độ quay rất nhỏ biên độ sẽ quá bé để có thể phát

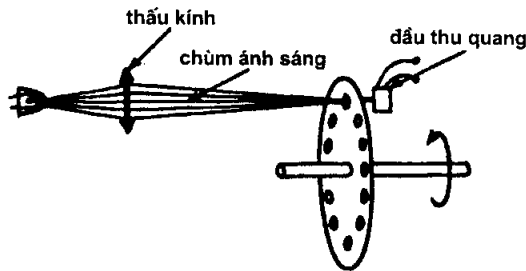
hiện được nó, do vậy có vùng tốc độ “chết” mà ở đó không thể đo được suất điện động. Vùng này càng rộng khi khoảng cách giữa cuộn dây và đĩa càng lớn.

Dải đo của cảm biến từ trở biến thiên phụ thuộc vào số răng p của đĩa. Tốc độ tối thiểu V_{\min} có thể đo được sẽ nhỏ khi p lớn. Tốc độ tối đa V_{\max} có thể đo được càng lớn khi p càng nhỏ. Thí dụ: với đĩa quay có 60 răng dải tốc độ đo được từ 50 vòng/phút đến 500 vòng/phút, còn với đĩa quay có số răng là 15, dải tốc độ đo được nằm trong khoảng từ 500 vòng/phút đến 10000 vòng/phút.

6.3.2. Tốc độ kế quang

Tốc độ kế quang là cảm biến đo vận tốc đơn giản nhất, gồm một nguồn sáng và một đầu thu quang (photodiode hoặc phototransistor).

Vật quay phải có các vùng phản xạ được bố trí tuần hoàn trên một hình tròn được chiếu bằng tia sáng, hoặc là vật được gắn với một đĩa có các phần trong suốt xen kẽ các phần chắn sáng đặt giữa nguồn sáng và đầu thu quang (h. 6.7).



Hình 6.7: Nguyên lý hoạt động của tốc độ kế quang.

Đầu thu quang nhận được một thông lượng biến điệu và nó phát tín hiệu có tần số tỷ lệ với tốc độ quay nhưng biên độ của tín hiệu này không phụ thuộc vào ω .

Phạm vi của tốc độ đo phụ thuộc vào hai yếu tố chính:

- Số lượng lỗ trên đĩa quay;
- Dải thông của đầu thu quang và của mạch điện tử.

Để đo tốc độ nhỏ, thí dụ $\sim 0,1$ vòng/phút, phải dùng đĩa có số lượng lỗ rất lớn ($500 \div 1000$). Trong trường hợp cần đo tốc độ lớn (cỡ $10^5 \div 10^6$

vòng/phút như ở các máy quay li tâm) phải sử dụng loại đĩa quay chỉ có một lỗ, khi đó chính tần số ngắt của mạch điện là đại lượng xác định tốc độ cực đại V_{\max} có thể đo được.

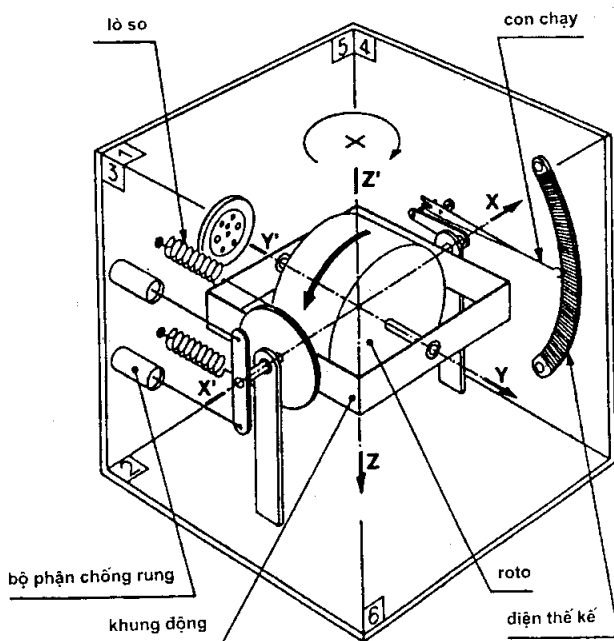
6.4. Đổi hướng kế

Đổi hướng kế là thiết bị được gắn vào vật chuyển động (máy bay, tên lửa) để đo vận tốc góc của vật. Phụ thuộc vào bản chất của hiện tượng vật lý được ứng dụng, người ta phân biệt các loại đổi hướng kế chủ yếu sau đây:

- Đổi hướng kế cơ học dựa trên tính chất của con quay hồi chuyển.
- Đổi hướng kế quang dùng laser và cáp quang dựa trên hiện tượng truyền sóng ánh sáng.

6.4.1. Đổi hướng kế dùng con quay hồi chuyển

Con quay hồi chuyển gồm một roto lắp trên một khung động và được quay quanh trục $Y'Y'$ với tốc độ lớn ($\sim 10^4$ vòng/phút) nhờ một động cơ (h. 6.8).



Hình 6.8: Đổi hướng kế dùng con quay hồi chuyển.

Tốc độ quay ω cân do theo trục $Z'Z$ vuông góc với trục $Y'Y$. Nó làm xuất hiện một ngẫu lực C_g (tỷ lệ với ω) theo hướng $X'X$ vuông góc với hai trục $Y'Y$ và $Z'Z$ và có xu hướng làm cho khung động của con quay hồi chuyển quay theo. Ngẫu lực C_g được cân bằng bởi ngẫu lực đàn hồi C_r do hai lò so gây nên và có giá trị tỷ lệ với góc quay α của khung.

Ở trạng thái cân bằng

$$C_g = C_r \quad (6.20)$$

với $C_r = k \alpha$, k là hằng số đàn hồi của lò so và $C_g = \omega H$, H là mômen động học của roto. Từ đây, góc α được tính bởi biểu thức:

$$\alpha = \omega \frac{H}{k} \quad (6.21)$$

Góc quay α của khung động của con quay hồi chuyển tỷ lệ với vận tốc góc ω cân do. Để tiện cho việc xử lý, góc α được chuyển đổi thành tín hiệu điện nhờ một điện thế kế.

Các thông số của máy đo như sau:

- Dải đo: từ ± 7 °/s đến ± 360 °/s.
- Sai lệch khỏi độ tuyến tính: $< \pm 1,5$ % của dải đo.

6.4.2. Đối hướng kế quang

Nguyên tắc hoạt động:

Khi sóng ánh sáng truyền trong môi trường chuyển động, quãng đường sóng truyền qua theo hướng chuyển động và hướng ngược chiều chuyển động là khác nhau. Thí dụ, xét trường hợp sóng ánh sáng truyền giữa hai gương M_1 , M_2 cách nhau một khoảng bằng L . Nếu hai gương bất động, khoảng cách sóng truyền từ M_1 đến M_2 và từ M_2 đến M_1 bằng nhau:

$$d_{12} = d_{21} = L \quad (6.22)$$

Khi hai gương chuyển động song song với cùng một vận tốc V theo hướng từ M_1 đến M_2 , quãng đường d_{12} tăng lên bởi vì M_2 có xu hướng đi xa mặt sóng:

$$d_{12} = L \left(1 + \frac{V}{c} \right) \quad (6.23)$$

với $V \ll c$, c là vận tốc ánh sáng. Ngược lại, quãng đường d_{21} giảm xuống vì M_1 có xu hướng gần lại với mặt sóng:

$$d_{21} = L \left(1 - \frac{V}{c} \right) \quad (6.24)$$

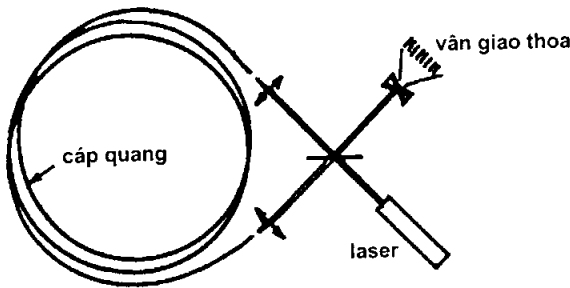
Hiệu của hai quãng đường tỷ lệ với vận tốc V :

$$d_{12} - d_{21} = 2L \cdot \frac{V}{c} \quad (6.25)$$

Khi các sóng truyền theo hai hướng ngược nhau theo chu vi hình tròn bán kính r (chu vi $L = 2\pi r$), và hình tròn quay với tốc độ ω , biểu thức của hiệu hai quãng đường có dạng:

$$d_{12} - d_{21} = 2L \cdot \frac{r\omega}{c} \quad (6.26)$$

Trong trường hợp này hiệu quãng đường đi của sóng cũng tỷ lệ với tốc độ quay cần đo.



Hình 6.9: Đối hướng kế quang dùng laze và cáp quang.

Cách thức chế tạo:

Cho hai chùm tia xuất phát từ cùng một laze truyền theo hai hướng ngược nhau trong một sợi cáp quang quay với vận tốc cần đo (h. 6.9). Khi ra khỏi cáp, hai tia giao thoa. Bằng cách đếm số vân giao thoa ΔZ bị dịch chuyển do cáp quay có thể tính tốc độ quay:

$$\Delta Z = \frac{2Lr\omega}{\lambda c} \quad (6.27)$$

trong đó L là chiều dài cáp quang, λ là bước sóng laze. Đổi hướng kể quang loại này cho phép mở rộng phạm vi đo vận tốc góc về phía giới hạn dưới (tốc độ nhỏ) bằng cách tăng độ dài L của cáp quang khi cuộn nó thành cuộn nhiều vòng.

CHƯƠNG 7

CẢM BIẾN LỰC

Lực được xác định từ định luật cơ bản của động lực học $\vec{F} = M\vec{\gamma}$ trong đó M là khối lượng (kg) chịu tác động của lực \vec{F} (N) gây nên gia tốc γ (ms^{-2}). Xuất phát từ định nghĩa này có thể xác định gia tốc thông qua phép đo lực tác dụng. Phép đo một lực chưa biết được thực hiện bằng cách làm cân bằng lực đó với một lực đối kháng sao cho lực tổng cộng và mômen tổng của chúng bằng không.

Trong cảm biến đo lực thường có một vật trung gian chịu tác động của lực cần đo và bị biến dạng, biến dạng này là nguyên nhân của lực đối kháng: trong giới hạn đàn hồi biến dạng tỷ lệ với lực đối kháng (định luật Hooke).

Biến dạng và lực gây nên biến dạng có thể được đo trực tiếp bằng đầu đo biến dạng, hoặc đo gián tiếp nếu một trong các tính chất điện của vật liệu làm vật trung gian phụ thuộc vào biến dạng (thí dụ vật liệu áp điện và vật liệu từ giảo).

Trọng lượng P của một vật chính là lực tác dụng lên vật đó trong trường trái đất:

$$\vec{P} = M\vec{g} \quad (7.1)$$

trong đó g là gia tốc trọng trường ($\approx 9,8\text{m/s}^2$) phụ thuộc vào độ cao. Đo trọng lượng của một vật thực chất là để xác định khối lượng của vật đó bằng cách cân nó. Ngược lại, sử dụng khối lượng đã biết trong môi trường có g biết trước sẽ có được một lực xác định, đây chính là nguyên tắc chuẩn cảm biến đo lực bằng máy có khối lượng treo. Lĩnh vực ứng dụng của cảm biến ngẫu lực rất rộng. Nó được dùng trong công nghiệp cơ khí, tự động hóa, cơ sinh... Phạm vi đo của chúng có thể từ vài phần mười N cho đến 10^7 N.

7.1. Cảm biến áp điện

7.1.1. Hiệu ứng áp điện

7.1.1.1. Định nghĩa

Hiện tượng áp điện là hiện tượng xuất hiện phân cực điện hoặc thay đổi phân cực điện đã có trong một số chất điện môi tự nhiên (như thạch anh, tuamalin...) hoặc nhân tạo (sulfat liti, thạch anh tổng hợp) khi chúng bị biến dạng dưới tác dụng của một lực có chiều nhất định.

Nếu chế tạo một tụ điện bằng cách phủ hai bản cực lên hai mặt đối diện của một phiến áp điện mỏng và tác dụng một lực lên hai bản cực thì trên hai bản cực đó xuất hiện các điện tích trái dấu, hiệu điện thế giữa hai bản cực tỷ lệ với lực tác dụng. Loại cảm biến có cấu tạo tương tự như vậy cho phép đo lực tác dụng và đo tất cả các đại lượng vật lý gây ra tác động giống như tác động của lực, thí dụ như áp suất, gia tốc, rung. Đó chính là cảm biến áp điện.

Hiệu ứng áp điện là hiệu ứng thuận nghịch. Dưới tác động của điện trường có chiều thích hợp, vật liệu áp điện bị biến dạng. Đặc biệt, vật liệu áp điện có thể bị kích thích đến trạng thái cộng hưởng cơ học rất cao. Tính chất này được ứng dụng rộng rãi để chế tạo máy siêu âm, bộ lọc hoặc bộ điều khiển dao động (thạch anh).

7.1.1.2. Vai trò của đối xứng tinh thể

Trong tất cả các chất điện môi, điện trường tác động sẽ gây nên sự dịch chuyển điện tích liên kết ra khỏi vị trí cân bằng của chúng. Sự xuất hiện hoặc thay đổi mômen lưỡng cực xảy ra đồng thời với sự thay đổi kích thước.

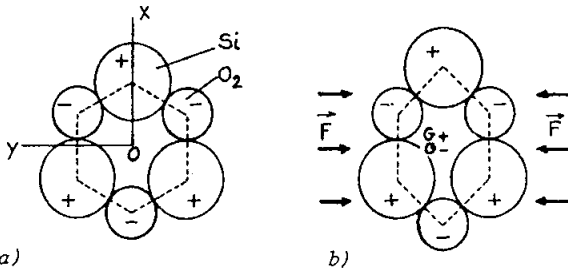
Nếu mạng tinh thể của chất điện môi không có tâm đối xứng, hiệu ứng hình học nói trên là hiệu ứng bậc nhất. Đây là hiệu ứng áp điện ngược, có biên độ lớn hơn rất nhiều so với trường hợp điện giảo. Trong trường hợp đó, thường có phân cực vĩ mô trong vật liệu, gọi là vật liệu phân cực. Sự phân cực này có thể thay đổi không chỉ dưới tác dụng của ứng lực (áp điện thuận) mà còn do thay đổi nhiệt độ và sinh ra hiệu ứng hỏa điện. Tất cả các vật liệu hỏa điện đều có tính áp điện, nhưng không phải là ngược lại, bởi vì hỏa điện đòi hỏi trước đó phải có phân cực vĩ mô.

Trong một số vật liệu hỏa điện, phân cực có thể bị đổi chiều dưới tác dụng của điện trường đặt vào, đó là chất sắt điện, thí dụ BaTiO_3 . Tính sắt điện mất đi khi vượt quá nhiệt độ Curie, $T > T_c$. Trong trường hợp BaTiO_3 , $T_c = 120^\circ\text{C}$.

Nguyên nhân là vì khi nhiệt độ cao hơn T_c tinh thể chuyển pha sang dạng lập phương tâm khối.

Trường hợp thạch anh:

Cơ chế áp điện trong thạch anh có thể được giải thích bằng mô hình cổ điển. Thạch anh là tinh thể SiO_2 , thuộc hệ mặt thoi. Trên hình 7.1 biểu diễn mặt cắt vuông góc với trục quang OZ của ba phân tử SiO_2 , ba phân tử này tạo thành ô mạng cơ sở của thạch anh.



Hình 7.1: Mặt cắt theo hướng vuông góc với trục quang của tinh thể thạch anh: a) không có lực tác dụng; b) lực nén theo hướng OY.

Khi không có ứng lực, các trọng tâm G_+ , G_- của các điện tích dương và âm trùng nhau cho nên mômen lưỡng cực tổng cộng bằng không (h. 7.1a).

Nếu tác dụng lực lên cấu trúc, thí dụ lực nén theo hướng trục OY, cấu trúc sẽ bị biến dạng (h. 7.1b), co lại theo trục OY và dãn ra theo trục OX. Các trọng tâm G_+ của các điện tích dương (Si^+), và G_- của điện tích âm (O^-) không trùng nhau nữa, kết quả là xuất hiện mômen lưỡng cực và các điện tích trên bề mặt, đó là hiệu ứng áp điện.

7.1.2. Vật liệu áp điện

Trong số các vật liệu áp điện, thạch anh được quan tâm hàng đầu bởi tính ổn định và độ cứng cao. Các vật liệu gốm cũng được sử dụng nhiều để thay thế cho các tinh thể áp điện, bởi vì ưu điểm của gốm là dễ sản xuất và giá thành thấp.

Một họ gốm thường dùng là PZT, chúng được chế tạo bằng cách thiêu kết hỗn hợp các ôxít chì, zirconium và titan. Công thức chung của họ vật liệu này là $\text{PbTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$. Giá trị của x, thường xấp xỉ 0,5, quyết định tính chất vật lý và tính chất nhiệt của vật liệu. Ưu điểm chính của gốm PZT như sau:

- Độ nhạy cao;
- Độ thấm thấu điện môi lớn nên cảm biến có điện dung cao và do vậy ít chịu ảnh hưởng của điện dung ký sinh;
- Có thể nén định dạng trong các loại khuôn khác nhau và dễ gia công;
- Độ bền cơ học cao;
- Có thể điều chỉnh nhiệt độ Curie bằng cách thay đổi tỷ lệ thành phần;

Những nhược điểm chính của gốm PZT là:

- Modun áp điện và độ thấm thấu điện môi phụ thuộc vào nhiệt độ.
- Có sự trễ nhiệt, nghĩa là các đặc trưng của gốm phụ thuộc vào chế độ nhiệt trước đó. Đặc tính này làm tăng độ già hóa của vật liệu.

Trong bảng 7.1 trình bày các đặc trưng vật lý của một số vật liệu áp điện.

Bảng 7.1.

Vật liệu	Độ thấm thấu	Điện trở suất ($\Omega.m$)	Modun Young ($10^9 N.m^{-2}$)	Ứng lực cực đại ($10^7 N.m^{-2}$)	Nhiệt độ làm việc T_{max} ($^{\circ}C$)
Thạch anh	$\epsilon_{11}=4,5$	10^{12}	$Y_{11}=80$	10	550
Muối seignette	$\epsilon_{11}=350$	$>10^{10}$	$Y_{11}=19,3$ $Y_{22}=30$ $Y_{33}=30$	1,4	45
L.H.	$\epsilon_{11}=5,6$ $\epsilon_{11}=10,3$ $\epsilon_{11}=6,5$	$>10^{10}$	46	1,5	75
PZT5A	$\epsilon_{11}=1700$	10^{11}	$Y_{33}=53$	7-8	365

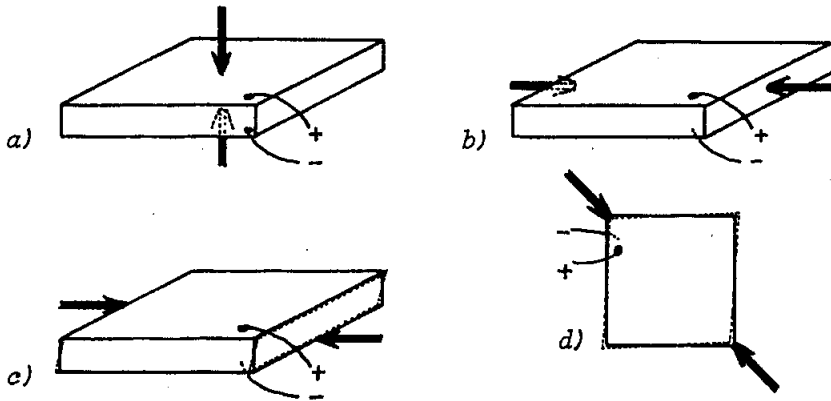
7.1.3. Cấu tạo của cảm biến

Các biến dạng cơ bản và cách ghép nối các bản áp điện:

Các biến dạng cơ bản xác định chế độ làm việc của bản áp điện được biểu diễn trên hình 7.2.

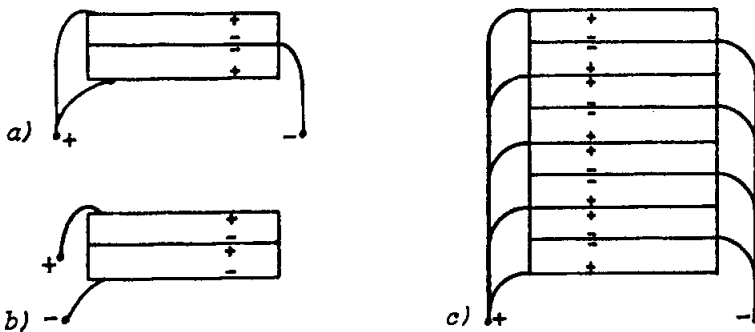
Có nhiều cách ghép hai bản tụ điện. Vì lý do cấu trúc hoặc cơ chế hoạt động của cảm biến (thí dụ dầm uốn) hoặc đơn giản vì độ nhạy, hai phần tử có thể dán với nhau và nối theo cực để nhận được biến dạng cùng chiều hay ngược chiều. Trong trường hợp đầu song song hai bản áp điện được ghép như biểu diễn trên

hình 7.3a, điện tích và điện dung của cảm biến tăng lên gấp đôi so với trường hợp chỉ dùng một bản áp điện. Nếu đầu nối tiếp (h. 7.3b), điện áp hở mạch và



Hình 7.2: Các biến dạng cơ bản của phiến áp điện: a) theo chiều dọc; b) theo chiều ngang; c) cắt theo bề dày; d) cắt theo bề mặt.

trở kháng trong tăng lên gấp đôi, nhưng điện dung thì giảm xuống hai lần. Những nguyên tắc này áp dụng cả cho trường hợp ghép nhiều bản áp điện với nhau như biểu diễn trên hình 7.3c.

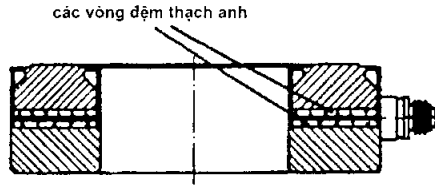


Hình 7.3: Ghép các phân tử áp điện: a) hai phân tử song song; b) hai phân tử nối tiếp; c) nhiều phân tử song song.

Vòng đệm thạch anh:

Các cảm biến áp điện đo lực thường được chế tạo dưới dạng các vòng đệm làm bằng thạch anh (h. 7.4). Chúng chỉ nhạy với lực nén tác dụng dọc theo

trục. Diện tích bề mặt của vòng đệm chịu tác dụng của lực nén quyết định giới hạn trên của dải đo, khoảng từ vài kN (đối với đường kính cỡ cm) đến 10^3 kN (khi đường kính đạt tới 10 cm). Vì vậy các vòng đệm được chế tạo với kích thước đường kính khác nhau để sử dụng cho những dải đo khác nhau. Nếu sử dụng một ứng lực đặt trước bằng hai ốc xiết chặt các vòng đệm



Hình 7.4: Vòng đệm thạch anh.

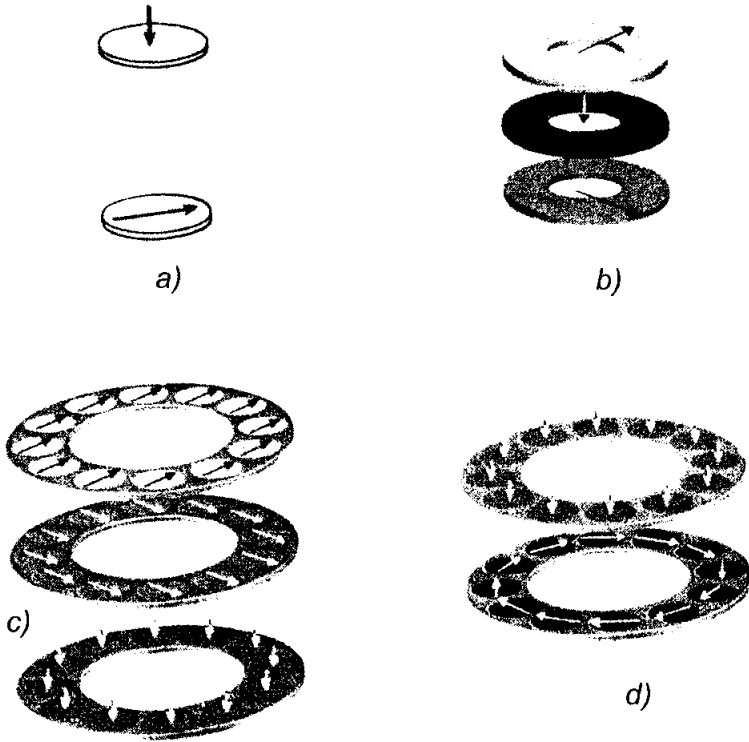
thì có thể mở rộng phạm vi sử dụng cảm biến để đo lực nén và lực kéo. Lực kéo được đo như là sự giảm sút của ứng lực ban đầu. Trong trường hợp này độ nhạy thấp hơn từ 5 đến 10% (so với trường hợp đo lực nén) bởi vì có thêm hệ thống cơ học để tạo ra ứng lực ban đầu.

Cảm biến thạch anh nhiều thành phần:

Có thể dùng vòng đệm thạch anh cắt theo các hướng khác nhau, khi đó, phụ thuộc vào điều kiện sử dụng đặc biệt, chúng chỉ nhạy với một hướng xác định của lực. Thạch anh chỉ có năm hệ số áp điện d_{11} , d_{12} , d_{14} , d_{25} , d_{26} . Một vòng đệm cắt theo X chỉ nhạy với lực nén do có d_{11} , do vậy các lực ký sinh tác động theo cạnh bên đều không gây nên hiệu ứng với vòng đệm, và các ứng lực mà hiệu ứng của chúng liên quan đến d_{12} , d_{14} sẽ không có mặt. Cũng như vậy, một vòng đệm cắt theo Y chỉ nhạy với lực cắt theo bề dày vì có d_{26} , và bằng giải pháp lắp ráp cơ khí hợp lý có thể loại trừ hiệu ứng của các ứng lực liên quan đến hệ số d_{25} (cắt theo bề mặt). Hai mặt cắt đặc biệt này được biểu diễn trên hình 7.5a. Chúng được sử dụng để chế tạo các cảm biến thạch anh nhiều thành phần.

Cảm biến thạch anh ba thành phần (h. 7.5b) là một hình trụ gồm ba cặp vòng tròn ghép với nhau, một cặp nhạy với lực nén F_x còn hai cặp kia nhạy với lực cắt F_y và F_z theo hướng vuông góc với F_x .

Cảm biến thạch anh ba thành phần cũng hoạt động theo nguyên tắc trên nhưng mỗi vòng tròn được trang bị nhiều vòng đệm có cùng chức năng và mắc song song về điện (h. 7.5c).



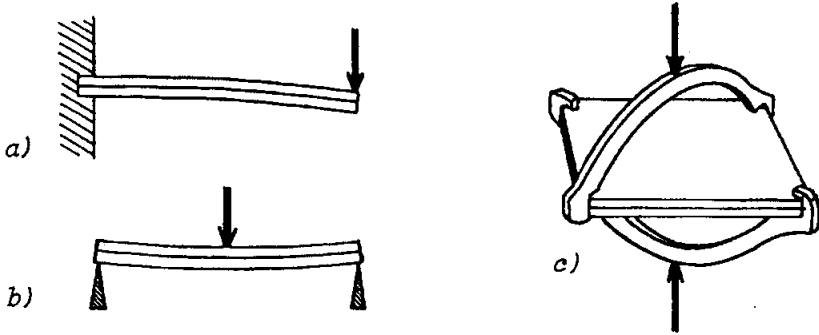
Hình 7.5: Cảm biến thạch anh nhiều thành phần: a) ký hiệu các phiến cắt đặc biệt; b,c) cảm biến ba thành phần vuông góc; d) cảm biến hai thành phần \vec{F} và \vec{M} .

Cảm biến hai thành phần, lực nén \vec{F} và mômen \vec{M} biểu diễn trên hình 7.5d. Để đo mômen, các vòng đệm nhạy với lực cắt được ghép thành vòng tròn sao cho trục nhạy cảm của chúng đặt theo phương tiếp tuyến với chu vi vòng tròn. Trong những cảm biến loại này cần phải có ngẫu lực đặt trước vào các thành phần theo hướng của trục bởi vì các lực cắt được truyền bằng ma sát.

Cảm biến độ nhạy cao:

Đôi khi cảm biến áp điện còn được dùng để đo các lực rất nhỏ. Trong những trường hợp như vậy có thể sử dụng các cấu trúc dạng dầm (h. 7.6a) hoặc dạng xà (h. 7.6b). Các cấu trúc này có cấu tạo gồm hai tấm ghép lại với nhau. Khi có lực tác dụng lên cảm biến, một tấm bị dãn ra trong khi tấm khác bị co lại.

Để đo lực cắt theo bề mặt phải dùng các tấm mỏng ghép như ở hình 7.6c.

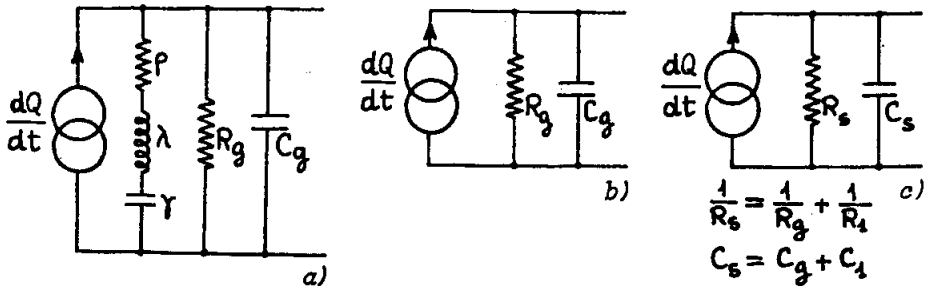


Hình 7.6: Nguyên lý cấu tạo của cảm biến độ nhạy cao: a) dây; b) xà; c) tấm xoắn.

7.1.4. Sơ đồ đo

Sơ đồ tương đương của cảm biến:

Sự dịch chuyển của điện tích $Q = KF$ khi tác dụng lực F lên bản áp điện có liên quan đến dòng điện dQ/dt . Do điện tích ban đầu Q bằng không nên có



Hình 7.7: Sơ đồ tương đương của cảm biến áp điện:

a) dải rộng; b) trong dải thông có ích; c) cảm biến nối với mạch ngoài (tương đương với điện trở R_l mắc song song với tụ điện C_l).

thể biểu diễn cảm biến (là nguồn điện tích) như một nguồn dòng $i = dQ/dt$. Nguồn dòng này mắc song song với trở kháng trong (gồm ba nhánh) của cảm biến (h. 7.7a).

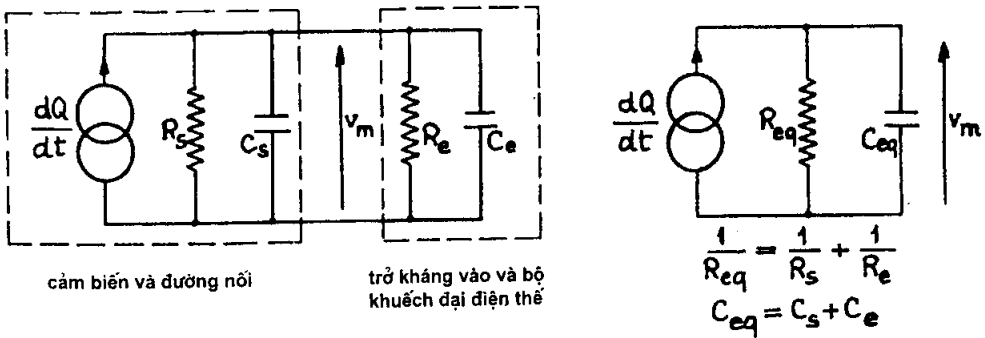
Nhánh ρ , λ , γ đặc trưng cho cộng hưởng điện cơ thứ nhất ở tần số cao nằm ngoài dải thông của cảm biến. Điện trở R_g là điện trở cách điện của vật liệu

áp điện, ở tần số thấp nó trở thành trở kháng trong của cảm biến. Tụ điện C_g gán cho điện dung của máy phát điện tích, khi ở tần số trung bình và tần số cao nó trở thành trở kháng trong của cảm biến.

Trên thực tế người ta sử dụng mạch tương đương như trên hình 7.7b. Ngoài ra, vì cảm biến được nối với một đường dẫn mạch ngoài, các phần tử điện trở và tụ điện tương đương của đường này trong vùng tần số có ích sẽ được ghép song song thành mạch tương đương cùng bản chất (h. 7.7c).

Sơ đồ khuếch đại điện áp:

Trở kháng vào của khuếch đại điện áp tương đương với một tụ điện C_e mắc song song với điện trở R_e sao cho sơ đồ tương đương tổng thể nhận được vẫn có cùng bản chất (h. 7.8).



Hình 7.8: Sơ đồ tương đương của cảm biến áp điện mắc nối tiếp với bộ khuếch đại điện thế.

Điện áp V_m ở lối vào của khuếch đại được biểu diễn bằng công thức:

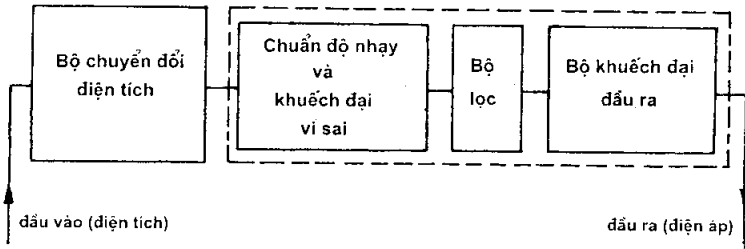
$$V_m = \frac{Q}{C_q} \cdot \frac{R_{eq} \cdot C_{eq} \cdot P}{1 + R_{eq} \cdot C_{eq} \cdot P} \quad (7.2)$$

Đối với tần số lớn hơn $f_c = 1/(2\pi R_{eq} \cdot C_{eq})$ mối quan hệ giữa điện áp và điện tích có dạng:

$$\frac{V_m}{Q} = \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_g + C_1 + C_c} \quad (7.3)$$

Sơ đồ khuếch đại điện tích:

Trong mạch khuếch đại điện tích, sự di chuyển của điện tích ở lối vào sẽ gây nên ở lối ra một điện áp tỷ lệ với điện tích đầu vào. Bộ khuếch đại điện tích (h. 7.9) gồm một bộ chuyển đổi điện tích-điện áp đầu vào, một tầng chuẩn độ nhảy và khuếch đại ví sai, một bộ lọc trung gian và một số tầng khuếch đại ở đầu ra để cung cấp tín hiệu ra. Sơ đồ mạch ghép nối cảm biến với bộ chuyển đổi điện tích-điện áp biểu diễn trên hình 7.10.

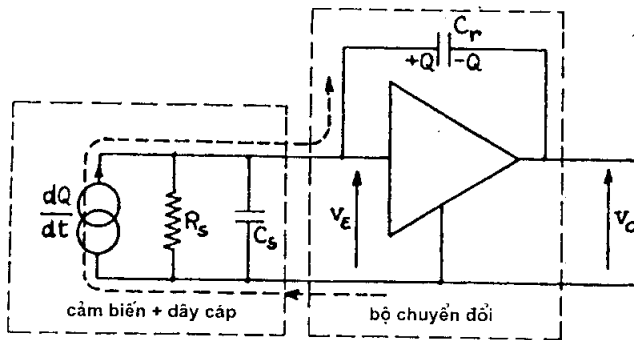


Hình 7.9: Sơ đồ khối của bộ khuếch đại điện tích.

Điện tích Q được đưa đến tụ C_r làm cho tụ này tích điện. Trên bản cực của tụ xuất hiện một điện áp tỷ lệ với điện tích Q .

Giả thiết hệ số khuếch đại vô cùng lớn, điện áp đầu vào V_E sẽ giảm xuống đến 0. Trở kháng vào của bộ chuyển đổi lý tưởng cũng sẽ bằng không, khi đó sẽ tính được hệ số khuếch đại chuyển đổi:

$$\frac{V_0}{Q} = -\frac{1}{C_r} \tag{7.4}$$



Hình 7.10: Mạch ghép nối cảm biến với bộ chuyển đổi điện tích-điện áp.

7.2. Cảm biến từ giảo

Dưới tác động của từ trường các chất sắt từ thay đổi tính chất hình học (thay đổi kích thước kéo theo hoặc không kèm theo sự thay đổi thể tích) hoặc cơ học (hệ số Young). Đây là hiệu ứng từ giảo, nó được ứng dụng để chế tạo các bộ chuyển đổi siêu âm hoặc các phần tử sắt từ hoạt động ở chế độ cộng hưởng cơ học.

Mọi ứng lực trong vật liệu do lực cần đo gây nên sẽ làm thay đổi đường cong từ hóa và người ta có thể khai thác sự thay đổi của độ từ thẩm hoặc của từ dư để đánh giá độ lớn của lực.

Cơ chế từ hóa:

Trong vật liệu sắt từ, mỗi nguyên tử được đặc trưng bởi mômen từ. Để giảm thiểu năng lượng tổng cộng của chất sắt từ, mômen từ của các nguyên tử trong một domen phải hướng theo một hướng chung. Hướng chung này phải định vị theo một số hướng ưu tiên của mạng tinh thể, gọi là hướng dễ từ hóa. Vật liệu sắt từ được chia thành các domen từ (kích thước từ 10^{-1} đến $10^3 \mu\text{m}$). Trong mỗi domen, các mômen sắp xếp song song với nhau theo hướng dễ từ hóa, và hướng dễ từ hóa của các domen cạnh nhau là khác nhau.

Chu trình từ hóa:

Quá trình từ hóa đến bão hòa của chất sắt từ dưới tác dụng của từ trường H theo một hướng xác định và có biên độ tăng dần xảy ra theo ba giai đoạn (h. 7.11a).

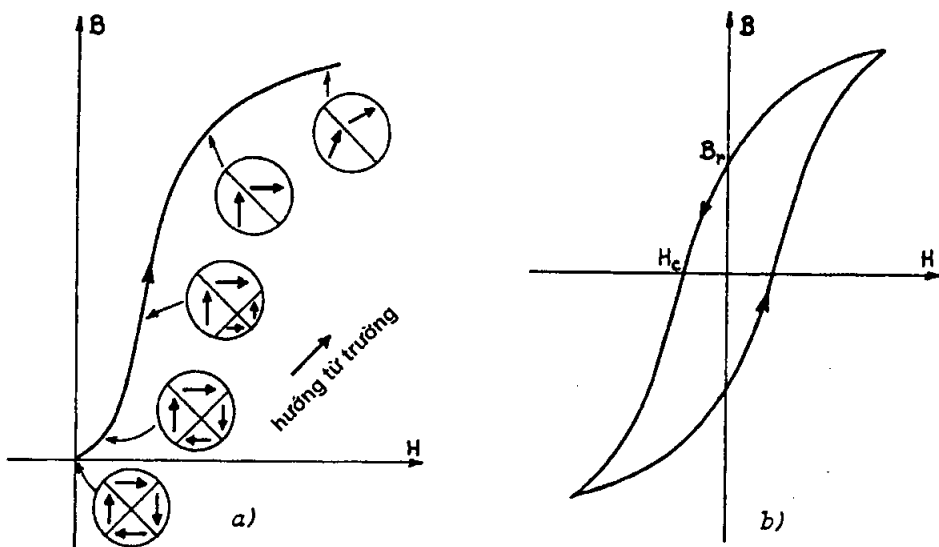
Khi từ trường H nhỏ, các vách domen dịch chuyển đồng thời với sự tăng dần kích thước domen có hướng từ hóa thuận lợi trùng với hướng từ trường bên ngoài.

Khi từ trường H đạt giá trị trung bình sẽ xảy ra hiện tượng đảo hướng của các domen theo hướng từ trường tác động bên ngoài.

Khi từ trường bên ngoài đủ mạnh nó sẽ làm quay hướng dễ từ hóa của các domen theo hướng từ trường tác động dẫn đến bão hòa.

Hiện tượng từ trễ:

Sau khi từ hóa lần đầu đạt đến bão hòa ($H = H_m$), nếu vẫn giữ nguyên hướng từ trường và thực hiện một chu kỳ khép kín ($H_m, 0, -H_m, 0$) sẽ nhận được đường từ hóa như trên hình 7.11b gọi là đường cong từ trễ với từ dư B_r và kháng từ H_c .



Hình 7.11: Đường cong từ hóa: a) cơ chế từ hóa lần đầu; b) chu trình từ trễ.

Từ giảo:

Khi có ứng lực bên ngoài làm thay đổi kích thước mạng tinh thể, các hướng dễ từ hóa bị thay đổi làm thay đổi định hướng của các miền từ (domen) và vách của chúng, nghĩa là thay đổi tính chất từ của vật liệu. Đây là hiệu ứng từ giảo nghịch.

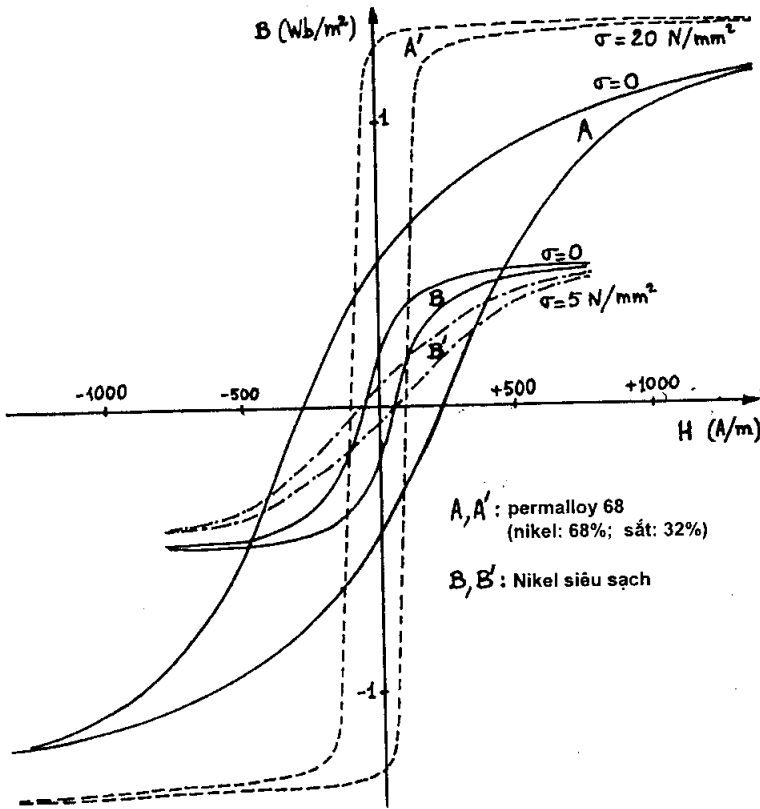
Từ dư B_r và độ từ thẩm μ phụ thuộc vào vật liệu và vào dấu của ứng lực σ tác dụng. Trên hình 7.12 mô tả ảnh hưởng của ứng lực đến đường cong từ hóa của permalloy 68 (Ni 68%, Fe 32%).

Cảm biến từ thẩm biến thiên

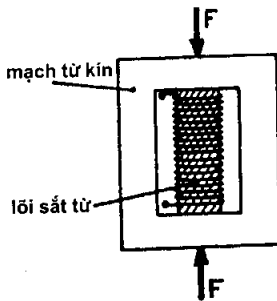
Sự thay đổi của độ từ thẩm μ dưới ảnh hưởng của ứng lực dẫn đến sự thay đổi của độ tự cảm L của cuộn dây.

Xét trường hợp cảm biến độ tự cảm biến thiên biểu diễn trên hình 7.13. Cảm biến có cấu tạo gồm một cuộn dây có lõi bị biến dạng dưới tác dụng của lực cần đo.

Sự thay đổi $\Delta\mu$ của độ từ thẩm trung bình của lõi cùng với sự thay đổi từ trở của nó sẽ xác định sự thay đổi ΔL của độ tự cảm L của cuộn dây.



Hình 7.12: Sự biến dạng của đường cong từ hóa dưới tác dụng của lực kéo.



Hình 7.13: Cảm biến từ giảo dựa trên hiệu ứng độ tự cảm biến thiên.

Sự thay đổi tương đối của L , R hoặc μ tỷ lệ với ứng lực σ , tức là với lực F cần đo:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = -\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} = K\sigma \quad (7.5)$$

Cảm biến từ dư biến thiên:

Phần tử cơ bản của cảm biến từ dư biến thiên là một lõi sắt có từ dư B_r . Lõi từ này thường được làm bằng nikel có độ tinh khiết cao. Dưới tác dụng của lực cần đo, thí dụ lực nén $d\sigma < 0$, B_r tăng lên:

$$\frac{dB_r}{d\sigma} = -1,5 \cdot 10^{-9} \frac{Wb \cdot m^{-2}}{N \cdot m^{-2}} \quad (7.6)$$

Sự thay đổi của từ thông sẽ làm xuất hiện trong cuộn dây một suất điện động tỷ lệ với dB_r/dt . Biểu thức của điện áp đo hở mạch có dạng:

$$V_m = K \frac{dB_r}{dt} = K \frac{dB_r}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt} \quad (7.7)$$

trong đó K là hệ số tỷ lệ với số vòng dây và tiết diện của vòng dây.

Đây là loại cảm biến tích cực, việc sử dụng chúng giới hạn ở chế độ động bởi vì chỉ cần đo sự thay đổi $d\sigma/dt$ của ứng suất theo thời gian.

7.3. Cảm biến lực dựa trên phép đo độ dịch chuyển

Trong các cảm biến loại này, lực được đặt lên vật trung gian và gây nên sự thay đổi kích thước Δl của nó. Sự thay đổi kích thước có thể đo bằng một cảm biến dịch chuyển. Tỷ lệ giữa tín hiệu ra V_m và lực tác dụng được biểu diễn bằng biểu thức:

$$\frac{V_m}{F} = \frac{V_m}{\Delta l} \frac{\Delta l}{F} \quad (7.8)$$

trong đó:

- $V_m/\Delta l$ gọi là tỷ số truyền đạt của cảm biến.
- $\Delta l/F$ gọi là độ mềm của vật trung gian. Độ mềm càng lớn thì độ nhạy càng cao.

Vật trung gian:

Các cảm biến loại này thường dùng để đo các lực tương đối nhỏ cho nên vật trung gian phải có độ mềm lớn. Các vật trung gian thường sử dụng là các

vòng đo lực hoặc các dầm dạng console. Đôi khi người ta còn sử dụng các lò so cho những mục đích này. Trên hình 7.14 biểu diễn ảnh hưởng của kích thước lò so đến hệ số ứng lực của lò so khi sử dụng nó làm vật trung gian. Đường kính vòng xoắn của lò so và đường kính dây cuốn lò so phải phù hợp để sao cho độ mềm của lò so đạt giá trị mong muốn. Độ mềm càng lớn thì càng mở rộng giới hạn dưới của giải đo.

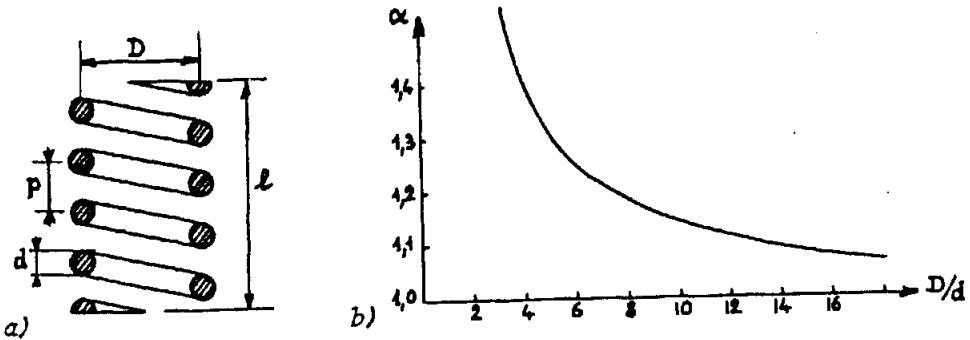
Đối với vật trung gian là lò so, khi $p < D/3$, độ mềm được biểu diễn bởi công thức:

$$\frac{\Delta l}{F} = \frac{8nD^3}{Gd^4}$$

trong đó G là modun cắt của vật liệu làm lò so:

$$G = \frac{Y}{2(\nu + 1)}$$

Như vậy, nếu biết kích thước và vật liệu làm lò so, từ Δl có thể tìm được F .



Hình 7.14: Lò so dùng làm vật trung gian: a) mặt cắt; b) sự phụ thuộc của hệ số ứng lực vào kích thước hình học.

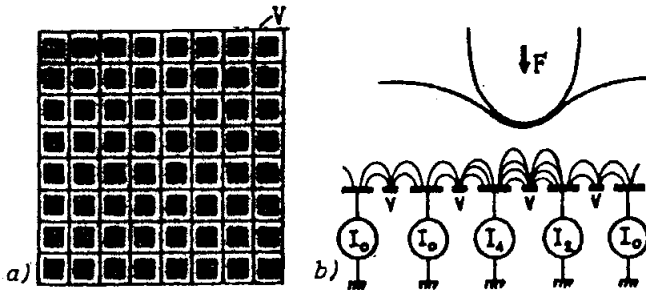
Cảm biến dịch chuyển:

Tùy theo điều kiện sử dụng và yêu cầu, có thể dùng nhiều loại cảm biến dịch chuyển khác nhau để đo ứng lực:

- Điện thế kế điện trở, khi cần có thể kết hợp với khuếch đại cơ.
- Cảm biến cảm ứng từ trở biến thiên.
- Cảm biến tụ điện.

7.4. Cảm biến xúc tác - da nhân tạo

Đây là loại cảm biến dùng trong tự động hóa. Cấu tạo của cảm biến gồm một đế cách điện trên đó có một lưới dẫn điện (h. 7.15a) được đặt dưới điện áp V . Lưới này gồm hai hệ thống dây dẫn (X_1, X_2, \dots) và (Y_1, Y_2, \dots) vuông góc với nhau tạo thành những ô vuông nhỏ. Mỗi ô vuông đều có một điện cực đo được cách điện với dây dẫn (của lưới) bao quanh nó. Các điện cực này nối đất thông qua mạch đo dòng. Mặt trên của hệ thống được phủ cao su



Hình 7.15: Cảm biến xúc tác: a) hệ thống điện cực đo; b) tác dụng của lực lên điện cực.

có pha các hạt dẫn điện. Khi có lực nén tác dụng lên một phần nào đó của tấm cao su, khoảng cách giữa các hạt dẫn điện ở phần đó ngắn lại, điện trở giảm xuống, và dòng điện tăng lên (h. 7.15b). Tọa độ của vùng có dòng điện tăng sẽ xác định vị trí của lực tác dụng, và trị số của dòng xác định độ lớn của lực.

CHƯƠNG 8

CẢM BIẾN GIA TỐC VÀ RUNG

8.1. Khái niệm chung

Theo nguyên lý cơ bản của cơ học, gia tốc là mối quan hệ giữa lực và khối lượng. Mọi cảm biến gia tốc đều dựa trên một hiện tượng vật lý nào đó và sử dụng mối quan hệ lực-khối lượng để nhận được đại lượng điện hoặc thông tin về gia tốc cần đo.

Cảm biến gia tốc được phân chia thành nhiều loại khác nhau phụ thuộc vào hiện tượng vật lý mà nó áp dụng và vào việc chúng cho phép đo trực tiếp một lực (cảm biến áp điện, cảm biến cân bằng ngẫu lực) hoặc đo gián tiếp thông qua sự biến dạng hay dịch chuyển của vật trung gian.

Người ta cũng có thể phân chia cảm biến gia tốc theo các hiện tượng mà cảm biến được sử dụng để phân tích. Dải tần số có ích của các hiện tượng này xác định dạng cảm biến thích hợp để nâng cao độ chính xác.

8.1.1. Dải gia tốc

Tùy theo mức gia tốc và dải tần mà người ta phân biệt các điều kiện thực nghiệm khác nhau:

1- Đo gia tốc chuyển động của một khối lượng nào đó (máy bay, tên lửa, ô tô, tàu thủy...) trong đó chuyển động của trọng tâm luôn giữ ở tần số tương đối thấp (từ 0 đến vài chục Hz) thường liên quan đến các gia tốc nhỏ.

Các cảm biến thích hợp dựa trên các hiện tượng cho phép đo chính xác một đại lượng có tần số "bằng không" tương ứng với một giá trị liên tục trong khi đo, gọi là cảm biến gia tốc khiên chế. Đây là các cảm biến gia tốc đo dịch chuyển (cảm ứng, tụ điện, điện kế quang) và cảm biến gia tốc đo biến dạng.

Cấp chính xác của chúng phụ thuộc vào công nghệ chế tạo và thay đổi trong khoảng từ 10^{-4} đến 1.

2- Đo gia tốc rung của cấu trúc cứng hoặc cấu trúc có khối lượng lớn cần phải sử dụng cảm biến có dải tần đạt tới hàng trăm Hz đồng thời phải cho phép đo gia tốc không đổi hoặc gần như không đổi với bộ giảm rung thích hợp.

Cảm biến gia tốc thường sử dụng là loại từ trở biến thiên, đầu đo biến dạng kim loại hoặc áp điện trở. Cấp chính xác cỡ 10^{-2} nhưng lĩnh vực ứng dụng rất rộng rãi vì chúng cho phép đo đồng thời ở cả hai chế độ tĩnh và động.

3- Đo gia tốc rung mức trung bình và dải tần tương đối cao ($\sim 10\text{kHz}$) thường được tiến hành khi vật có khối lượng nhỏ nên đòi hỏi cảm biến gia tốc phải có độ chính xác cao, sử dụng loại áp trở hoặc áp điện, cấp chính xác 10^{-2} .

4- Khi đo va đập có gia tốc dạng xung ở mức độ cao đòi hỏi cảm biến gia tốc phải có dải thông rộng cả về hai phía tần số thấp và tần số cao.

8.1.2. Chuyển động rung

Độ rung trong công nghiệp có tầm quan trọng đặc biệt vì các lý do sau đây:

- Các qui định hiện hành giới hạn biên độ của rung động để tránh gây tiếng ồn nguy hại đến sức khỏe.
- Mức rung có thể có hại cho an toàn công trình về thời gian sống và hiệu suất của thiết bị.
- Rung động làm thay đổi phổ tần dẫn đến trạng thái mài mòn và mối các chi tiết cơ khí cho nên đo gia tốc và độ rung giúp người quản lý có kế hoạch bảo dưỡng phòng ngừa hỏng hóc thiết bị.

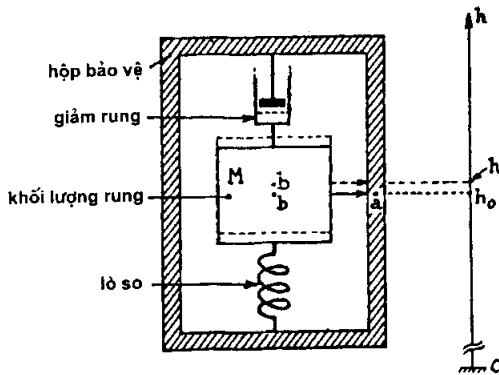
Độ rung được đặc trưng bởi độ dịch chuyển, tốc độ hoặc gia tốc ở các điểm xác định trên vật rung. Bởi vậy khi đo rung động của một vật người ta đo một trong các đặc trưng nêu trên của độ rung.

Trong các máy đo gia tốc thường sử dụng các cảm biến thích hợp để đo độ rung và va đập. Khi đo gia tốc người ta có thể xác định được tốc độ và quãng đường dịch chuyển của vật bằng cách lấy tích phân một lần hoặc tích phân kép. Cảm biến đo gia tốc là cảm biến chuyển động không cần có điểm mốc, chúng khác với cảm biến dịch chuyển bởi vì khi xác định độ dịch chuyển của một vật người ta phải đo chuyển động tương đối của vật đó so với một vật khác cố định lấy làm mốc.

8.1.3. Nguyên lý cảm biến rung động

Nói chung, tùy theo dải tần số, cảm biến rung động được cấu tạo từ một loại cảm biến dịch chuyển, cảm biến tốc độ hoặc cảm biến gia tốc. Sơ đồ nguyên lý của cảm biến được biểu diễn trên hình 8.1

Cảm biến gồm một bộ phận cơ khí (tinh thể áp điện hoặc lò xo) nối với khối lượng rung và tất cả được đặt chung trong một chiếc hộp. Chuyển động rung của khối lượng M được chuyển thành tín hiệu điện là đại lượng thứ cấp m_2 cần đo.



Hình 8.1: Sơ đồ nguyên lý cảm biến địa chấn (dùng khối lượng rung)

Có thể xem cấu trúc này giống như một hệ cơ khí có một mức tự do. Các ký hiệu trên hình vẽ như sau:

h_0 - tung độ điểm a của vỏ hộp;

h - tung độ điểm b của khối lượng rung;

Khi không có gia tốc tác động lên vỏ hộp, b ở cùng độ cao với a. Gọi z là độ dịch chuyển tương đối của khối lượng M so với vỏ:

$$z = h - h_0 \quad (8.1)$$

Khi đó phương trình cân bằng giữa phản lực Cz , lực ma sát nhớt $F \frac{dz}{dt}$ và lực Md^2h/dt^2 do gia tốc của khối lượng M gây nên sẽ có dạng:

$$M \frac{d^2h}{dt^2} = -F \frac{dz}{dt} - Cz \quad (8.2)$$

nghĩa là:

$$-M \frac{d^2 h_0}{dt^2} = M \frac{d^2 z}{dt^2} + F \frac{dz}{dt} + Cz \quad (8.3)$$

Từ đây có thể thấy rằng cấu tạo của loại cảm biến để đo đại lượng sơ cấp m_1 (độ dịch chuyển h_0 , vận tốc dh_0/dt hoặc gia tốc d^2h_0/dt^2) phụ thuộc vào đại lượng được chọn để làm đại lượng đo thứ cấp m_2 (z , dz/dt , d^2z/dt^2) và dải tần số làm việc. Dải tần này quyết định số hạng nào trong vế phải của phương trình chiếm ưu thế, Cz , Fdz/dt hay Md^2h/dt^2 .

Độ nhạy S của cảm biến có thể tính bằng tỷ số giữa đại lượng điện đầu ra s và đại lượng đo sơ cấp m_1 , $S = S_1 \cdot S_2$, trong đó:

$$S_1 = \frac{m_2}{m_1} \text{ là độ nhạy cơ của đại lượng đo sơ cấp;}$$

$$S_2 = \frac{s}{m_2} \text{ là độ nhạy của cảm biến thứ cấp.}$$

Trên thực tế các cảm biến thứ cấp thường sử dụng là:

- Cảm biến vị trí tương đối của khối lượng rung M hoặc phản lực (phần tử áp điện), hoặc biến dạng (đầu đo áp trở).
- Cảm biến đo tốc độ tương đối.

Dùng toán tử Laplace p có thể mô tả hoạt động của cảm biến rung bằng biểu thức sau:

$$-M p^2 h_0 = M p^2 z + F p z + C z \quad (8.4)$$

hoặc

$$\frac{z}{h_0} = \frac{-p^2 / \omega_0^2}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + 2\zeta \frac{p}{\omega_0} + 1} \quad (8.5)$$

với:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{M}} = 2\pi f_0 \text{ là tần số riêng của } M \text{ trên lò xo có độ cứng } C;$$

$$\zeta = \frac{F}{2\sqrt{CM}} \text{ là hệ số tắt dần.}$$

Các tính toán trên đây tương ứng với cảm biến dịch chuyển thẳng nhưng cũng có thể làm tương tự cho cảm biến dịch chuyển góc.

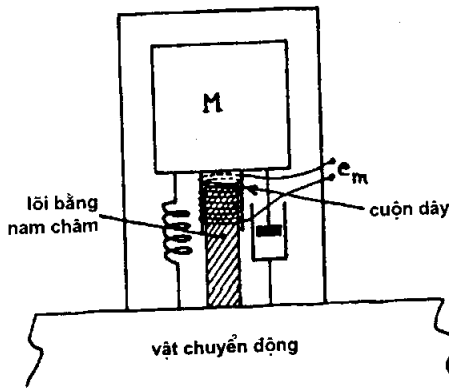
Cảm biến đo tốc độ rung

Có thể đo tốc độ rung của một cấu trúc, dh_0/dt (ký hiệu là ph_0), thông qua dịch chuyển tương đối z như là đại lượng đo thứ cấp. Độ nhạy sơ cấp S_1 được biểu diễn bằng biểu thức:

$$S_1 = \frac{m_2}{m_1} = \frac{z}{ph_0} = \frac{-p/\omega_0^2}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + 2\zeta \frac{p}{\omega_0} + 1} \quad (8.6)$$

trong đó $m_1 = h_0$ và $m_2 = z$. Để tiện lợi, người ta thường sử dụng đại lượng đo thứ cấp m_2 là tốc độ tương đối dz/dt . Khi đó độ nhạy S_1 có dạng giống như trường hợp cảm biến khối lượng rung đo theo dịch chuyển.

Việc chuyển đổi tốc độ tương đối của khối lượng so với vỏ hộp thành tín hiệu điện thực hiện nhờ một cuộn dây gắn với khối lượng rung. Bên trong cuộn dây là một lõi từ gắn với vỏ của cảm biến (h. 8.2). Bằng cách đo suất điện động của cuộn dây có thể đánh giá được tốc độ rung cần đo.



Hình 8.2: Sơ đồ nguyên lý cảm biến đo tốc độ rung.

Phản ứng của cảm biến thứ cấp này đối với khối lượng rung không thể bỏ qua. Nó thể hiện ở phản lực $f=B.l.i$ tác động lên cuộn dây, bởi vì cuộn dây với tổng độ dài dây cuốn là l chuyển động trong từ trường cảm ứng B sẽ dòng điện i chạy qua:

$$i \cong \frac{e_m}{R} = \frac{B.l}{R} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (8.7)$$

Giả thiết rằng có thể bỏ qua trở kháng $L\omega$ của cuộn dây so với điện trở tổng cộng R của mạch trong đó có cả điện trở của cuộn dây, khi đó phản lực f tỷ lệ thuận với tốc độ:

$$f = (B.l)^2 \cdot \frac{1}{R} \frac{dz}{dt} \quad (8.8)$$

Lực này chống lại chuyển động của khối lượng rung và đóng góp vào độ lớn của hệ số đặc trưng cho sự tắt dần của chuyển động này.

8.2. Các đặc trưng của máy đo gia tốc áp điện và áp trở

8.2.1. Độ nhanh

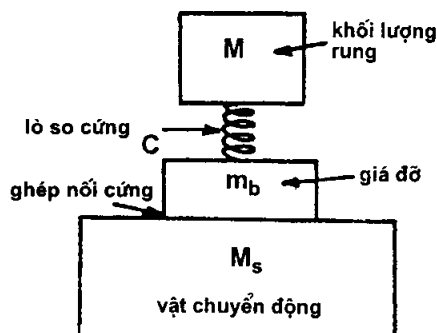
Tần số riêng:

Tần số riêng hoặc tần số không tắt dần là đại lượng đặc trưng cho hoạt động của cảm biến, tương đương với khái niệm tần số riêng của con lắc. Trên thực tế có hai trường hợp xảy ra.

Trường hợp máy đo gia tốc treo trong không khí bao gồm khối lượng rung M , lò so có độ cứng C , bộ đỡ và vỏ bọc có khối lượng m_b , tần số dao động riêng có dạng:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m_b} \right)} \quad (8.9)$$

Trường hợp máy đo gia tốc gắn trên cấu trúc cần nghiên cứu có khối lượng M_s biểu diễn trên hình 8.3.



Hình 8.3: Sơ đồ nguyên lý máy đo gia tốc gắn trên khối lượng nghiên cứu.

Nếu máy đo gắn liền với vật nghiên cứu thì khối lượng M_s và m_b cộng lại với nhau và tần số riêng của máy đo sẽ là:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m_b + M_s} \right)} \quad (8.10)$$

Tần số cộng hưởng f_r :

Tần số cộng hưởng là tần số mà ở đó biên độ đáp ứng là cực đại. Tần số cộng hưởng liên hệ với tần số riêng bởi biểu thức:

$$f_r = f_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (8.11)$$

f_r và f_0 có giá trị bằng nhau khi hệ số tắt dần ζ nhỏ. Thí dụ, máy đo gia tốc áp điện loại 4370 (Bruel & Kjaer) có: $f_0=28\text{kHz}$, $m_b=25\text{g}$, $M=29\text{g}$; với $M_s=300\text{g}$ $f_r=19,8\text{kHz}$.

8.2.2. Độ tinh tế

Khi gia tốc kế có khối lượng M_c gắn trên cấu trúc khối lượng M_s nó sẽ làm thay đổi chuyển động của cấu trúc và do đó làm thay đổi đại lượng đo. Khi có gia tốc kế gắn lên khối lượng, lực tác dụng lên cấu trúc vẫn không đổi, do đó gia tốc γ khi không có gia tốc kế và γ' khi có gắn gia tốc kế sẽ khác nhau:

$$F = M_s \cdot \gamma = (M_s + M_c) \gamma' \quad (8.12)$$

nghĩa là

$$\gamma' = \gamma \frac{M_s}{M_s + M_c} \quad (8.13)$$

Như vậy sự có mặt của gia tốc kế làm giảm gia tốc của vật. Ngoài ra việc gắn gia tốc kế lên một vật mảnh và nhẹ sẽ gây nên độ cứng cục bộ tại chỗ gắn. Độ cứng cục bộ này làm thay đổi chuyển động và tần số cộng hưởng của vật. Vì những lý do trên người ta lấy tỷ số giữa khối lượng M_c và diện tích bề mặt s của vùng gắn cảm biến với cấu trúc để đặc trưng cho ảnh hưởng của cảm biến đến cấu trúc cần đo gia tốc và gọi là độ tinh tế của cảm biến. Độ tinh tế không quy ra đơn vị diện tích, thí dụ: độ tinh tế của gia tốc kế loại J312 bằng $15/2 \text{ g/cm}^2$.

8.3. Máy đo gia tốc áp điện

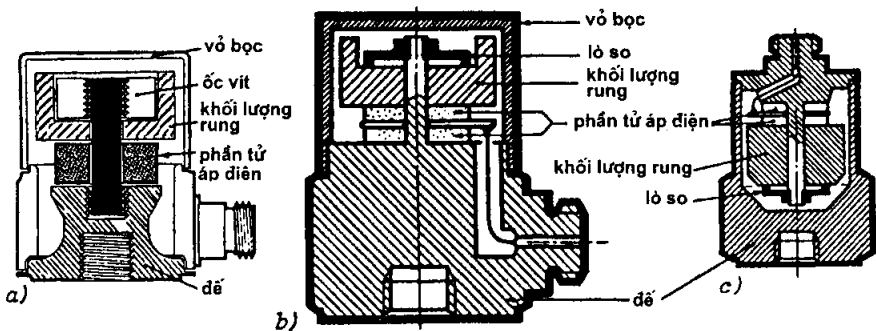
8.3.1. Nguyên tắc hoạt động

Trong cảm biến gia tốc áp điện, khối lượng rung được đặt trên phần tử áp điện. Phần tử này cung cấp một điện tích tỷ lệ với phản lực, nghĩa là với chuyển động của khối lượng rung. Cảm biến và khối lượng rung được gắn trên giá đỡ cứng, và toàn bộ được đặt trong hộp kín.

Thông thường cần phải đo gia tốc theo hai hướng dọc theo trục nhạy cảm. Cách thức để giữ cơ học vật liệu áp điện và phương tiện để gắn chúng khác nhau phụ thuộc vào bản chất của lực tác dụng (nén, kéo, cắt) cho nên nói chung cần phải có ứng lực cơ học đặt trước lên phần tử nhạy cảm để mở rộng dải đo gia tốc theo hai chiều. Điều này không phải khi nào cũng thực hiện được, và khi thực hiện phải dựa vào dạng hoạt động của vật liệu (kéo, cắt hoặc uốn).

Máy đo gia tốc áp điện kiểu nén:

Máy đo gia tốc kiểu nén được biểu diễn trên hình 8.4.



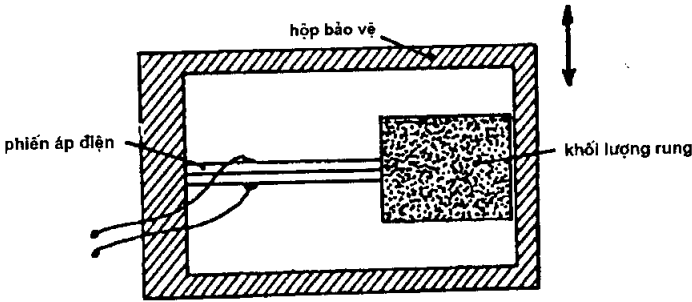
Hình 8.4: Máy đo gia tốc áp điện kiểu nén:
a) dùng ốc vít; b,c) dùng lò xo.

Đặc điểm của máy loại này là tần số cộng hưởng cao, chắc chắn, nhạy với ứng lực của đế.

Máy đo gia tốc áp điện kiểu uốn cong:

Máy đo gia tốc áp điện kiểu uốn cong được biểu diễn trên hình 8.5. Phần tử cơ bản của máy đo gia tốc áp điện kiểu uốn là hai phiến áp điện mỏng được dán với nhau. Một đầu của hai phiến này được gắn với khối lượng rung. Cấu

trúc như vậy sẽ cho độ nhạy rất cao. Tuy vậy, trong trường hợp này dải làm việc bị hạn chế bởi gia tốc rung thấp và tần số nhỏ.



Hình 8.5: Máy đo gia tốc áp điện kiểu uốn.

8.3.2. Các đặc trưng đo lường

Độ nhạy:

Độ nhạy được biểu diễn bởi biểu thức:

$$S = \frac{Q}{\gamma} = S_1 \cdot S_2 \quad (8.14)$$

trong đó:

- γ là gia tốc của cảm biến;
- Q là điện tích được tạo ra khi cảm biến rung với gia tốc γ ;
- S_1 là độ nhạy cơ học của hệ thống khối lượng rung;
- S_2 là độ nhạy điện của cảm biến.

Biểu thức của độ nhạy cơ và độ nhạy điện được viết như sau:

$$|S_1| = \left| \frac{z}{\gamma} \right| = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (8.15)$$

$$|S_2| = \left| \frac{Q}{z} \right| = d \cdot C \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (8.16)$$

trong đó z là độ dịch chuyển tương đối của khối lượng rung, d là hằng

số áp điện, C là độ cứng của phần tử nhạy cảm và $\omega_0 = 1/\tau$ là tần số tắt dưới của hệ thống cảm biến-mạch đo.

8.4. Máy đo gia tốc áp trở

Nguyên tắc chung của máy đo gia tốc áp trở như sau:

Khối lượng rung cần đo gia tốc được gắn với một tấm mỏng đàn hồi trên đó có từ 2 đến 4 đầu đo áp trở mắc trong mạch cầu Wheatstone. Dưới tác dụng của gia tốc, lá đàn hồi uốn cong gây nên biến dạng đầu đo một cách trực tiếp hoặc gián tiếp thông qua bộ khuếch đại cơ.

Độ nhạy của cảm biến được biểu diễn bởi biểu thức:

$$S = S_2 \cdot S_1 = \frac{V_m \cdot \varepsilon}{\varepsilon \cdot \gamma} \quad (8.17)$$

trong đó $S_2 = V_m/\varepsilon$ là độ nhạy điện của cầu Wheatstone gồm 4 đầu đo. Cả bốn đầu đo đều chịu chung một biến dạng $|\varepsilon|$, điện áp ra của cầu là:

$$V_m = e_s \cdot \frac{\Delta R}{R} = e_s \cdot K \cdot \varepsilon \quad (8.18)$$

từ đây: $S_2 = K \cdot e_s \quad (8.19)$

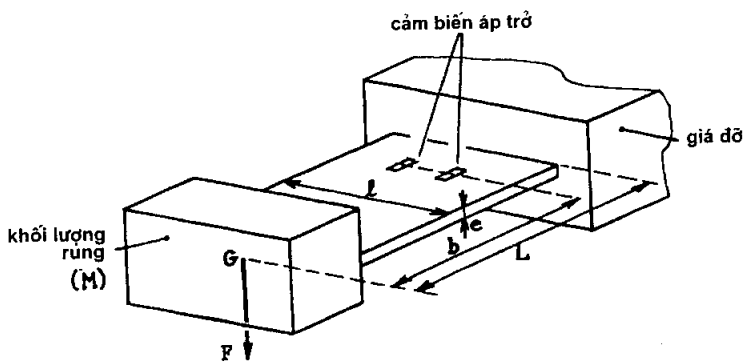
trong đó:

- e_s là điện áp nuôi cầu (10 ÷ 15v);
- K là hệ số đầu đo của áp trở ($\approx 50 \div 100$ tùy loại đầu đo);
- R là điện trở của một đầu đo ($\approx 350 \div 500 \Omega$).

S_1 đặc trưng cho đáp ứng của phần cơ khí của máy đo gia tốc:

$$S_1 = \frac{A}{\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \cdot \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (8.20)$$

Giá trị của A và ω_0 rút ra từ các kết quả liên quan đến cảm biến lực uốn. Thí dụ, trên hình 8.6 là một máy đo gia tốc áp trở sử dụng tấm mỏng đàn hồi hình chữ nhật. Ở chế độ uốn, biến dạng của tấm này tại điểm đặt cảm biến được biểu diễn bởi biểu thức:



Hình 8.6: Nguyên lý của cảm biến gia tốc áp trở.

$$\epsilon = \frac{6F.b}{Y.l.e^2} \quad (8.21)$$

với độ uốn cong :

$$f = \frac{4.F.L^3}{Y.l.e^3} \quad (8.22)$$

Độ cứng (tỷ số giữa lực tác dụng F và độ uốn cong f) sẽ là:

$$C = \frac{Y.l.e^3}{4L^3} \quad (8.23)$$

và tần số dao động riêng:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{M}} = \sqrt{\frac{Y.l.e^3}{4L^3M}} \quad (8.24)$$

trong đó Y là modun Young của tấm đàn hồi.

Coi gia tốc $\gamma = F/M$ là tĩnh (khi $\omega = 0$), tính độ nhạy S_1 khi $\omega_0 = 0$:

$$S_1 = \frac{A}{\omega_0^2} = \frac{6bM}{Yle^2} \quad (8.25)$$

nghĩa là

$$A = 1,5 \frac{b.e}{L^3} \quad (8.26)$$

CHƯƠNG 9

CẢM BIẾN ĐO VẬN TỐC, LƯU LƯỢNG VÀ MỨC CHẤT LƯU

Chất lưu là các môi trường vật chất ở dạng lỏng hoặc khí tồn tại dưới những điều kiện nhiệt độ, áp suất, thể tích được xác định bởi các định luật nhiệt động học. Dưới tác dụng của lực bên ngoài, thí dụ sự chênh lệch áp suất, chất lưu có thể chuyển động. Nghiên cứu chuyển động này là đối tượng của cơ học chất lưu.

Lĩnh vực ứng dụng của chất lưu bao gồm: hàng không, khí tượng học, sinh lý học. Để đáp ứng các lĩnh vực ứng dụng đa dạng này, các cảm biến đo vận tốc, lưu lượng và mức chất lưu cũng rất đa dạng cả về cấu tạo và phương pháp đo.

9.1. Đặc trưng của dòng chảy

Chuyển động của chất lưu được đặc trưng bởi dòng chảy. Trên thực tế muốn mô tả vật lý một dòng chảy của chất lưu cần phải đo vận tốc, khối lượng riêng, áp suất và nhiệt độ ở các điểm khác nhau của chất lưu đó. Những đặc tính khác của chất lưu như độ nhớt, độ khuếch tán nhiệt, nhiệt lượng riêng... được coi là không đổi.

Dòng chảy có thể là một pha hoặc nhiều pha. Các dòng chảy nhiều pha thường có bản chất rất khác nhau: có thể là mọi tổ hợp của các pha hơi, khí, lỏng, thí dụ sự hình thành các luồng khí do gió gây nên hoặc trường hợp các luồng khói bốc lên từ những đám cháy.

Tính chất vật lý của dòng chảy tại một điểm có thể thay đổi hoặc không thay đổi theo thời gian. Khi các tính chất vật lý của dòng chảy tại một điểm không thay đổi thì đó là dòng chảy theo lớp, ngược lại, nếu chúng thay đổi thì đó là dòng

rối (khó đo vận tốc). Để thuận lợi cho việc mô tả và đặc biệt cho việc so sánh giữa các dòng chảy khác nhau, trong cơ học chất lưu thường sử dụng các đại lượng không thứ nguyên, điều này cho phép giảm số thông số của dòng chảy.

Trường hợp dòng chảy không nén và đẳng nhiệt:

Trong trường hợp dòng chảy không nén và đẳng nhiệt (khối lượng riêng và nhiệt độ không đổi) chỉ cần một thông số không thứ nguyên cũng đủ để xác định dòng chảy, đó là số Reynolds Re :

$$Re = UD/\nu \quad (9.1)$$

với:

- U là vận tốc đặc trưng của dòng chảy, trong trường hợp ống vận tốc trung bình của dòng chảy $U = Q/S$;
- D là kích thước đặc trưng, (trong trường hợp ống, D là đường kính);
- Q là lưu lượng thể tích;
- S là tiết diện ống;
- ν là độ nhớt động học.

Đối với những điều kiện giới hạn hoàn toàn giống nhau về hình học, hai dòng chảy không nén và đẳng nhiệt được coi là giống nhau nếu chúng có số Reynolds bằng nhau. Thí dụ: xét hai dòng chảy trong hai ống có độ nhám bề mặt phía trong thành ống như nhau và đường kính tương ứng bằng D_1 và D_2 . Vận tốc dòng chảy (lưu lượng) là U_1 , U_2 và độ nhớt là ν_1 , ν_2 . Để thoả mãn, điều kiện $Re_1 = Re_2$ thì:

$$\frac{U_1 D_1}{\nu_1} = \frac{U_2 D_2}{\nu_2} \quad (9.2)$$

Như vậy, nếu biết vận tốc u_1 ở điểm cách thành ống của ống thứ nhất một khoảng x_1 thì có thể xác định được vận tốc u_2 ở điểm cách thành ống của ống thứ hai một khoảng $x_2 = x_1(D_2/D_1)$ từ biểu thức:

$$\frac{u_1}{U_1} = \frac{u_2}{U_2} \quad (9.3)$$

Cũng như vậy, có thể coi u_1/U_1 là hàm của số Reynolds:

$$\frac{u_1}{U_1} = f(Re) \quad (9.4)$$

Nghĩa là, một cách tổng quát, mỗi đại lượng không thứ nguyên liên quan đến dòng chảy đều có thể biểu diễn dưới dạng hàm số phụ thuộc vào số Reynolds của dòng chảy đó.

Dòng chảy một pha có thể là dòng chảy theo lớp hoặc dòng rối, điều này phụ thuộc vào số Reynolds. Trong một đường ống dẫn có tiết diện tròn, dòng chảy trở thành dòng rối nếu số Reynolds lớn hơn 2200.

Trong trường hợp phức tạp hơn khi nhiệt độ và khối lượng riêng thay đổi, số thông số cần thiết để mô tả một đại lượng A bổ sung sẽ tăng lên. Thí dụ, với chất khí có vận tốc lớn:

$$A = f(\text{Re}, \text{Ma}) \quad (9.5)$$

trong đó $\text{Ma} = U_1/c$, $c = \sqrt{\gamma r T}$ là vận tốc âm với $\gamma = C_p/C_v$ (tỷ số giữa nhiệt dung riêng ở áp suất không đổi và thể tích cố định, trong không khí $\gamma=1,4$), r là hằng số của chất khí lý tưởng và T là nhiệt độ tuyệt đối.

Trên thực tế, các cảm biến dựa trên cùng một nguyên tắc hoạt động nhưng về kỹ thuật sẽ không giống nhau khi dùng cho dòng chảy là chất khí hoặc chất lỏng. Trong bảng 9.1 giới thiệu một số điểm khác nhau của hai môi trường này.

Bảng 9.1

	Khối lượng riêng ρ	Độ nhớt μ	Tốc độ chảy
Chất lỏng	Không đổi từ 800 đến 1000 kg/m ³	$\approx 1 \div 10^{-4}$ Pl	$0 \leq U \leq 200$ m/s
Chất khí	Phụ thuộc vào T và P, đối với không khí ở nhiệt độ phòng $\rho \sim 1$ kg/m ³	$\approx 10^{-5}$ Pl (Pl: posieuille)	$0 \leq U \leq 2000$ m/s

9.2. Cảm biến và phương pháp đo vận tốc của chất lưu

Vận tốc của các chất lưu thường được đo gián tiếp thông qua ảnh hưởng của nó đến các đặc trưng vật lý của vật trung gian hoặc đến hiện tượng vật lý trong đó vận tốc là một thông số và vật trung gian là nơi xảy ra hiện tượng. Vật trung gian có thể chính là chất lưu hoặc một phân tử cấu thành của cảm biến.

Khí vật trung gian là bản thân chất lưu, vận tốc của nó xác định áp suất động $\rho U^2/2$, hiệu ứng Doppler tác động bởi laze hoặc siêu âm và thời gian truyền

qua của một đồng vị phóng xạ. Trong trường hợp này phải sử dụng các cảm biến thích hợp với đại lượng đo là áp suất, ánh sáng, siêu âm, tia phóng xạ.

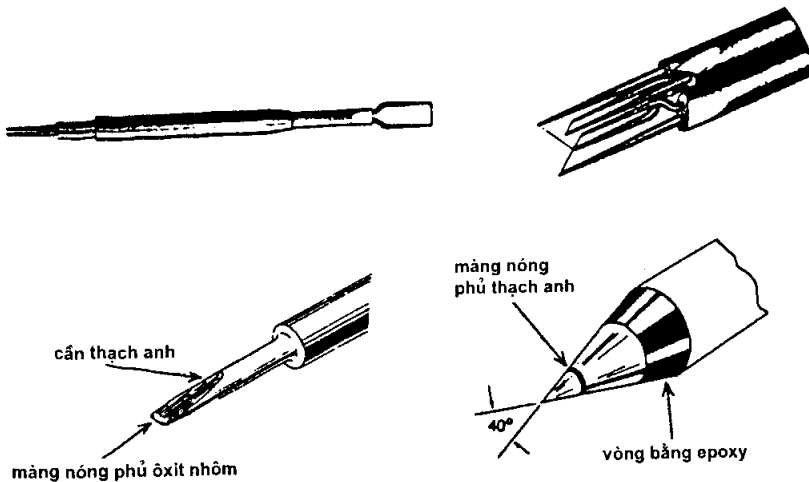
Khi vật trung gian là một phân tử của cảm biến đặt trong chất lưu, vận tốc của chất lưu sẽ xác định một trong các đặc trưng vật lý như nhiệt độ của dây dẫn đặt trong chất lưu và nuôi bằng dòng một chiều, hoặc tốc độ quay của một chong chóng hay bánh xe đặt trong chất lưu.

9.2.1. Phong kế dây và phong kế màng mỏng

9.2.1.1. Nguyên tắc hoạt động

Khi đặt trong dòng chảy một dây dẫn hoặc một màng mỏng có nhiệt độ (sinh ra bởi hiệu ứng Joule) cao hơn nhiệt độ của chất lưu thì sẽ xảy ra trao đổi nhiệt bằng đối lưu. Sự trao đổi nhiệt phụ thuộc vào tính chất vật lý của dòng chảy, vận tốc của chất lưu và sự chênh lệch nhiệt độ giữa phân tử nóng và chất lưu.

Nhiệt độ cân bằng T_0 của dây hoặc màng (cảm biến) xác định bằng cách đo điện trở R của chúng. Điện trở này phụ thuộc vào nhiệt lượng Joule tỏa ra và vận tốc của chất lưu.



Hình 9.1: Các dạng dây dẫn và màng mỏng dùng để đo vận tốc dòng chảy.

Trên hình 9.1 biểu diễn các dạng dây dẫn và các loại màng mỏng thường sử dụng để đo vận tốc dòng chảy. Các kim loại dùng cho mục đích này cần có hệ số

hiệt điện trở α_R cao. Thí dụ: để đo vận tốc dòng chảy trong chất khí dùng dây platin và wonfram có đường kính $0,6 \mu\text{m} < D < 10 \mu\text{m}$, trong chất lỏng dùng màng mỏng platin.

Công suất P_j tỏa ra trên điện trở ở nhiệt độ T sẽ bằng:

$$P_j = R(T).I^2 \quad (9.6)$$

trong đó I là dòng một chiều chạy qua điện trở R .

Nếu giả thiết sự trao đổi nhiệt chỉ xảy ra do hiện tượng đối lưu của chất lưu ở nhiệt độ T_a thì công suất trao đổi được biểu diễn bởi biểu thức:

$$P_C = h.S_\ell.(T-T_a) \quad (9.7)$$

trong đó h là hệ số trao đổi nhiệt và S_ℓ là diện tích mặt xung quanh của cảm biến. Đối với dây dẫn $S_\ell = \pi D \ell$, D là đường kính và ℓ là chiều dài. Đối với màng mỏng $S_\ell = 2D \ell$, D là chiều rộng và ℓ là chiều dài.

Khi có cân bằng nhiệt, $P_j = P_C$, nghĩa là:

$$R(T).I^2 = h.S_\ell.(T-T_a) \quad (9.8)$$

Vận tốc U của chất lưu liên quan đến hệ số trao đổi nhiệt. Nhiều công thức thực nghiệm đã được đưa ra để phản ánh mối liên hệ này, thí dụ công thức của King:

$$h = a + b\sqrt{U} \quad (9.9)$$

trong đó a, b là các hằng số phụ thuộc vào chất lưu và cảm biến. Nếu sử dụng biểu thức King ta sẽ có:

$$R(T).I^2 = (A + B\sqrt{U}).(T-T_a) \quad (9.10)$$

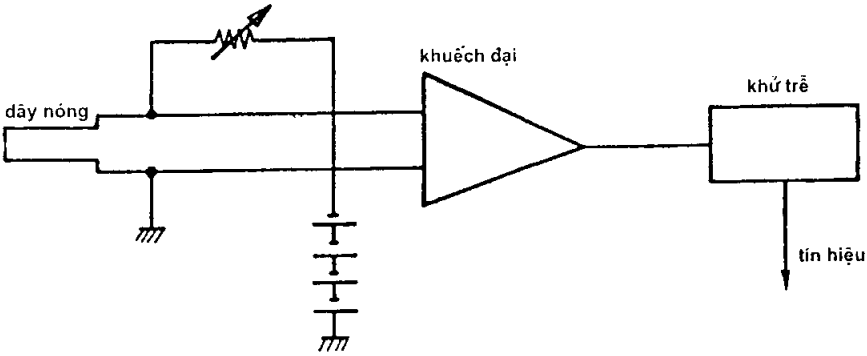
trong đó $A = a.S_\ell$ và $B = b.S_\ell$.

9.2.1.2. Sơ đồ đo

Chế độ dòng không đổi:

Trong trường hợp này dòng chạy qua dây dẫn được giữ ở giá trị không đổi $I = \text{const}$ (bằng cách dùng nguồn dòng). Vì công suất nhiệt trao đổi phụ thuộc vào vận tốc U nên nếu U thay đổi thì nhiệt độ cũng thay đổi theo. Mặt

khác điện trở R phụ thuộc vào nhiệt độ, nghĩa là điện áp đầu ra cũng phụ thuộc vào nhiệt độ. Sơ đồ nguyên lý mạch đo dùng dòng không đổi được biểu diễn trên hình 9.2

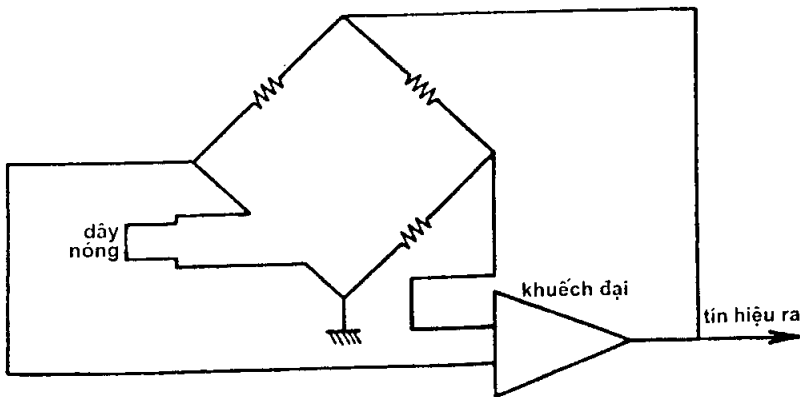


Hình 9.2: Sơ đồ đo trong chế độ dòng không đổi.

Do dây dẫn có một nhiệt dung nhất định nên sẽ phát sinh một hằng số thời gian. Trong mạch này có ghép thêm phần bù trừ quán tính nhiệt để cải thiện thời gian đáp ứng.

Chế độ nhiệt độ không đổi:

Trong trường hợp này nhiệt độ (và do đó điện trở) được giữ không đổi. Sơ đồ đo biểu diễn trên hình 9.3.



Hình 9.3: Sơ đồ đo trong chế độ nhiệt độ không đổi.

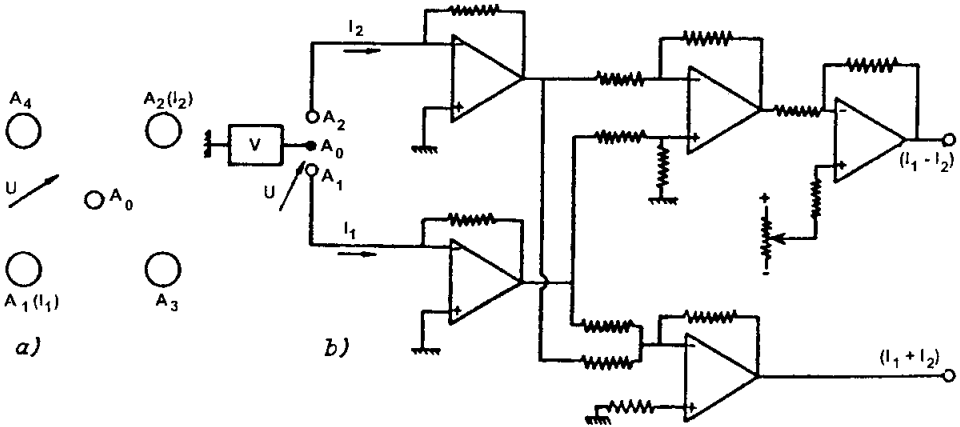
Trong sơ đồ nhiệt độ không đổi, cảm biến đóng vai trò là một nhánh của cầu Wheatstone. Dòng điện cần thiết để cân bằng cầu phụ thuộc vào vận tốc của chất lưu.

Dùng sơ đồ trên đây có ưu điểm là quán tính nhiệt nhỏ hơn trường hợp sơ đồ dùng dòng không đổi.

9.2.2. Phong kế ion

Có nhiều loại cảm biến đo tốc độ gió trên cơ sở đo dòng ion, chúng khác nhau chủ yếu về hình dạng.

Trên hình 9.4 biểu diễn sơ đồ nguyên lý của một cảm biến đo tốc độ gió bằng cách đo dòng ion.



Hình 9.4: Phong kế ion: a) nguyên lý cấu tạo; b) mạch đo.

Đầu đo gồm một dây dẫn có điện thế cao, xung quanh nó là bốn điện cực góp. Dây dẫn được đặt sao cho hướng của nó vuông góc với hướng của dòng chảy.

Trong không khí ở gần sợi dây cao áp luôn có các ion, thí dụ ion $(H_2O)_nH^+$. Tốc độ di chuyển của các ion này giữa các điện cực tỷ lệ với độ lớn của điện trường. Khi không khí đứng yên, dòng điện đo ở các điện cực bằng nhau. Khi không khí chuyển động với vận tốc U , hệ trở nên bất đối xứng. Hiệu số dòng điện $(I_1 - I_2)$ của một cặp điện cực A_1 và A_2 liên quan đến hình chiếu của U trên đường thẳng A_1A_2 , trong khi đó tổng $(I_1 + I_2)$ hầu như không đổi.

Độ nhạy S của cảm biến là hàm của thông số σ :

$$S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta U} \quad (9.11)$$

trong đó σ là thông số được viết dưới dạng:

$$\sigma = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (9.12)$$

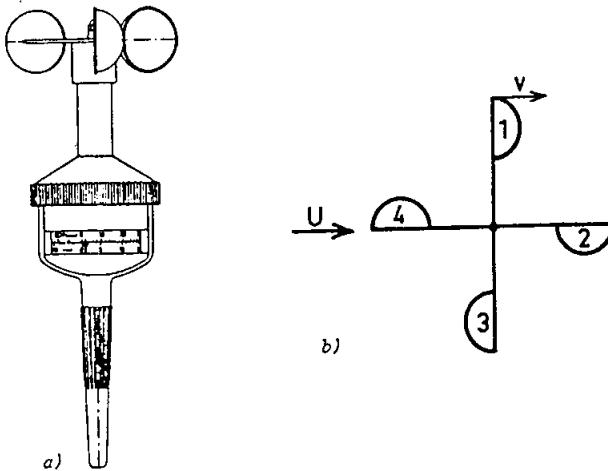
Phong kế ion được sử dụng để đo tốc độ gió có giá trị nằm trong khoảng từ 0 đến 10 m/s. Trong vùng giá trị này của tốc độ, đáp ứng của cảm biến được coi là tuyến tính.

Đối với dây đường kính 100 μm dài 2 cm được bao quanh bởi các điện cực góp đường kính 1,2 cm và nằm cách dây một khoảng bằng 1 cm, để đạt được độ tuyến tính cao, cần đặt điện áp khoảng 6000 V trên dây dẫn. Dòng điện trong điện cực góp đạt tới 1,5 μA , độ nhạy cỡ 0,04 trên m/s.

9.2.3. Phong kế dùng chén bán cầu và cánh quạt

Phong kế dùng chén bán cầu:

Hình dạng của phong kế dùng chén bán cầu biểu diễn trên hình 9.5.



Hình 9.5: Phong kế dùng chén bán cầu:
a) loại 3 chén bán cầu; b) sơ đồ bố trí của loại 4 chén bán cầu.

Phong kế bán cầu có cấu tạo gồm từ 3 đến 4 chén bán cầu được gắn vào cánh tay đòn để có thể quay quanh một trục.

Khi đặt máy đo trong dòng chảy, các chén bán cầu sẽ quay quanh trục của máy đo bởi vì hệ số sức cản của mặt trước (mặt lõm) và mặt sau bán cầu (mặt lồi) khác nhau.

Để tìm phương trình cân bằng ta xét hai bán cầu 1 và 3 đặt vuông góc với vận tốc U của dòng chảy và coi lực tác dụng lên các bán cầu 2 và 4 là như nhau. Các bán cầu 1 và 3 có vận tốc thẳng \vec{v} và $-\vec{v}$, ở thời điểm đang xét chúng cùng hướng với vận tốc \vec{U} của dòng chảy. Lực cản đối với các bán cầu:

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho C_x S (U - v)^2 \quad (9.13)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \rho C'_x S (U + v)^2 \quad (9.14)$$

trong đó ρ là khối lượng riêng của chất lưu, C_x và C'_x là hệ số lực cản đối với hai mặt cầu, S là diện tích mặt cản chính của bán cầu (diện tích hình chiếu của bán cầu trên mặt phẳng vuông góc với vận tốc \vec{U}).

Từ biểu thức trên rút ra:

$$C_x (U - v)^2 = C'_x (U + v)^2 \quad (9.15)$$

do đó:

$$U = v \cdot \frac{\sqrt{C_x} + \sqrt{C'_x}}{\sqrt{C_x} - \sqrt{C'_x}} \quad (9.16)$$

Minh họa bằng số: $C_x = 1,42$; $C'_x = 0,38$; $U = 3,1.v$.

Đầu đo gió dùng cánh quạt (chong chóng)

Đầu đo dùng cánh quạt biểu diễn trên hình 9.6. Trục của đầu đo được đặt song song với hướng của tốc độ dòng chảy. Nếu bỏ qua ma sát thì có thể coi như cánh quạt (bằng một cách nào đó) được gắn vào dòng chảy, khi đó:

$$U = h.N \quad (9.17)$$

trong đó U là vận tốc, N là số vòng quay và h là hằng số của đầu đo. Nếu tính đến ma sát và ngưỡng khởi động thì biểu thức của tốc độ gió sẽ là:

$$U = a + bN \quad (9.18)$$

Các hằng số a và b đặc trưng cho cánh quạt và chất lưu. Để đếm được số vòng quay của cánh quạt người ta dùng một trong ba cách dưới đây:

- Dùng một nam châm nhỏ gắn trên cánh quạt, khi cánh quạt quay nam châm đi qua cuộn dây và gây nên xung điện. Đếm số xung theo thời gian sẽ tính được tốc độ quay của cánh quạt.
- Dùng cảm biến quang điện: khi cánh quạt quay nó sẽ che ánh sáng, tạo nên xung điện.
- Dùng mạch đo thích hợp để đo tần số hoặc điện áp.

Trước khi đo phải chuẩn đầu đo bằng một trong hai cách: đặt đầu đo trong dòng chảy có vận tốc đã biết trước hoặc di chuyển đầu đo với tốc độ quy định trước trong nước đứng yên.



Hình 9.6: Đo tốc độ gió bằng đầu đo chong chóng.

Phạm vi đo của đầu đo cánh quạt khác nhau đối với các chất lưu. Trong không khí dải đo nằm trong khoảng từ 0,1 đến 30 m/s, trong chất lỏng: từ 0,05 đến 10 m/s.

9.2.4. Máy đo tốc độ gió dùng siêu âm

Sóng âm truyền trong môi trường với vận tốc c. Vận tốc này phụ thuộc vào nhiệt độ của môi trường. Thí dụ: trong không khí $c = 331,4$ m/s ở 8°C , vận tốc của sóng âm tăng lên $342,9$ m/s khi nhiệt độ đạt tới 20°C . Trong chất lỏng vận tốc truyền sóng âm lớn hơn trong không khí, thí dụ ở nhiệt độ 8°C trong môi trường nước $c = 1435$ m/s.

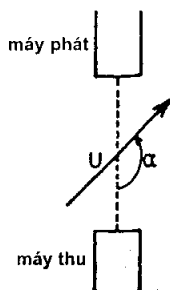
Khi môi trường chuyển động với vận tốc U, vận tốc c' mà người quan sát đo được có thể viết dưới dạng biểu thức:

$$c' = c + U \cos \alpha \quad (9.19)$$

trong đó α là góc giữa U và phương truyền sóng (h. 9.7).

Thiết bị đo tốc độ gió bằng sóng siêu âm bao gồm một máy phát xung siêu âm và một máy thu đặt cách máy phát một khoảng bằng L . Thời gian truyền sóng được tính từ biểu thức:

$$t_p = \frac{L}{c + U \cos \alpha} \quad (9.20)$$



Hình 9.7: Nguyên lý đo tốc độ gió bằng sóng siêu âm.

Máy phát và máy thu được làm từ các phiên áp điện. Máy phát được kích thích bằng điện áp dạng sóng cao tần $\sim 1\text{MHz}$. Máy thu tạo tín hiệu điện cùng dạng với thay đổi của áp suất δp .

Thiết bị ít dùng để đo vận tốc vì độ phân giải không gian không tốt. Khi dùng để đo vận tốc phải lấy tích phân của U theo khoảng cách L . Thông thường thiết bị được sử dụng để đo lưu lượng.

9.3. Đo lưu lượng

Đo lưu lượng có tầm quan trọng đặc biệt trong các mạng lưới vận chuyển chất lưu (ống dẫn khí, ống dẫn dầu) và trong mọi thiết bị công nghiệp khi cần khống chế lượng chất lưu tham gia vào các quá trình như ở lò phản ứng hóa học, nhà máy sản xuất năng lượng, động cơ đốt trong.

9.3.1. Lưu lượng kế điện từ

Nguyên lý:

Khi cho đoạn dây M_1, M_2 chiều dài l chuyển động tịnh tiến trong trường cảm ứng từ \vec{B} với vận tốc \vec{U} trong khoảng thời gian dt (h. 9.8), có thể viết biểu thức cho các đại lượng cơ bản sau đây:

- Diện tích cắt:

$$dS_C = \ell \cdot U \cdot \sin\theta \cdot dt \quad (9.21)$$

hoặc dưới dạng vectơ:

$$d\vec{S}_C = \vec{\ell} \wedge \vec{U} dt \quad (9.22)$$

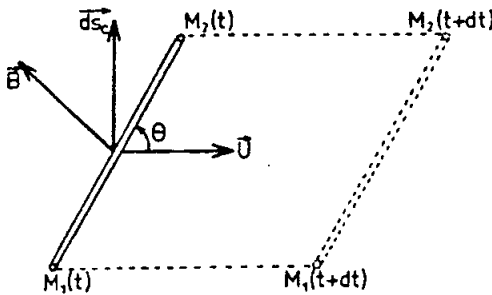
trong đó $\vec{\ell} = \overrightarrow{M_1 M_2}$.

- Từ thông bị cắt:

$$d\phi_C = \vec{B} \cdot d\vec{S}_C \cdot dt \quad (9.23)$$

- Suất điện động cảm ứng:

$$e = \frac{-d\phi_C}{dt} = \vec{B} \wedge \vec{U} \cdot \vec{\ell} \quad (9.24)$$



Hình 9.8: Sự dịch chuyển của một đoạn dây dẫn trong trường cảm ứng từ.

Khi \vec{U} vuông góc với $\vec{\ell}$ và \vec{B} vuông góc với mặt phẳng tạo bởi $\vec{\ell}$ và \vec{U} ta có:

$$e = B \cdot \ell \cdot U \quad (9.25)$$

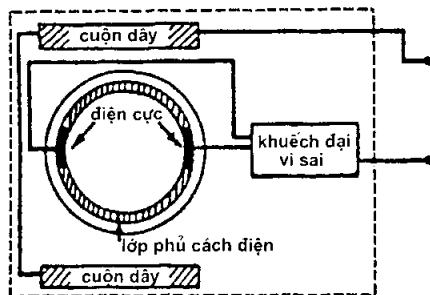
Công thức này có thể tổng quát hóa cho trường hợp chất lưu dẫn điện chảy trong đường ống đường kính D có vận tốc \vec{U} vuông góc với \vec{B} : suất điện động cảm ứng dọc theo đường kính vuông góc với \vec{U} và \vec{B} có dạng:

$$e = BDU \quad (9.26)$$

Trên thực tế vận tốc thay đổi tùy vị trí của điểm trên bán kính ống, nhưng nó phân bố đối xứng quanh trục của ống, cho nên U đo được là vận tốc trung bình của dòng chảy. Trong những điều kiện như vậy, tín hiệu e tỷ lệ với lưu lượng.

Cấu tạo của cảm biến:

Từ trường $10^{-3} \div 10^{-2}$ T được tạo ra bằng cách dùng hai cuộn dây đặt ở hai



Hình 9.9: Lưu lượng kế điện từ.

phía của đường ống. Đường ống dẫn làm bằng vật liệu không từ tính, mặt bên trong ống được phủ chất cách điện. Hai điện cực lấy tín hiệu đặt ở hai đầu đường kính vuông góc với đường sức của từ trường. Các cuộn dây được nuôi bằng nguồn xoay chiều tần số 30 Hz (h. 9.9).

Tín hiệu thu được ở đầu ra có dạng:

$$e = UDB_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (9.27)$$

trong đó B_0 là trị cực đại của cảm ứng từ $B_0 = B_{\max}$, ω là tần số (của cảm ứng từ). Biên độ của tín hiệu tỷ lệ với U và có trị cỡ mV.

Các đặc trưng:

Các chất lưu cần phải có độ dẫn điện không nhỏ hơn cỡ $\sim \mu\text{Scm}^{-1}$. Lý do là bởi vì điện trở trong của cảm biến phải nhỏ hơn rất nhiều so với điện trở vào của thiết bị đo.

Phạm vi đo của lưu lượng kế điện từ là hàm của đường kính ống dẫn. Đường kính càng rộng thì giới hạn thấp và cao càng chuyển dịch về phía lưu lượng lớn. Thí dụ:

- $D = 10$ mm, lưu lượng nhỏ nhất $Q_{\min} = 0,28$ m³/h, lưu lượng lớn nhất $Q_{\max} = 2,8$ m³/h.
- $D = 1$ m, $Q_{\min} = 2800$ m³/h, $Q_{\max} = 28000$ m³/h.

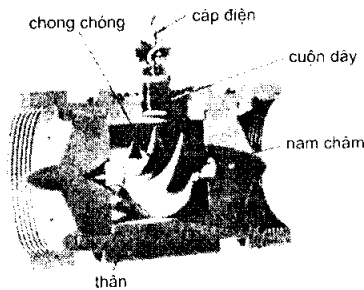
Độ chính xác của lưu lượng kế đạt được cỡ $\sim 1\%$.

Ưu điểm của lưu lượng kế điện từ là ở chỗ việc đo đạc không phụ thuộc vào đặc tính vật lý của chất lưu (như mật độ, độ nhớt, độ dẫn điện với điều kiện nó phải lớn hơn một vài μScm^{-1}). Ngoài ra, thiết bị này có khả năng chống ăn mòn bằng cách chọn lớp phủ và kim loại điện cực thích hợp (Ti, Pt).

9.3.2. Lưu lượng kế cơ dùng chuyển đổi điện

9.3.2.1. Lưu lượng kế tuabin

Nguyên lý hoạt động của lưu lượng kế dùng chuyển đổi điện cũng giống như của đầu đo gió dùng chong chóng: dòng chất lưu làm quay tuabin đặt ở trục của ống dẫn (h. 9.10).



Hình 9.10: Lưu lượng kế dùng tuabin.

Tốc độ quay N của cánh tuabin (số vòng quay trong một giây) tỷ lệ với lưu lượng Q :

$$Q = K.N \quad (9.28)$$

Hệ số K phụ thuộc vào cấu tạo cụ thể của lưu lượng kế nhưng về nguyên tắc nó không phụ thuộc vào chất lưu. Có nhiều biểu thức thiết lập cho hệ số K với giả thiết bỏ qua sự nhiễu cơ học và hiệu ứng của độ nhớt:

$$K = 2\pi r A \cot \alpha \quad (9.29)$$

trong đó r là bán kính trung bình của cánh tuabin, A là tiết diện cắt ngang dòng chảy, α là góc giữa cánh và trục của tuabin:

$$A = A_c - A_r \quad (9.30)$$

trong đó A_c là tiết diện trong của ống đo và A_r là diện tích mặt cắt ngang của roto.

Phương pháp đổi tốc độ quay thành tín hiệu điện cũng tương tự như trong trường hợp đầu đo gió dùng chong chóng.

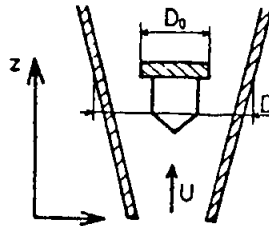
Các đặc trưng kỹ thuật của lưu lượng kế tuabin như sau:

- Phạm vi đo: $0,3 \text{ m}^3/\text{h} \div 36000 \text{ m}^3/\text{h}$ đối với chất khí;
 $0,01 \text{ m}^3/\text{h} \div 14000 \text{ m}^3/\text{h}$ đối với chất lỏng.
- Độ chính xác: $\pm 1\% \div \pm 2\%$.
- Độ lặp lại: tốt hơn $\pm 10,5\%$.
- Độ tuyến tính: $\pm 0,5 \div 1,5\%$ phụ thuộc vào độ nhớt.
- Thời gian đáp ứng: một vài ms.

Các lưu lượng kế tuabin có ưu điểm là dễ xử lý tín hiệu. Tuy vậy khi làm việc với chúng phải đảm bảo yêu cầu là chất lưu không có bọt khí và các sợi hoặc hạt có kích thước đáng kể. Thêm vào đó, để đảm bảo độ chính xác của kết quả đo, lưu lượng kế phải được đặt ở đoạn ống thẳng để tránh dòng xoáy.

9.3.2.2. Lưu lượng kế phao nổi

Lưu lượng kế loại này có cấu tạo gồm một phao nhỏ đặt trong ống thẳng đứng hình nón (h. 9.11).



Hình 9.11: Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của lưu lượng kế phao nổi.

Ở trạng thái cân bằng phao chịu tác động của ba lực chủ yếu là lực đẩy Archimede, lực cản và trọng lượng. Trạng thái cân bằng này được biểu diễn bởi phương trình:

$$\rho g V + C_x \cdot \frac{\rho S U^2}{2} = \rho_0 g V \quad (9.31)$$

trong đó:

- V là thể tích và ρ_0 là khối lượng riêng của phao;
- U là vận tốc và ρ là khối lượng riêng của chất lưu;
- C_x là hệ số lực cản và S là diện tích của hình chiếu của phao trên mặt phẳng vuông góc với vận tốc \bar{U} , $S = (\pi D^2)/4$.
- g là gia tốc trọng trường.

Vị trí của phao được xác định sao cho vận tốc của U được biểu diễn bởi biểu thức (từ điều kiện cân bằng của các lực tác dụng lên phao):

$$U = \sqrt{\frac{2gV}{C_x S} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} \quad (9.32)$$

Đường kính D của ống dẫn thay đổi tuyến tính theo chiều cao z :

$$D = D_0 + az \quad (9.33)$$

cho nên biểu thức của lưu lượng có dạng:

$$Q = \frac{\pi}{4} [(D_0 + az)^2 - D_0^2] \cdot \sqrt{\frac{2gV}{C_x S} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} \quad (9.34)$$

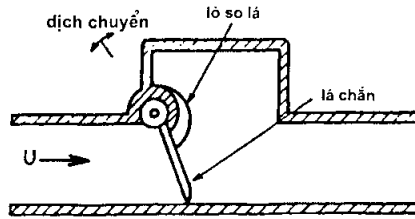
Nếu sự thay đổi của đường kính ống rất nhỏ thì trên thực tế biểu thức của Q sẽ là:

$$Q = \sqrt{\pi} az \cdot \sqrt{\frac{2gV}{C_x} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} = Kz \quad (9.35)$$

Để đo lưu lượng, cách đơn giản nhất là chia độ trực tiếp trên ống thủy tinh. Để tiện xử lý kết quả đo, có thể nối phao với một chiếc cân nhỏ có liên hệ cơ với lõi của biến thế vi sai để chuyển tín hiệu cơ thành tín hiệu điện. Tín hiệu điện này sẽ tỷ lệ với lưu lượng cần đo.

9.3.2.3. Lưu lượng kế lá chắn

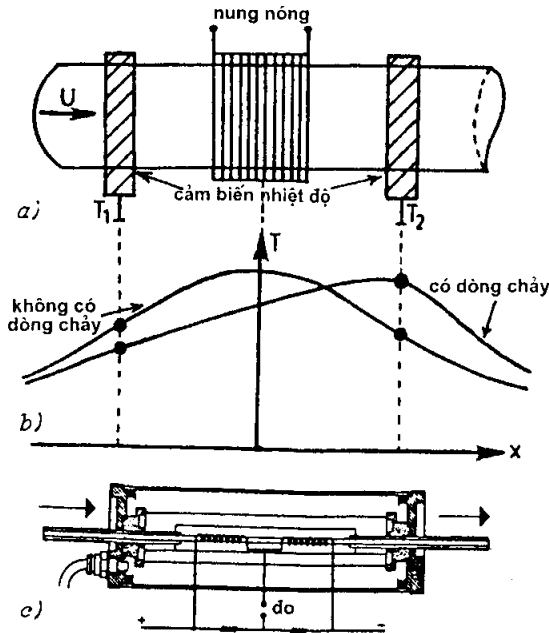
Lưu lượng kế dùng lá chắn biểu diễn trên hình 9.12. Lá chắn chịu lực tác động của dòng chảy, trọng lượng và phản lực của lò xo. Vị trí cân bằng của lá chắn phụ thuộc vào lưu lượng của chất lưu. Tín hiệu cơ trong trường hợp này có thể chuyển thành tín hiệu điện bằng cách dùng điện kế có trục gắn liền với trục của lá chắn. Ưu điểm của lưu lượng kế dùng lá chắn là rẻ tiền và chắc chắn.



Hình 9.12: Lưu lượng kế dùng lá chắn.

9.3.3. Lưu lượng kế khối lượng nhiệt

Lưu lượng kế khối lượng nhiệt có cấu tạo gồm một ống dẫn bằng kim loại mảnh có đường kính nhỏ. Phía ngoài của ống kim loại được cuốn một sợi dây đốt bằng điện trở ở chính giữa, hai cảm biến nhiệt độ để đo T_1 ở thượng nguồn (đầu vào) và T_2 ở hạ lưu (đầu ra) được đặt ở hai phía của sợi đốt và đối xứng với nhau qua sợi đốt (h. 9.13a).



Hình 9.13: Lưu lượng kế khối lượng nhiệt: a) sơ đồ nguyên lý cấu tạo; b) đường cong nhiệt độ; c) mạch đốt nóng và mạch đo dùng chung hai điện trở nhiệt.

Khi không có dòng chảy lưu lượng bằng không ($Q = 0$), sự truyền nhiệt ra hai phía của sợi đốt là như nhau, hiệu ứng nung nóng sẽ đối xứng và trong trường hợp này $T_1 = T_2$ (h. 9.13b).

Khi lưu lượng khác không $Q \neq 0$, T_1 giảm và T_2 tăng (h. 9.13b). Sự khác nhau giữa T_1 và T_2 ($\Delta T = T_1 - T_2$) tỷ lệ với lưu lượng Q .

Trên hình 9.13c biểu diễn cấu tạo của lưu lượng kế khối lượng nhiệt. Các cảm biến nhiệt độ có thể là cặp nhiệt hoặc nhiệt kế điện trở. Nếu là hai điện trở nhiệt thì chúng làm thành hai nhánh kề nhau của cầu Wheatstone, hai nhánh khác là hai điện trở cố giá trị không đổi. Điện áp không cân bằng trên cầu sẽ là tín hiệu đo.

Trường hợp trên hình vẽ, chức năng nung nóng và đo ΔT thực hiện bằng hai điện trở nhiệt có dòng điện đủ lớn chạy qua.

Thí dụ: Cảm biến U70 (Setaram):

- Lưu lượng cực đại: 5 ℓ /h (trong không khí ở điều kiện bình thường).
Lưu lượng cực đại tỷ lệ với áp suất: 0,05 ℓ /h dưới áp suất 100 bar, 50 ℓ /h dưới áp suất 0,1 bar.
- Độ chính xác: 0,5 ÷ 1,5 %.
- Hằng số thời gian: 2,5 ÷ 150 s phụ thuộc vào kiểu chế tạo.

9.4. Đo và phát hiện mức chất lưu

Mục đích của việc đo và phát hiện mức chất lưu là xác định mức độ hoặc khối lượng chất lưu trong các bình chứa. Có hai dạng đo: đo liên tục và xác định theo ngưỡng.

Khi đo liên tục, biên độ hoặc tần số của tín hiệu đo cho biết thể tích chất lưu còn lại trong bình chứa.

Khi xác định theo ngưỡng, cảm biến đưa ra tín hiệu dạng nhị phân cho biết thông tin về tình trạng hiện tại mức ngưỡng có đạt hay không. Thí dụ, nếu phát hiện thấy mức cao thì cảm biến sẽ phát ra tín hiệu để ngừng việc đổ chất lưu vào bình chứa. Khi phát hiện thấy ngưỡng thấp, tín hiệu sẽ phát lệnh ngừng việc hút chất lưu từ bình chứa để đảm bảo mức dự trữ tối thiểu. Thông thường người ta hay kết hợp cả hai loại đầu đo phát hiện ngưỡng cao và ngưỡng thấp để tự động hóa quy trình cung cấp và hút chất lưu từ bình chứa.

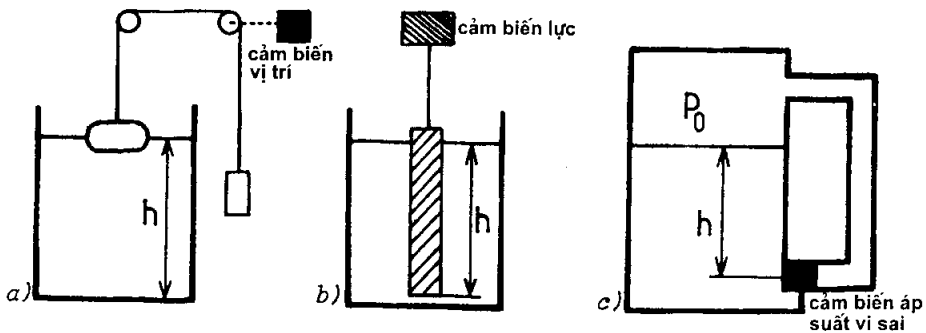
Có ba phương pháp hay dùng trong kỹ thuật đo và phát hiện mức:

- Phương pháp thủy tĩnh dùng biến đổi điện;
- Phương pháp điện dựa trên tính chất điện của chất lưu;
- Phương pháp bức xạ dựa trên sự tương tác giữa bức xạ và chất lưu.

9.4.1. Phương pháp thủy tĩnh

Trong phương pháp này chỉ số đo cảm biến cung cấp là hàm liên tục phụ thuộc vào chiều cao của chất lưu trong bình chứa. Nó không phụ thuộc vào tính chất điện của chất lưu nhưng phụ thuộc vào khối lượng riêng của chất lưu.

Trên hình 9.14 biểu diễn ba cách khác nhau của phương pháp đo thủy tĩnh.



Hình 9.14: Phương pháp thủy tĩnh: a) phao; b) hình trụ treo; c) cảm biến áp suất vi sai.

Cách thứ nhất: một phao nổi trên mặt chất lưu được gắn bằng dây (qua một ròng rọc) với một cảm biến vị trí (h. 9.14a). Cảm biến vị trí sẽ cho tín hiệu tỷ lệ với mức của chất lưu.

Cách thứ hai, một vật hình trụ được nhúng trong chất lưu, chiều cao của hình trụ phải bằng hoặc lớn hơn mức cao nhất của chất lưu (h. 9.14b). Hình trụ này được treo trên một cảm biến đo lực. Trong quá trình đo cảm biến chịu sự tác động của một lực F tỷ lệ với chiều cao của chất lỏng:

$$F = p - \rho gSh \quad (9.36)$$

trong đó p , S và h là trọng lượng, tiết diện mặt cắt ngang và chiều cao phần ngập trong chất lỏng của hình trụ, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng, g là gia tốc trọng trường.

Số hạng thứ hai $\rho g h$ trong biểu thức là lực đẩy Archimede tác dụng lên hình trụ. Tín hiệu do cảm biến cung cấp sẽ tỷ lệ với h - mức chất lưu còn lại trong bình.

Cách thứ ba: sử dụng cảm biến áp suất vi sai đặt ở đáy của bình chứa (h. 9.14c). Tại đáy bình áp suất được biểu diễn bởi biểu thức:

$$p = p_0 + \rho g h \quad (9.37)$$

trong đó p_0 là áp suất ở đỉnh của bình chứa, $\rho g h$ là áp suất thủy lực tại đáy bình, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng, g là gia tốc trọng trường.

Cảm biến đóng vai trò vật trung gian có dạng một màng mỏng. Một mặt của màng chịu tác động của áp suất p và mặt kia chịu tác động của áp suất p_0 . Do có sự chênh lệch giữa p và p_0 nên hai mặt của màng chịu hai lực tác động khác nhau làm cho nó bị biến dạng. Sự biến dạng này sẽ cung cấp tín hiệu cơ được chuyển đổi thành tín hiệu điện có độ lớn tỷ lệ với chiều cao h của chất lỏng trong bình chứa.

9.4.2. Phương pháp điện

Đây là phương pháp phải sử dụng đến các cảm biến đặc thù. Các cảm biến này chuyển đổi trực tiếp mức thành tín hiệu điện. Tuy thế, yêu cầu đặt ra là đầu đo phải có cấu tạo đơn giản và dễ chế tạo.

9.4.2.1. Cảm biến độ dẫn

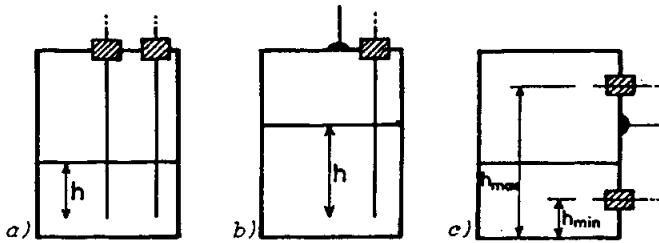
Cảm biến loại này chỉ dùng cho chất lưu dẫn điện ($\sigma \sim 50 \mu\text{Scm}^{-1}$), không có tính ăn mòn và không lẫn thể rắn cách điện, thí dụ dầu nhờn.

Cấu tạo của đầu đo gồm hai điện cực hình trụ, nếu bình chứa bằng kim loại thì bình là một cực và chỉ cần thêm một cực hình trụ (h. 9.15). Đầu đo được nuôi bằng nguồn điện áp xoay chiều $\sim 10 \text{ V}$ để tránh hiện tượng phân cực của các điện cực.

Trong chế độ đo liên tục, đầu đo đặt theo vị trí thẳng đứng, chiều dài của đầu đo chiếm cả dải chiều cao của mức cần đo. Dòng điện chạy giữa các điện cực có biên độ tỷ lệ với chiều dài của điện cực bị ngập trong chất lưu. Độ lớn của tín hiệu cũng phụ thuộc vào độ dẫn của chất lưu.

Trong chế độ phát hiện theo ngưỡng, điện cực ngắn và đặt theo phương nằm ngang, vị trí của mỗi điện cực tương đương với một mức ngưỡng. Khi mức

chất lỏng đạt tới điện cực, dòng điện I có biên độ không đổi.



Hình 9.15: Cảm biến độ dẫn đo mức chất lưu: a) sơ đồ hai điện cực; b) sơ đồ một điện cực; c) phát hiện theo mức.

9.4.2.2. Cảm biến tụ điện

Khi chất lỏng là chất cách điện, có thể tạo tụ điện bằng hai điện cực hình trụ (hoặc một điện cực kết hợp với thành bình kim loại của bình chứa). Chất điện môi giữa hai điện cực là chất lỏng ở phần ngập và không khí ở phần khô. Việc đo mức chất lưu được chuyển thành đo điện dung của tụ điện. Điện dung này thay đổi theo mức chất lưu trong bình chứa. Điều kiện cần thiết để áp dụng phương pháp này là hằng số điện môi của chất lưu phải lớn hơn hằng số điện môi của không khí, thông thường là gấp đôi.

Trong trường hợp chất lưu dẫn điện, chỉ cần sử dụng một điện cực bên ngoài có phủ vật liệu cách điện, lớp phủ đóng vai trò lớp điện môi của tụ, còn điện cực thứ hai là chính chất lưu.

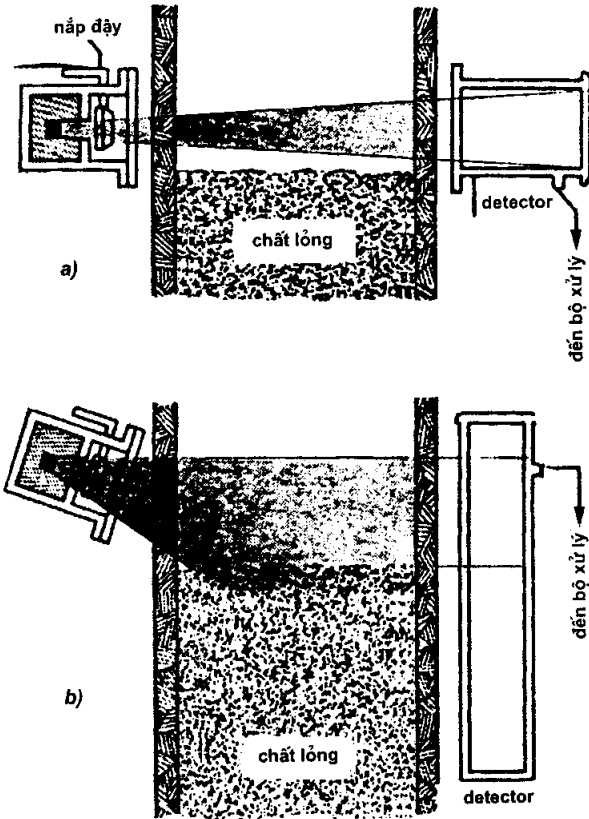
9.4.3. Phương pháp dùng bức xạ

Ưu điểm của phương pháp bức xạ là cho phép đo mà không cần tiếp xúc với chất lưu. Ưu điểm này rất thích hợp khi đo mức chất lưu ở những điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ cao, áp suất cao hoặc khi chất lưu có tính ăn mòn mạnh.

9.4.3.1. Phương pháp đo bằng hấp thụ tia γ

Trong phương pháp này, bộ phận phát và thu đặt ở bên ngoài và về hai phía của bình chứa. Bộ phận phát là một nguồn bức xạ tia γ , thí dụ nguồn ^{60}Co (có $T = 5,3$ năm) hoặc ^{137}Cs ($T = 33$ năm). Bộ thu là một buồng ion hóa.

Khi xác định mức, nguồn phát và bộ thu đặt đối diện ở mức ngưỡng cần phát hiện (h. 9.16a). Nguồn phát sẽ phát ra một chùm tia γ mảnh và song song. Phụ thuộc vào tình trạng mức chất lưu cao hơn hoặc thấp hơn mức ngưỡng, chùm tia sẽ bị suy giảm hoặc không suy giảm bởi chất lưu. Tình trạng này sẽ



Hình 9.16: Đo mức chất lưu bằng bức xạ tia gamma.

được phản ánh bằng tín hiệu nhị phân để nêu rõ mức chất lưu cao hơn hoặc thấp hơn ngưỡng cần kiểm tra.

Trong chế độ đo liên tục (h. 9.16b), nguồn phát ra chùm tia với một góc mở nhất định để quét toàn bộ chiều cao của mức chất lưu và của bộ thu. Khi mức chất lưu tăng thì cường độ của liều lượng chiếu nhận được ở bộ thu giảm đi do hiệu ứng hấp thụ tia gamma trong chất lưu. Như vậy tín hiệu ở đầu ra sẽ tỷ lệ với mức chất lưu trong bình chứa.

9.4.3.2. Phương pháp đo bằng sóng siêu âm

Trong chế độ đo liên tục phải sử dụng bộ chuyển đổi đóng vai trò vừa là bộ phát và vừa là bộ thu sóng âm. Bộ chuyển đổi đặt trên đỉnh của bình chứa. Sóng âm dạng xung phát ra từ bộ chuyển đổi đến bề mặt chất lưu sẽ bị phản xạ trở lại và lại được bộ chuyển đổi thu nhận để biến thành tín hiệu điện. Khoảng thời gian Δt từ thời điểm phát xung đến thời điểm thu sóng phản xạ sẽ tỷ lệ với khoảng cách từ bộ chuyển đổi đến bề mặt chất lưu. Như vậy qua Δt có thể đánh giá được mức của chất lưu trong bình chứa.

Bộ chuyển đổi tín hiệu có thể là gốm áp điện hoặc điện động. Bộ chuyển đổi dùng gốm áp điện cho sóng siêu âm tần số ~ 40 kHz. Bộ chuyển đổi điện động cho sóng âm tần số ~ 10 kHz. Sóng âm ít bị suy giảm nên thường dùng để đo ở khoảng cách lớn ($10 \div 30$ m), ngược lại, sóng siêu âm bị suy giảm mạnh hơn nên dùng để đo ở những khoảng cách nhỏ hơn.

CHƯƠNG 10

CẢM BIẾN ĐO ÁP SUẤT CHẤT LƯU

Áp suất tác động như một biến số trong các hiện tượng liên quan đến chất lỏng hoặc chất khí, do vậy nó là thông số quan trọng trong nhiều lĩnh vực như nhiệt động học, khí động lực học, âm học, cơ học chất lỏng, cơ học đất, lý sinh v.v...

Trong số các ngành công nghiệp khác nhau, các cảm biến áp suất được ứng dụng nhiều nhất trong lĩnh vực công nghiệp năng lượng. Đó là vì trong các thiết bị cung cấp năng lượng thủy lực, nhiệt, hạt nhân, cần phải đo và theo dõi áp suất một cách liên tục, nếu áp suất vượt quá giới hạn ngưỡng nó sẽ làm hỏng bình chứa và đường ống dẫn, thậm chí có thể gây nổ làm thiệt hại nghiêm trọng đến cơ sở vật chất và tính mạng con người.

Áp suất là thông số quan trọng can thiệp vào việc kiểm tra và điều khiển các bộ phận máy móc tự động hoặc do con người điều khiển. Đo áp suất cũng đóng vai trò đáng kể trong hoạt động của người máy. Trong trường hợp này áp suất được đo một cách trực tiếp trong các bộ phận chế hoặc gián tiếp để thay thế cho xúc giác con người (như da nhân tạo) khi cần xác định hình dạng hay lực cầm nắm các vật. Tất cả các hoạt động nói trên đều cần đến nhiều công cụ trong đó cảm biến áp suất là mắt xích đầu tiên. Các cảm biến này sẽ cung cấp dữ liệu liên quan đến áp suất của khí nén, hơi nước, dầu nhờn hoặc của các chất lỏng khác nhằm xác định sự vận hành của các cơ cấu, hệ thống, máy móc.

Trên thực tế, các nhu cầu đo áp suất rất đa dạng đòi hỏi các cảm biến đo áp suất phải đáp ứng một cách tốt nhất cho từng trường hợp cụ thể. Chính vì vậy các cảm biến đo áp suất chất lưu cũng rất đa dạng. Một nguyên nhân khác dẫn đến sự đa dạng này là độ lớn của áp suất cần đo nằm trong một dải giá trị rất rộng, từ chân không siêu cao đến áp suất siêu cao.

Độ lớn của áp suất được biểu diễn bằng giá trị tuyệt đối (so với chân không) hoặc giá trị tương đối (so với áp suất khí quyển). Nó cũng có thể được biểu diễn bằng sự khác nhau giữa hai áp suất. Trong chương này, trước khi trình bày các loại cảm biến đo áp suất chất lưu sẽ giới thiệu qua về áp suất và đơn vị đo áp suất.

10.1. Áp suất và đơn vị đo áp suất

Nếu cho một chất lỏng hoặc chất khí (gọi chung là chất lưu) vào trong một bình chứa nó sẽ gây nên lực tác dụng lên thành bình gọi là áp suất. Áp suất này phụ thuộc vào bản chất của chất lưu, thể tích mà nó chiếm trước và sau khi đưa vào bình và vào nhiệt độ.

Áp suất p của chất lưu được xác định từ lực dF tác dụng vuông góc lên diện tích ds của thành bình:

$$p = \frac{dF}{ds} \quad (10.1)$$

Thương số này không phụ thuộc vào định hướng của bề mặt ds mà chỉ phụ thuộc vào vị trí của nó trong chất lưu.

Nói chung các chất lưu luôn chịu tác động của trọng lực, bởi vậy trong trường hợp cột chất lưu chứa trong một ống hở đặt thẳng đứng, áp suất ở điểm M cách bề mặt tự do một khoảng bằng h sẽ bằng áp suất khí quyển p_0 cộng với trọng lượng của cột chất lưu có chiều cao h tác dụng lên một đơn vị diện tích bề mặt, nghĩa là:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (10.2)$$

trong đó ρ là khối lượng riêng của chất lưu, g là gia tốc trọng trường tại điểm đo áp suất. Nếu chất lỏng chịu sự tác động của một gia tốc thì cần phải tính thêm ảnh hưởng của lực quán tính đến áp suất cần đo.

Biểu thức $p = dF/ds$ cũng đồng thời xác định đơn vị của gia tốc. Trong hệ SI, một pascal (Pa) tương đương với áp suất đồng dạng do lực 1 newton (N) tác dụng lên bề mặt phẳng có diện tích bằng 1 m^2 . Áp suất 1 Pa tương đối nhỏ, vì thế trong đo đạc công nghiệp người ta thường sử dụng đơn vị áp suất là bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$).

Áp suất khí quyển ở điều kiện bình thường tương đương với áp suất do một cột thủy ngân có chiều cao 760 mm gây nên ở 0°C với gia tốc trọng trường

$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$. Áp suất này bằng 101325 Pa và thường được biểu diễn bằng mbar, $1 \text{ mbar} \approx 100 \text{ Pa}$. Trong bảng 10.1 trình bày mối quan hệ tương đối giữa các đơn vị đo áp suất thường sử dụng.

Bảng 10.1

Đơn vị đo áp suất	pascal (Pa)	bar (b)	kg/cm ²	atmosphe	cm cột nước	mm Hg	mbar
1 pascal	1	10^{-5}	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$0,9869 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$0,75 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}
1 bar	10^5	1	1,02	0,9869	1020	750	1000
1 kg/cm ²	$98 \cdot 10^3$	0,980	1	0,986	1000	735	980
1 atmosphe	101325	1,013	1,033	1	1033	760	1013
1 gam/cm ²	98	$98 \cdot 10^{-5}$	10^{-3}	$0,968 \cdot 10^{-3}$	1	0,735	0,98
1 mm Hg	133,3	$13,33 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,315 \cdot 10^{-3}$	136	1	1,333
1 mbar	100	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$0,9869 \cdot 10^{-3}$	1,02	0,750	1

10.2. Nguyên tắc đo

10.2.1. Chất lưu không chuyển động

Việc đo áp suất của chất lưu không chuyển động dẫn đến phép đo lực F tác dụng lên diện tích s của thành bình phân chia hai môi trường, trong đó một môi trường chứa chất lưu là đối tượng cần đo áp suất. Có thể chia ra ba trường hợp chính:

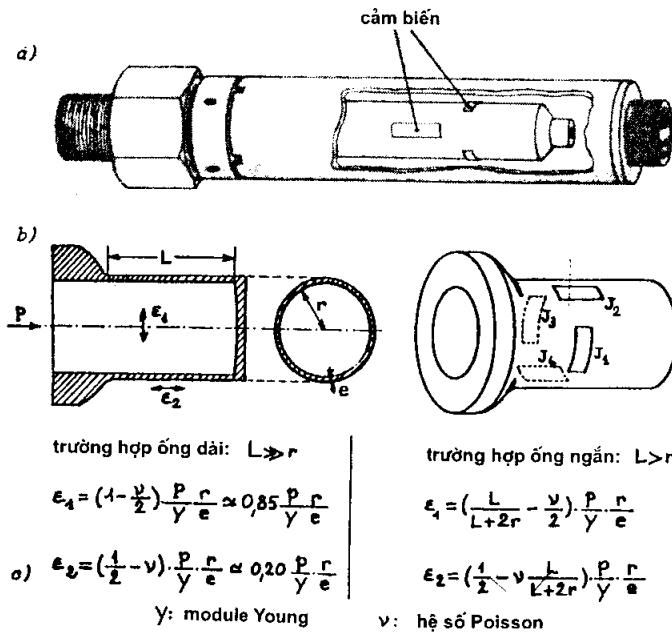
- Đo áp suất lấy qua một lỗ có tiết diện hình tròn được khoan trên thành bình.
- Đo trực tiếp sự biến dạng của thành bình do áp suất gây nên.
- Đo bằng một cảm biến áp suất để chuyển tín hiệu đầu vào (là áp suất) thành tín hiệu điện đầu ra chứa thông tin liên quan đến giá trị của áp suất cần đo và sự thay đổi của nó theo thời gian.

Trong cách đo trích lấy áp suất qua một lỗ nhỏ phải sử dụng một cảm biến đặt gần sát thành bình. Sai số của phép đo sẽ nhỏ với điều kiện là thể tích chết của kênh dẫn và của cảm biến phải không đáng kể so với thể tích tổng cộng của chất lưu cần đo áp suất.

Trong trường hợp đo trực tiếp, người ta gắn lên thành bình các cảm biến đo ứng suất để đo biến dạng của thành bình. Biến dạng này là hàm của áp suất.

Ngoài ra, có thể dùng một ống đặc biệt có khả năng biến dạng dưới tác dụng của áp suất để làm vật trung gian. Khi đo áp suất trong một đường ống dẫn chất lưu, người ta đặt một áp kế dạng ống nối tiếp với đường dẫn khảo sát. Bằng cách chọn vật liệu thích hợp, có thể sử dụng ống trong trường hợp có biến dạng lớn và tăng độ nhạy của áp kế.

Trong trường hợp đo bằng cảm biến áp suất, vật trung gian thường là các phần tử đo lực có một thông số, thí dụ thông số hình học, có khả năng thay đổi dưới tác dụng của lực $F = p \cdot s$. Trên hình 10.1 biểu diễn một ống dạng hình trụ bịt kín một đầu dùng để đo áp suất. Khi áp suất tác động lên thành ống nó sẽ làm thay đổi kích thước của ống theo hướng của trục và đường kính ống. Cảm biến áp suất có cấu tạo bao gồm một ống như vậy có trang bị



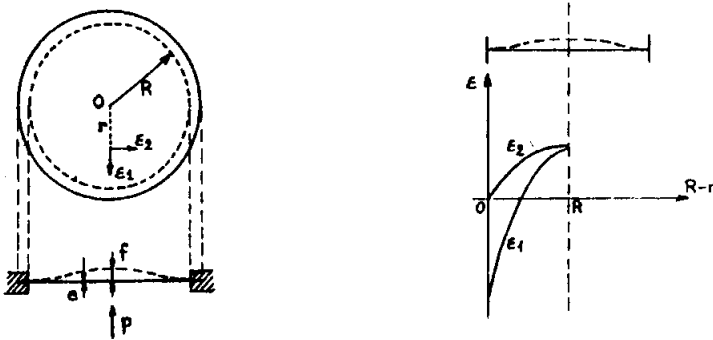
Hình 10.1: Cảm biến đo áp suất dùng ống bịt kín một đầu:

- a) hình dáng cấu tạo, b) mặt cắt của vật trung gian và vị trí đặt cảm biến, c) biểu thức tính biến dạng ngang (ϵ_1) và biến dạng dọc (ϵ_2).

thêm bộ chuyển đổi điện (thí dụ cảm biến ứng lực) để chuyển những thay đổi kích thước của ống dưới tác dụng của áp suất cần đo (đại lượng cơ trung gian) thành tín hiệu điện. Kích thước của ống được xác định theo ứng lực lớn

nhất có thể chấp nhận được. Các biến dạng được xác định theo công thức ở hình 10.1c. Cảm biến dùng ống bít kín có thể tích chết cỡ vài cm^3 nhưng trên thực tế thể tích này không thay đổi vì biến dạng của ống rất nhỏ.

Người ta cũng có thể sử dụng vật trung gian là màng mỏng để đo áp suất. Khi đó sự khác nhau về áp suất giữa hai mặt của màng sẽ tương ứng với lực tổng cộng F tác động lên màng và với biến dạng của nó (xác định ở mọi điểm theo đường kính, theo tiếp tuyến hoặc ở điểm giữa của màng) như biểu diễn trên hình 10.2. Đối với cùng một áp suất p , biến dạng của màng càng



phương trình biến dạng
$$z = \frac{3}{16} (1-\nu^2) \frac{p}{Y} \frac{(R^2-r^2)^2}{e^3}$$

biến dạng của tâm màng ($r=0$)
$$f = \frac{3}{8} (1-\nu^2) \frac{p}{Y} \frac{R^4}{2e^3}$$

biến dạng theo đường kính
$$\epsilon_1 = \frac{3}{8} (1-\nu^2) \frac{p}{Y} \frac{R^2-3r^2}{e^2}$$

biến dạng theo tiếp tuyến
$$\epsilon_2 = \frac{3}{8} (1-\nu^2) \frac{p}{Y} \frac{R^2-r^2}{e^2}$$

tần số riêng
$$f_0 = 0,47 \frac{e}{R^2} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\nu^2)}}$$

ρ : khối lượng riêng

Hình 10.2: Biến dạng của màng hình tròn được đóng khung theo chu vi.

lớn khi bán kính r càng lớn và bề dày càng nhỏ. Độ nhạy của màng cũng tăng khi biến dạng tăng lên. Hiện tượng trễ do biến dạng không phải là đàn hồi tuyệt đối sẽ ảnh hưởng đến độ tuyến tính của màng. Mặt khác, khi tỷ số R/e tăng sẽ làm cho tần số riêng của màng giảm đi. Bởi vậy, thông thường tỷ số e/R được chọn để dung hòa giữa hai yếu tố, một mặt là ứng lực mà màng có thể chịu đựng được và mặt khác để cho tần số riêng càng lớn càng tốt. Trên thực tế sự lựa chọn này phụ thuộc vào đặc tính của vật liệu chế tạo màng và công nghệ xử lý nhiệt đã áp dụng cho nó.

Ngoài dạng ống hình trụ và màng phẳng, vật trung gian dùng để đo áp suất chất lưu có thể là màng dạng sóng, piston kết hợp với lò xo, áp kế dẫn nở, ống xi phông (dạng xếp thành nếp), ống hình cong bịt một đầu v.v... Tùy từng trường hợp cụ thể mà người ta chọn vật trung gian cho thích hợp với áp suất cần đo.

10.2.2. Chất lưu chuyển động

Khi nghiên cứu chất lưu chuyển động cần phải tính đến ba dạng áp suất cùng tồn tại: áp suất tĩnh (p_s) của chất lưu không chuyển động, áp suất động p_d do chuyển động với vận tốc v của chất lưu gây nên và áp suất tổng cộng P_t là tổng của hai áp suất trên:

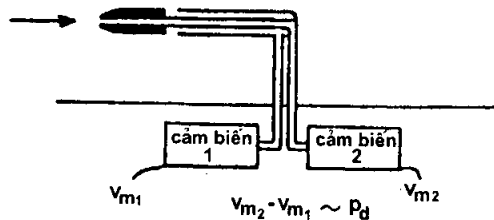
$$P_t = p_s + p_d \quad (10.3)$$

Áp suất tĩnh p_s được đo bằng một trong các phương pháp vừa trình bày. Áp suất động tác dụng lên mặt phẳng đặt vuông góc với dòng chảy sẽ làm tăng áp suất tĩnh và có giá trị tỷ lệ với bình phương vận tốc, nghĩa là:

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (10.4)$$

trong đó ρ là khối lượng riêng của chất lưu.

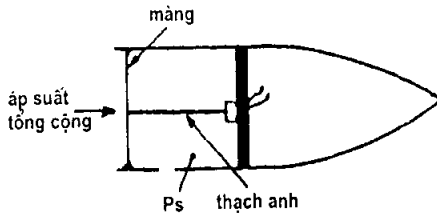
Việc đo các áp suất này trong chất lưu chuyển động có thể được thực hiện bằng cách nối với hai đầu ra của ống Pitot hai cảm biến, một cảm biến đo áp suất tổng cộng và một cảm biến đo áp suất tĩnh. Khi đó áp suất động sẽ là hiệu của áp suất tổng cộng và áp suất tĩnh (h. 10.3). Có thể trang bị trực tiếp



Hình 10.3: Đo áp suất động bằng ống Pitot.

một ăng ten là ống Pitot với hai cảm biến áp suất kích thước nhỏ để đo áp suất động. Các màng của hai cảm biến này được đặt sao cho một màng vuông góc với dòng chảy và màng thứ hai song song với trục của ống. Trong

một loại ống đơn giản hơn áp suất tĩnh được đo bằng cách khác: người ta đặt áp suất tổng cộng lên mặt trước của màng còn áp suất tĩnh thì đặt lên mặt sau của màng (h. 10.4). Như vậy tín hiệu đo cảm biến cung cấp sẽ là sự khác nhau giữa áp suất tổng cộng và áp suất tĩnh, bằng cách này người ta đo được áp suất động của chất lưu.



Hình 10.4: Cảm biến đo áp suất động ($P_t - p_s$) kết hợp với bộ chuyển đổi áp điện.

10.3. Vật trung gian

Việc lựa chọn vật trung gian để đo áp suất chất lưu phụ thuộc vào bản chất của áp suất cần đo, độ lớn của nó và phương pháp chuyển đổi tín hiệu (chuyển đổi độ dịch chuyển hay biến dạng thành tín hiệu điện). Vật trung gian được đặc trưng bởi độ cứng (là tỷ số giữa lực tác dụng và độ dịch chuyển) và tần số riêng của nó. Độ nhạy tỷ lệ nghịch với độ cứng r trong khi tần số riêng f_0 lại tăng khi độ cứng tăng lên:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{r}{M}} \quad (10.5)$$

với M là khối lượng của vật trung gian và các phần tử khác (như màng, thanh đỡ...) liên kết cứng với nó.

Khi tăng tỷ số r/M khả năng chịu rung động và gia tốc của vật trung gian sẽ tăng lên. Tiếp theo, bằng cách nâng tần số riêng của vật trung gian, có thể tăng độ nhanh của đáp ứng. Ngược lại, độ nhạy sẽ giảm đi bởi vì độ cứng càng lớn thì vật biến dạng càng kém. Sự giảm độ nhạy này đến một mức độ nào đó sẽ làm cho tín hiệu yếu đi so với nhiều và làm sai lệch kết quả đo áp suất của chất lưu.

Đối với mỗi loại vật trung gian tồn tại một mối quan hệ bất biến giữa khối lượng M , độ nhạy S và tần số riêng f_0 : $M S f_0 = \text{const}$. Thí dụ, trong các

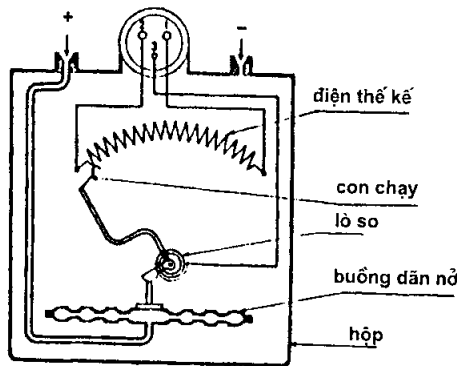
trường hợp cụ thể, mối quan hệ này sẽ là $MSf_0 = 0,043$ đối với màng hình tròn, và $MSf_0 = 0,25$ đối với vật trung gian dạng thanh dài cố định ở hai đầu. Trong mọi trường hợp, độ cứng, độ nhạy và dịch chuyển có liên quan đến ứng lực cực đại mà vật trung gian có thể chịu đựng được. Ứng lực này phụ thuộc vào vật liệu chế tạo vật trung gian. Việc lựa chọn vật liệu phải thỏa mãn điều kiện là tuân thủ các đặc trưng đo lường của cảm biến.

10.4. Phương pháp chuyển đổi tín hiệu

10.4.1. Chuyển đổi bằng biến thiên trở kháng

10.4.1.1. Điện thế kế

Cảm biến áp suất vi sai dùng điện thế kế để chuyển đổi tín hiệu được biểu diễn trên hình 10.5. Con chạy của điện thế kế được nối với buồng dẫn nở sao cho biến dạng của vật trung gian này kéo theo dịch chuyển x của con chạy.



Hình 10.5: Cảm biến áp suất vi sai chuyển đổi tín hiệu bằng điện thế kế.

Đối với điện thế kế có điện trở tổng R_n được nuôi bằng suất điện động e_s , điện thế giữa con chạy và một đầu của điện trở được biểu diễn bằng biểu thức:

$$v_m = e_s \cdot \frac{R(x)}{R_n} \quad (10.6)$$

trong đó $R(x)$ là điện trở giữa con chạy và một đầu của điện trở tổng. Nếu có sự tỷ lệ thuận giữa áp suất p cần đo và biến dạng của vật trung gian, giữa biến dạng của vật trung gian với dịch chuyển x của con chạy và giữa dịch

chuyển của con chạy với điện trở $R(x)$ thì ta sẽ có biểu thức của điện thế v_m như sau:

$$v_m = k.e_s.p \quad (10.7)$$

trong đó k là hằng số đặc trưng cho cảm biến.

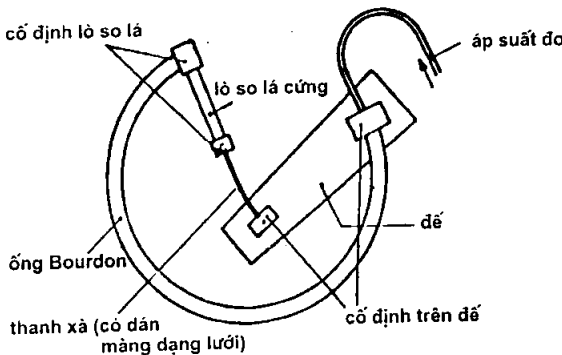
Các đặc trưng đo lường của cảm biến dùng điện thế kể để chuyển đổi tín hiệu được liệt kê như sau:

- Độ tuyến tính: $\pm 0,5$ đến 1% của dải đo;
- Độ trễ: $\pm 0,1$ đến $\pm 1 \%$ của dải đo;
- Độ phân giải: tốt hơn $0,03 \%$ dải đo;
- Độ nhanh: tốc độ đáp ứng từ 15 đến 100 ms;
- Tín hiệu đầu ra: cỡ một vài vôn;

Ưu điểm của cảm biến loại này là tín hiệu ra lớn, có thể sử dụng kết hợp với bộ khuếch đại và có khả năng thích ứng với sự thay đổi không tuyến tính. Nhược điểm của cảm biến là thời gian sử dụng bị hạn chế và nhạy với rung động.

10.4.1.2. Cảm biến dùng màng dạng lưới

Cảm biến dùng màng dạng lưới dán lên vật trung gian thường được sử dụng để biến đổi trực tiếp biến dạng ϵ do áp suất gây nên thành biến thiên điện trở $\Delta R/R$. Biến thiên điện trở này được đo bằng phương pháp cầu Wheatstone. Trên hình 10.6 biểu diễn một thiết bị đo áp suất sử dụng thanh xà có dán cảm biến biến dạng là màng dạng lưới. Trong trường hợp này vật trung gian



Hình 10.6: Thiết bị đo áp suất có phần tử đo lực trang bị cảm biến dùng màng dạng lưới.

là ống Bourdon chịu tác động của áp suất cần đo. Thiết bị có thể được sử dụng để đo áp suất từ một vài bar đến hàng ngàn bar.

Đối với dải áp suất thấp hơn 1 bar, có thể sử dụng cảm biến màng mỏng hoặc kết hợp màng mỏng với một phân tử đo lực. Biến dạng của màng được chuyển đổi trực tiếp thành biến thiên trở kháng bằng cách đặt hai cảm biến theo đường kính và hai cảm biến theo tiếp tuyến tạo thành một cầu đo. Trong một số trường hợp người ta chỉ dùng hai cảm biến màng mỏng đặt theo đường kính, cảm biến thứ nhất đặt ở tâm vật trung gian (dạng màng hình tròn) và cảm biến thứ hai (dùng để bù trừ nhiệt) đặt gần mép của vật này tại điểm có ứng lực theo chiều ngược lại, do vậy độ dẫn trở trung bình sẽ bằng không (xem lại hình 10.2).

Cảm biến áp suất dùng màng dán trên phân tử đo lực có độ tuyến tính và độ trễ nằm trong khoảng từ $\pm 0,2$ đến $\pm 1\%$ dải đo, độ phân giải tốt hơn $0,02\%$ và độ chính xác đạt từ $0,5$ đến 2% . Nhược điểm của loại cảm biến này là tín hiệu đầu ra nhỏ (cỡ mV) và thời gian sống ngắn.

Cảm biến dùng màng dạng lưới dán trên phân tử đo lực có khả năng bị già hóa là do lớp keo dán biến chất. Để khắc phục nhược điểm này người ta thường sử dụng các màng dạng lưới chế tạo trực tiếp trên phân tử đo lực.

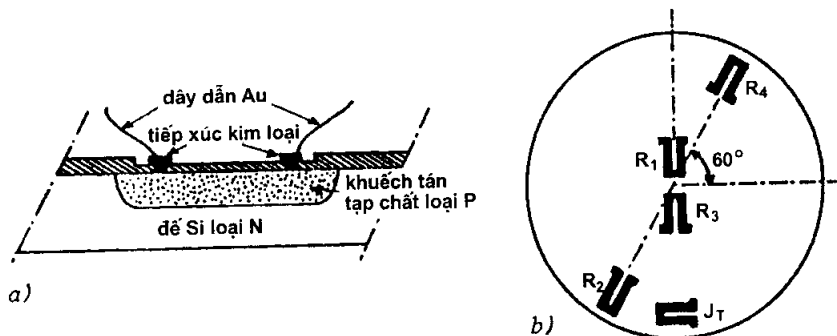
10.4.1.3. Cảm biến áp trở

Cảm biến áp trở được chế tạo trực tiếp trên đế silic loại N. Ưu điểm của vật liệu này là khi ở dạng đơn tinh thể nó có tính đàn hồi tốt nên hiệu ứng trễ cơ học rất nhỏ và có thể bỏ qua. Hơn nữa đây là vật liệu bán dẫn nên có thể dùng làm đế để chế tạo cảm biến bằng kỹ thuật khuếch tán planar. Sơ đồ nguyên lý của cảm biến áp trở được biểu diễn trên hình 10.7a. Trong cảm biến này, đế silic loại N đảm bảo việc chuyển đổi áp suất tác dụng lên nó thành ứng suất nội. Các tạp chất loại P được khuếch tán vào những vùng có định hướng so với trục tinh thể sao cho đảm bảo độ nhạy tốt nhất bằng cách kết hợp các ứng lực sinh ra do biến dạng đế silic. Trên hình 10.7b là trường hợp màng định hướng (100) có gắn bốn cảm biến, trong đó hai cảm biến đặt ở tâm theo hướng (110) và hai cảm biến khác đặt ở gần biên tạo thành với hướng (100) một góc bằng 60° . Với cách đặt cảm biến như vậy, sự thay đổi của điện trở theo ứng suất nội đối với hai cặp cảm biến sẽ bằng nhau nhưng có dấu ngược nhau:

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4 = \Delta R \quad (10.8)$$

Khi đó điện áp V_m đo ở hai đầu đường chéo của cầu được nuôi bằng dòng một chiều sẽ là:

$$V_m = \frac{I}{4} \cdot (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) = I \cdot \Delta R \quad (10.9)$$



Hình 10.7: Cảm biến áp điện: a) sơ đồ nguyên lý cấu tạo, b) vị trí đặt cảm biến trên màng.

Sự thay đổi tương đối của trở kháng phụ thuộc vào ứng lực σ được biểu diễn bằng biểu thức:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi \sigma \quad (10.10)$$

trong đó π là hệ số áp trở của tinh thể ($\sim 4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$), và biểu thức của điện áp được viết lại dưới dạng:

$$V_m = \pi \cdot I \cdot R_0 \cdot \sigma \quad (10.11)$$

Độ nhạy của cảm biến áp trở phụ thuộc vào độ lớn của áp suất cần đo. Đối với dải áp suất thấp, độ nhạy của cảm biến thay đổi trong khoảng từ 0,1 đến 3 mV/mbar phụ thuộc vào dạng hình học của màng và cường độ dòng điện. Trong dải áp suất từ hàng trăm mbar đến hàng trăm bar, độ nhạy thay đổi trong khoảng từ 0,2 đến 12,5 mV/bar (tương đương với tín hiệu đầu ra từ 100 đến 300 mV).

Cảm biến áp trở loại khuếch tán có thể làm việc trong dải nhiệt độ từ -40°C đến $+125^\circ\text{C}$ phụ thuộc vào tỷ lệ pha tạp. Người ta cũng có thể bù trừ những thay đổi nhiệt của điện trở (của cảm biến) bằng cách đưa thêm vào bộ

điều hòa một thiết bị hiệu chỉnh được điều khiển bằng đầu đo nhiệt độ J_T đặt trong màng (h. 10.7b).

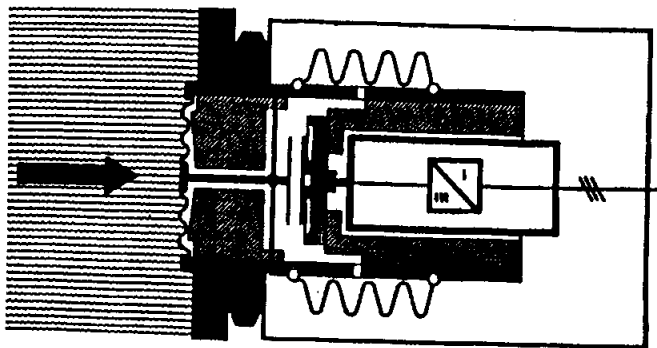
Cảm biến áp suất dùng áp trở khuếch tán trực tiếp trên vật trung gian có độ tuyến tính và độ trễ nằm trong khoảng từ $\pm 0,2$ đến $\pm 2\%$ của dải đo, độ phân giải tốt hơn $0,1\%$ và độ chính xác từ $0,1$ đến $0,5\%$. Độ nhanh phụ thuộc vào tần số riêng của màng. Tần số này phụ thuộc vào đường kính và bề dày màng và thay đổi trong khoảng từ 50 kHz đến 1 MHz.

Ưu điểm của cảm biến loại này là tín hiệu ra tương đối lớn, kích thước nhỏ và khối lượng không đáng kể. Trên thực tế có thể chế tạo các màng có đường kính cỡ mm, không nhạy cảm với rung động và va chạm mạnh.

10.4.2. Chuyển đổi bằng biến thiên điện dung

Các cảm biến áp suất loại tụ điện có nguyên lý hoạt động rất đơn giản. Điện dung của tụ được thay đổi bằng cách tác động lên một trong những thông số làm thay đổi điện trường giữa hai vật dẫn tạo thành hai bản cực của tụ điện. Một trong hai bản cực này được nối cơ học với vật trung gian chịu tác động của áp suất cần đo. Thí dụ, nếu vật trung gian là một màng mỏng thì điện dung của tụ điện sẽ thay đổi theo sự dịch chuyển của tâm màng khi nó bị áp suất chất lưu tác động.

Trên hình 10.8 biểu diễn một cảm biến áp suất chất lưu dùng chuyển đổi điện dung. Trong trường hợp tụ điện hình trụ, diện tích bề mặt đối diện của hai bản cực sẽ thay đổi tuyến tính theo sự dịch chuyển của bản cực. Nếu độ trễ cơ học của màng nhỏ, đối với tụ điện có bản cực hình trụ, sai số do độ tuyến tính gây nên không lớn hơn $0,1\%$.



Hình 10.8: Cảm biến áp suất chất lưu chuyển đổi tín hiệu bằng biến thiên điện dung.

Nếu gọi khoảng cách giữa hai bản cực là D_0 và sự thay đổi ΔD của khoảng cách này rất nhỏ ($\Delta D < D_0$) thì biến thiên điện dung của tụ được biểu diễn bằng biểu thức:

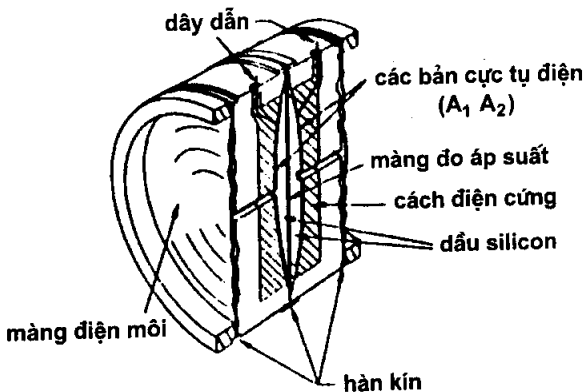
$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta D}{D_0} \quad (10.12)$$

Trên thực tế, biến thiên của điện dung sẽ phức tạp hơn nhiều nếu một bản cực của tụ điện là điện cực động và có thể bị biến dạng dưới tác dụng của áp suất, thí dụ trường hợp vật trung gian là màng mỏng đóng vai trò một bản cực. Trong những trường hợp như vậy, để hạn chế sai số tuyến tính dưới $n\%$, cần phải đảm bảo sao cho độ dịch chuyển của màng tuân thủ điều kiện:

$$\Delta D < \frac{n}{50} D_0 \quad (10.13)$$

Thí dụ, nếu $D_0 = 50 \mu\text{m}$, để có sai số $n = 0,5\%$ thì độ dịch chuyển của tâm màng phải nhỏ hơn $0,5 \mu\text{m}$.

Một phương pháp khác dùng chuyển đổi tín hiệu bằng biến thiên điện dung vì sai cũng thường được áp dụng. Trên hình 10.9 biểu diễn sơ đồ nguyên lý của cảm biến áp suất dùng chuyển đổi điện dung vì sai do hãng Rosemount chế tạo.



Hình 10.9: Cảm biến áp suất dùng chuyển đổi điện dung vì sai.

Các bản cực A_1 và A_2 được gắn với chất điện môi cứng, chúng kết hợp với màng (nằm ở giữa hai bản cực) để tạo thành các tụ điện C_1 (phía áp suất

cao p_1) và C_2 (phía áp suất thấp p_2). Độ dịch chuyển cực đại của tâm màng có thể đạt tới $50 \div 100 \mu\text{m}$ tùy thuộc vào kiểu chế tạo.

Các áp suất p_1 và p_2 của hai môi trường đo sẽ tác động lên màng đo thông qua vai trò của các màng điện môi và dầu silicon. Khi bị biến dạng, màng sẽ dịch chuyển giữa hai bản cực cố định của các tụ điện và gây nên tín hiệu đo i_m tỷ lệ với sự chênh lệch áp suất $p_1 - p_2$ giữa hai môi trường:

$$i_m = K \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = K'(p_1 - p_2) \quad (10.14)$$

Các cảm biến áp suất dùng tụ điện có độ tuyến tính đạt từ 0,5 đến 2% dải đo, độ trễ nhỏ hơn 0,02%, độ phân giải tốt hơn 0,1% và độ chính xác từ 0,2 đến 0,5%. Độ nhanh đáp ứng của cảm biến phụ thuộc vào tần số riêng, tần số này thay đổi trong khoảng từ 50 đến 200 kHz tùy thuộc vào đường kính của màng đo.

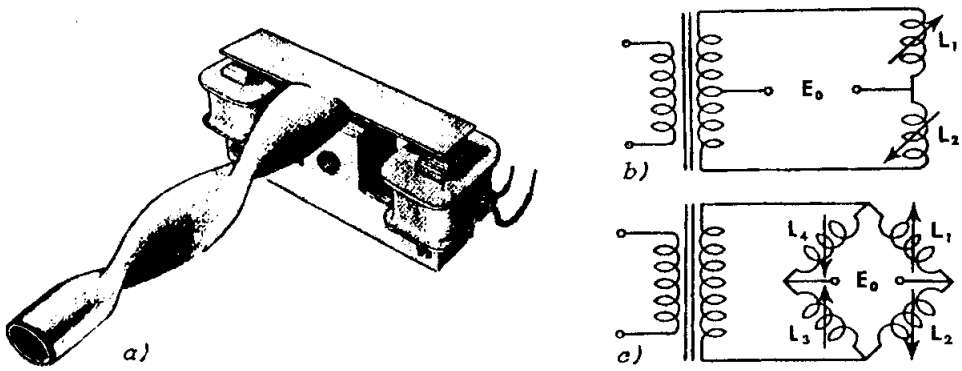
Ưu điểm của cảm biến là cho tín hiệu đầu ra lớn, từ 20 đến 200 mV, khối lượng nhỏ và ít nhạy cảm với gia tốc. Nhược điểm của nó là nhạy cảm với thay đổi của nhiệt độ (trừ trường hợp đo theo điện dung vi sai) và trở kháng đầu ra lớn.

10.4.3. Chuyển đổi bằng biến thiên độ tự cảm

Trong các cảm biến đo áp suất chất lưu dùng chuyển đổi bằng biến thiên độ tự cảm người ta sử dụng sự biến thiên từ trở của một mạch từ. Biến thiên này là do biến điệu của một hoặc nhiều khe từ gây nên.

Trên hình 10.10a biểu diễn một cảm biến kết hợp ống Bourdon xoắn với một mạch từ. Bản cực của mạch từ này nối với đầu tự do của ống Bourdon, nó có thể quay quanh một điểm cố định khi có lực áp suất tác động. Khi bản cực quay sẽ tạo nên biến thiên vi sai của các khe từ $+\Delta e$ và $-\Delta e$ (từ 0,05 mm đến 0,1 mm). Sự thay đổi độ tự cảm L_1 và L_2 được chuyển thành tín hiệu đo bằng một cầu kết hợp L_1 và L_2 với hai nửa của cuộn thứ cấp của biến thế đầu vào (h. 10b) hoặc với hai cuộn cảm cố định L_3 và L_4 (h. 10c).

Các cảm biến áp suất dùng chuyển đổi bằng biến thiên độ tự cảm có độ tuyến tính thay đổi trong khoảng từ $\pm 0,5$ đến 3% của dải đo. Độ trễ của cảm biến nằm trong khoảng từ $\pm 0,1$ đến 1% của dải đo với độ phân giải là 0,01%. Độ chính xác đạt từ 0,5 đến 2%. Tín hiệu đầu ra thay đổi trong khoảng từ 100 đến 400 mV.



Hình 10.10: Cảm biến áp suất dùng chuyển đổi từ trở: a) cấu tạo, b) mạch đo nửa cầu, c) mạch cầu hoàn chỉnh kết hợp hai mạch từ hoạt động ở chế độ đẩy-kéo.

Nhược điểm của cảm biến áp suất chất lưu dùng chuyển đổi bằng biến thiên độ từ cảm là rất nhạy cảm với rung động, va chạm và từ trường. Ngoài ra, nguồn nuôi phải được ổn định theo biên độ và tần số.

10.4.4. Chuyển đổi bằng hiệu ứng áp điện

Khi sử dụng vật trung gian là một cấu trúc áp điện, người ta có thể chuyển đổi trực tiếp ứng lực dưới tác động của lực F (do áp suất chất lưu gây nên) thành tín hiệu điện Q . Thí dụ, nếu tạo điện cực kim loại trên một phiến mỏng cắt từ tinh thể thạch anh theo hướng vuông góc với một trong ba trục điện rồi tác dụng lên nó một lực cơ học (thí dụ lực nén) thì sẽ xảy ra hiện tượng phân cực điện: trên các bản cực kim loại xuất hiện các điện tích Q . Điện tích này tỷ lệ với lực tác dụng:

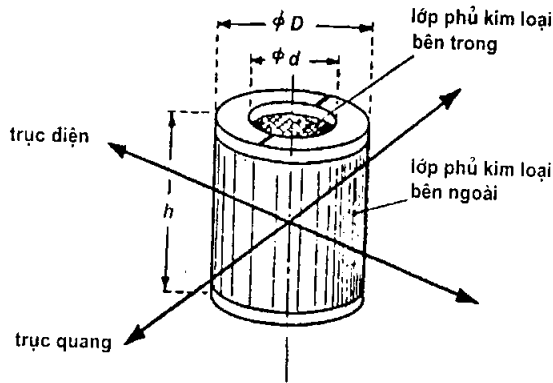
$$Q = kF \quad (10.15)$$

trong đó k là hằng số áp điện và F là lực tác động. Trong trường hợp thạch anh, $k = 2,32 \cdot 10^{-12}$ culong/newton.

Cấu trúc của phần tử áp điện dạng ống chò phép tăng điện tích bằng cách đơn giản hóa kiểu kết hợp các phần tử. Đối với cấu trúc loại này, điện tích trên các bản cực được tính từ biểu thức:

$$Q = kF \frac{4dh}{D^2 - d^2} \quad (10.16)$$

trong đó d và D là đường kính trong và đường kính ngoài của ống, h là chiều cao của phần phủ kim loại. Ống được làm bằng cách kết hợp hai phần tử phân cực ngược với mặt đối xứng (h. 10.11).



Hình 10.11: Phần tử áp điện dạng ống.

Các cảm biến áp điện có thể được giảm thiểu kích thước một cách dễ dàng. Trong trường hợp ống dạng hình trụ có thể giảm đường kính xuống vài milimet.

Dải áp suất đo được của cảm biến áp điện nằm trong khoảng từ vài mbar đến hàng ngàn bar. Độ nhạy của cảm biến thay đổi trong khoảng từ 0,05 pC/bar đến 1 pC/bar phụ thuộc vào hình dạng của phần tử áp điện và dải đo. Độ tuyến tính thay đổi trong phạm vi từ $\pm 0,1$ đến ± 1 % của dải đo với độ trễ nhỏ hơn 0,0001 % và độ phân giải 0,001 %. Độ lớn của tín hiệu đầu ra thay đổi từ 5 đến 100 mV.

Ưu điểm của cảm biến áp suất dùng chuyển đổi tín hiệu bằng áp điện là đáp ứng tần số rất tốt, thích hợp để đo áp suất thay đổi nhanh, kích thước nhỏ, ít nhạy cảm với gia tốc và không cần nguồn nuôi cảm biến.

Nhược điểm của cảm biến loại này là nhạy cảm với thay đổi của nhiệt độ và cần sử dụng cáp nối đặc biệt.

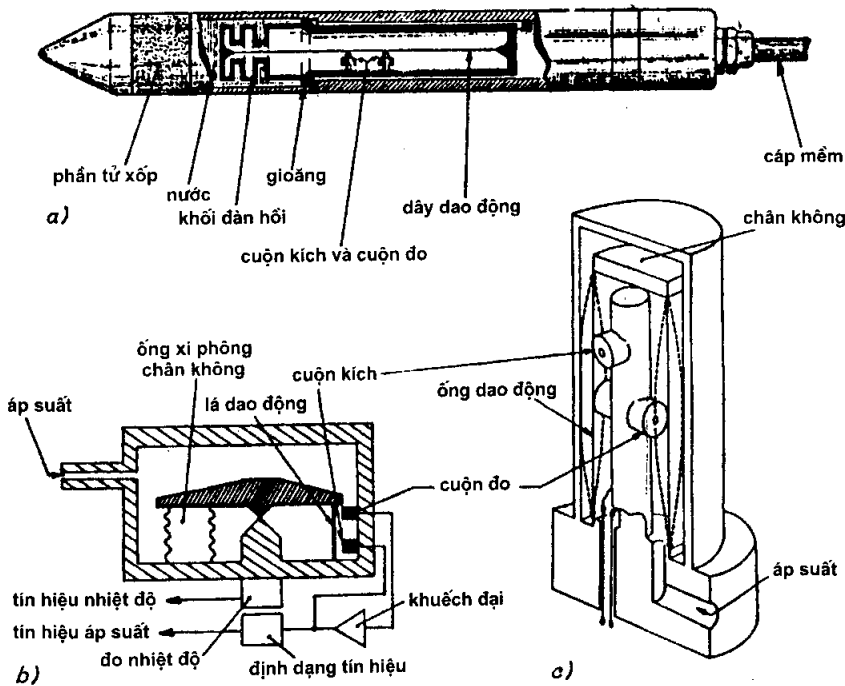
10.4.5. Chuyển đổi bằng dao động cơ điện

Trong các cảm biến dùng chuyển đổi bằng dao động cơ điện, bộ phận dao động là một phần tử dao động cơ có tần số phụ thuộc vào lực tác dụng lên nó. Lực đo áp suất gây nên có thể tác động trực tiếp hoặc gián tiếp lên

phần tử dao động. Nó làm thay đổi tần số của dao động cơ và do vậy làm biến thiên tần số do bộ dao động phát ra.

10.4.5.1. Bộ dao động dùng dây, lá mỏng hoặc ống dao động

Thông thường bộ dao động bao gồm một vật trung gian chịu tác động của áp suất cần đo kết hợp với một phần tử dao động cơ học. Đây là trường hợp dây hoặc lá thép dao động được căng giữa một điểm cố định và một điểm khác nằm trên màng hoặc ống xi phông. (h. 10.12 a và b). Trong một số trường hợp, bộ dao động chỉ có một vật trung gian đóng vai trò phần tử dao động (h. 10.12c).



Hình 10.12: Cảm biến áp suất dùng chuyển đổi dao động cơ điện:
a) dây dao động, b) lá dao động, c) ống dao động.

Các dao động được duy trì nhờ có hai cuộn dây. Khi phần tử dao động bằng thép dao động với tần số f , nó làm cho từ trở của mạch biến thiên tuần hoàn và gây nên một điện thế cảm ứng cùng tần số trong cuộn đo. Điện thế này được khuếch đại để nuôi cuộn kích tạo dao động.

Tần số f của dao động cơ phụ thuộc vào ba yếu tố:

- Hình dạng và kích thước (chiều dài l và tiết diện s mặt cắt ngang) của phần tử dao động;
- Tính chất vật lý của vật liệu chế tạo phần tử dao động (khối lượng riêng ρ);
- Lực tác dụng lên phần tử dao động.

Trong trường hợp dây dao động được căng giữa một điểm cố định và một điểm chịu tác động của áp suất, biểu thức của tần số dao động có dạng:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot s}} \quad (10.17)$$

trong đó F là lực căng dây.

Đối với trường hợp ống dao động, mối quan hệ giữa áp suất cần đo và tần số dao động được biểu diễn bằng biểu thức:

$$p = A(f - f_0) + B(f - f_0)^2 + C(f - f_0)^3 \quad (10.18)$$

trong đó f_0 là tần số dao động khi chưa có sự tác động của áp suất và f là tần số dao động khi áp suất tác động bằng p ; A , B , C là các hằng số của cảm biến.

Trên hình 10.12a biểu diễn cảm biến dùng để đo áp suất chất lưu trong các khe hẹp. Áp suất được truyền qua phần tử xoắn làm cho khối đàn hồi bị biến dạng dọc và do vậy làm thay đổi sức căng của dây và tần số dao động của nó. Các dải đo có thể thay đổi trong những khoảng giá trị khác nhau: $0 \div 2$, $0 \div 5$, $0 \div 10$ và $0 \div 20$ bar. Độ chính xác của cảm biến cỡ 0,3 % với độ phân giải bằng 0,1 %.

Trên hình 10.12b biểu diễn cảm biến đo áp suất tuyệt đối dùng phần tử dao động là lá thép. Nó được ứng dụng nhiều trong kỹ thuật hàng không. Trong cảm biến này, ống xi phông kín đã hút chân không (để làm áp suất so sánh) gây nên lực căng lá thép dao động. Giá trị của áp suất được tính từ giá trị của tần số và nhiệt độ. Dải áp suất đo của cảm biến nằm trong khoảng từ 0 đến 3000 mbar. Độ chính xác thay đổi trong phạm vi từ $\pm 0,01$ đến $\pm 0,02$ % phụ thuộc vào giá trị của áp suất đo.

Ưu điểm của cảm biến dùng dây, lá và ống dao động là đo theo tần số, độ lặp lại, độ phân giải và độ chính xác cao. Tuy vậy nhược điểm của loại cảm

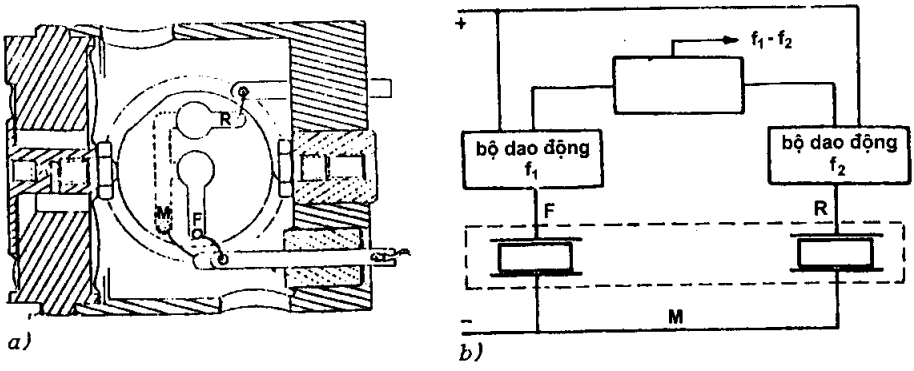
biến này là sự không tuyến tính, dải thông hẹp và nhạy với nhiệt độ, dao động và va chạm.

10.4.5.2. Bộ dao động thạch anh

Khi thay đổi bề dày lớp không khí giữa phiến thạch anh dao động và một trong các điện cực của nó có thể làm thay đổi tần số dao động đến 0,1 %. Hiệu ứng này được áp dụng để đo áp suất của chất lưu.

Trong cảm biến dùng bộ dao động thạch anh, một điện cực của phiến thạch anh được ghép nối cứng với vật trung gian chịu tác động của áp suất cần đo. Tín hiệu của tần số thay đổi được trộn với tín hiệu của tần số cố định từ một phiến thạch anh khác dùng để so sánh. Tần số ở đầu ra (sau khi đã được lọc) sẽ cung cấp thông tin về độ lớn của áp suất cần đo.

Trên hình 10.13 biểu diễn nguyên lý hoạt động của một cảm biến áp suất chất lưu dùng chuyển đổi thạch anh dao động. Lực F được đặt trên mép của một đĩa làm bằng thạch anh có bề dày nhỏ. Hai bản tiếp xúc được đặt ở hai



Hình 10.13: Cảm biến áp suất chất lưu dùng chuyển đổi dao động thạch anh.

điểm trên đĩa cho phép từng bản duy trì dao động riêng biệt với tần số cao. Một trong hai điểm này được đặt ở vị trí có ứng lực do áp suất cần đo tác động. Điểm thứ hai ở vị trí không chịu tác động của áp suất và được sử dụng để so sánh. Tín hiệu đầu ra là kết quả so sánh giữa hai tần số dao động, nó tỷ lệ với độ lớn của áp suất cần đo.

Cảm biến có thể được sử dụng để đo áp suất chất lưu có giá trị nằm trong khoảng từ 0 đến 1 bar với sai số (do có sự không tuyến tính và độ trễ) thấp hơn ±0,025 %.

10.4.6. Các phương pháp chuyển đổi khác

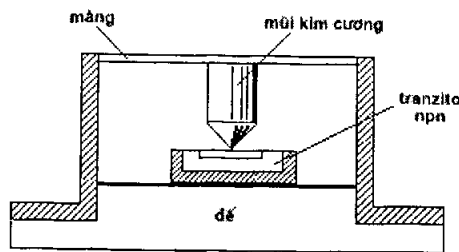
10.4.6.1. Phương pháp quang điện

Trong các cảm biến đo áp suất chất lưu, người ta có thể biến đổi sự dịch chuyển hoặc biến dạng của vật trung gian thành sự thay đổi cường độ ánh sáng bằng phương pháp tán xạ hoặc phương pháp chặn dần các tia sáng phát ra từ một nguồn sáng. Trong phương pháp thứ nhất, ánh sáng bị tán xạ khi nó phản xạ từ bề mặt của vật trung gian chịu tác động của biến dạng (thí dụ bề mặt được đánh bóng của một màng) hoặc từ một chiếc gương được gắn cơ học với vật trung gian. Trong trường hợp màng, độ chính xác có thể bị ảnh hưởng do sự thay đổi của hệ số phản xạ dưới tác dụng của hiện tượng ô xy hoá bề mặt hoặc do các hiệu ứng nhiệt. Trong phương pháp thứ hai, người ta sử dụng một cánh cửa động có liên hệ cơ học với một màng hay một ống xi phông chịu tác động của áp suất chất lưu cần đo.

Trong cả hai phương pháp nói trên, ánh sáng biến điệu được tiếp nhận trực tiếp bằng một photodiode hoặc gián tiếp thông qua vai trò trung gian của một vật dẫn sáng (như cáp quang chẳng hạn).

10.4.6.2. Phương pháp tranzito áp điện

Trong các tranzito áp điện NPN, khi dùng một mũi nhọn tác dụng lực F lên emitor, độ dẫn của vùng chuyển tiếp emitor-bazơ có thể bị thay đổi. Người ta đã ứng dụng hiệu ứng này để đo áp suất chất lưu: trong mạch khuếch đại sử dụng một trong những tranzito loại này, tín hiệu điện ở đầu ra tỷ lệ với lực tác dụng. Trên hình 10.14 biểu diễn một cảm biến áp suất chất lưu trong đó sử dụng màng gắn với một mũi nhọn tác động lên emitor của một tranzito áp điện.



Hình 10.14: Cảm biến đo áp suất chất lưu dùng tranzito áp điện.

Các cảm biến dùng tranzito áp điện có thể đo áp suất chất lưu có giá trị nằm trong khoảng từ một vài milibar đến 1,5 bar. Đối với điện áp nuôi bằng 10 V, độ nhạy trung bình đạt 0,1 V/mbar.

CHƯƠNG 11

CẢM BIẾN ĐO CHÂN KHÔNG

11.1. Dải chân không và các loại chân không kế

Theo truyền thống người ta chia chân không thành bốn dải tương đương với bốn vùng áp suất. Trong mỗi dải, một số đặc trưng và tính chất của chất khí có thể thay đổi khác nhau. Tương ứng với mỗi dải chân không có một loại cảm biến dựa trên một tính chất đặc biệt của chất khí trong dải đó. Trong bảng 11.1 liệt kê các dải áp suất chân không.

Bảng 11.1

Dải áp suất		Chân không thấp	Chân không trung bình	Chân không cao	Chân không siêu cao
	Pa	$10^5 - 10^2$	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
mbar	$10^3 - 1$	$1 - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	
Số phân tử trong 1 cm ³		$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
Quãng đường tự do trung bình (cm)		$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 1$	$1 - 10^4$	$> 10^4$

Các cảm biến đo chân không được chia thành ba nhóm chính:

- Cảm biến dùng hiệu ứng cơ;
- Cảm biến dùng hiệu ứng nhiệt;
- Cảm biến dựa trên các đặc trưng điện của chất khí.

Những cảm biến tiêu biểu của ba nhóm nói trên sẽ được giới thiệu trong các phần tiếp theo.

11.2. Chân không kế đàn hồi

11.2.1. Cảm biến dùng ống Bourdon

Vật trung gian trong trường hợp này là một ống tròn hoặc dẹt có thành mỏng, làm bằng kim loại hoặc thạch anh và được uốn dạng lò xo xoắn ốc. Phần trong của ống được nối thông với thể tích cần đo áp suất, phía ngoài của ống là không khí hoặc môi trường khép kín có áp suất không đổi đã biết trước (gọi là áp suất chuẩn hay áp suất so sánh). Nếu môi trường bên ngoài ống là chân không ($\sim 10^{-1}$ Pa) thì cảm biến được gọi là cảm biến áp suất tuyệt đối.

Nguyên lý đo như sau: sự chênh lệch áp suất bên ngoài và bên trong ống làm cho ống bị biến dạng; do một đầu của ống xoắn ốc được gá cố định nên biến dạng đàn hồi sẽ làm cho đầu kia của ống dịch chuyển, và độ dịch chuyển này tỷ lệ với áp suất trong ống. Dịch chuyển của đầu ống có thể đo bằng cách nối nó với điện thế kế hoặc với cảm ứng từ biến thiên.

11.2.1.1. Cảm biến một vòng xoắn

Cảm biến có cấu tạo gồm một ống kim loại xoắn một vòng (thường làm bằng thép không gỉ) kết hợp với một cảm biến dịch chuyển (thường dùng cảm biến cảm ứng).

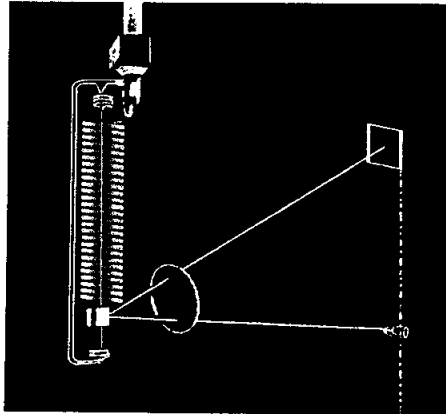
Dải đo của cảm biến một vòng xoắn từ 10^5 đến 10^2 Pa với độ chính xác 1 % và thời gian đáp ứng $\sim 0,2$ s.

Ưu điểm của loại này là rẻ tiền và chắc chắn. Chúng thường được sử dụng để đo áp suất tuyệt đối của chất khí hoặc của môi trường ăn mòn. Nhược điểm của cảm biến một vòng xoắn là độ già hóa cao, có hiện tượng trễ và phụ thuộc vào nhiệt độ.

11.2.1.2. Cảm biến nhiều vòng xoắn

Cấu tạo của cảm biến nhiều vòng xoắn bao gồm một ống có khoảng 30 vòng xoắn được làm bằng thạch anh (h. 11.1). Do có nhiều vòng xoắn nên cảm biến loại này rất nhạy và dải đo áp suất của nó cũng rộng hơn so với loại cảm biến một vòng xoắn, từ 10^5 đến 1 Pa.

Đối với loại cảm biến này cần phải hiệu chỉnh nhiệt độ, bởi vì nhiệt độ làm việc của nó rất cao, $\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ngoài ra, để đảm bảo cho đầu thứ hai được hoàn toàn tự do không chịu lực tác dụng cơ học nào khác ngoài áp suất đo, biến dạng của ống được đo bằng phương pháp quang.



Hình 11.1: Cảm biến Bourdon nhiều vòng xoắn.

11.2.2. Cảm biến dùng màng mỏng

Nguyên lý của cảm biến dùng màng mỏng dựa trên sự biến dạng của màng mỏng kín và phẳng hoặc màng dạng lượn sóng dưới tác dụng của sự chênh lệch áp suất giữa hai thể tích khí ngăn cách bởi màng mỏng, một mặt của màng chịu tác dụng của áp suất cần đo và mặt kia nằm trong môi trường so sánh có áp suất biết trước.

Màng mỏng thường là các lá làm bằng thép không gỉ hoặc hợp kim inconel, Pd, hoặc silic đã được gia công để giảm độ trễ cơ học của chúng.

Cảm biến dùng đầu đo áp trở:

Trong cảm biến loại này biến dạng của màng được chuyển thành dạng tín hiệu điện bằng một đầu đo biến dạng loại áp trở gắn trên bề mặt của màng.

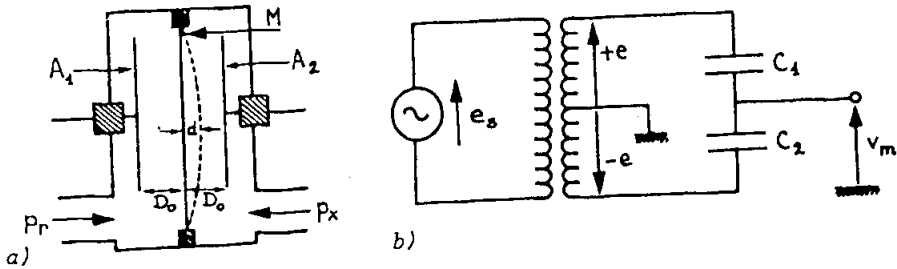
Màng là lá mỏng bằng thép không gỉ đường kính $D = 12 \div 15\text{ mm}$, chiều dày nằm trong khoảng $10^{-2} \div 10^{-1}\text{ mm}$, hoặc bằng một phiến silic. Nếu là lá thép mỏng, cảm biến áp trở sẽ được dán lên bề mặt màng. Nếu là phiến silic, cảm biến áp trở sẽ được chế tạo trực tiếp trên bề mặt silic bằng phương pháp bay hơi trong chân không. Hai dạng cấu trúc này cho phép đo phía áp suất cao

($>10^5$ Pa). Tuy nhiên cũng tồn tại những kiểu khác cho phép đo áp suất thấp hơn, từ $2 \cdot 10^{-1} \div 2 \cdot 10^5$ Pa với độ sai lệch tuyến tính $\sim 0,5\%$ và độ phân giải 10^{-6} , thời gian đáp ứng nằm trong khoảng $20 \div 50 \mu s$.

Ưu điểm của các đầu đo chân không dùng cảm biến áp trở là có thể sử dụng chúng trong các môi trường ăn mòn để đo áp suất tuyệt đối hoặc áp suất tương đối. Thể tích “chết” và thể tích động của chúng nhỏ, thể tích chết cỡ cm^3 và thể tích động cỡ phần mười mm^3 .

Cảm biến tụ điện:

Cấu tạo của cảm biến tụ điện gồm một màng M hình tròn làm bằng kim loại phẳng, được căng theo chiều bán kính để giảm trở cơ học. Màng này đóng vai trò là một điện cực và ngăn cách hai môi trường (môi trường cần đo áp suất p_x và môi trường có áp suất chuẩn p_r để so sánh), hai bản điện cực A_1 và A_2 đặt trong hai môi trường khác nhau và đối xứng nhau qua M (h. 11.2a).



Hình 11.2: Cảm biến tụ điện: a) sơ đồ nguyên lý; b) mạch đo.

Sự biến dạng của màng dưới tác dụng của chênh lệch áp suất $\Delta p = p_x - p_r$ tương đương với dịch chuyển d của tâm màng M, dịch chuyển này tỷ lệ với Δp . Biến dạng của màng làm giảm điện dung C_1 giữa A_1 và M và tăng điện dung C_2 giữa M và A_2 hoặc ngược lại phụ thuộc vào dấu của Δp . C_1 và C_2 tạo thành tụ vi sai và được kích thích bằng một biến thế có điểm giữa nối đất dưới điện áp xoay chiều $\pm e = \pm E \cdot \cos \omega t$ (thí dụ, $E = 15$ V, $f = \omega/2\pi = 10$ kHz).

Tín hiệu ra V_m lấy trực tiếp từ màng, theo sơ đồ mạch điện ở hình 11.2b, được biểu diễn bằng biểu thức:

$$V_m = e \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \tag{11.1}$$

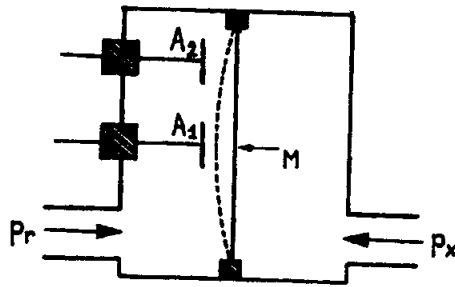
Khi có biến dạng gây nên độ dịch chuyển d của tâm màng so với vị trí ban đầu, các điện dung C_1 và C_2 tỷ lệ (tương ứng) với $1/(D_0 + d)$ và $1/(D_0 - d)$, cho nên tín hiệu điện sẽ bằng:

$$V_m = -e \cdot \frac{d}{D_0} = -E \cdot \frac{d}{D_0} \cdot \cos \omega t \quad (11.2)$$

V_m tỷ lệ với độ dịch chuyển d của tâm màng, do đó nó tỷ lệ với áp suất vì sai.

Phạm vi đo của cảm biến tụ điện nằm trong khoảng $10^{-2} \div 10^6$ Pa. Cảm biến này cho độ chính xác cao ($0,1 \div 0,3\%$), sai lệch tuyến tính nhỏ ($0,02\%$).

Nhược điểm của cảm biến đối xứng là ở chỗ trong trường hợp đo áp suất của môi trường ăn mòn, điện cực có thể bị hỏng. Ngoài ra, hoạt động của cảm biến có thể bị sai lệch nếu như trong môi trường đo xuất hiện chất khí có độ dẫn cao. Vì hai lý do trên, người ta đưa ra một cấu trúc khác trong đó cả hai tụ C_1 và C_2 đều nằm trong cùng một môi trường (h. 11.3).



Hình 11.3: Cảm biến tụ điện dùng hai bản cực không đối xứng.

Trong trường hợp này, hai điện dung C_1 và C_2 thay đổi cùng chiều, tuy nhiên sự thay đổi của chúng không như nhau vì các bản cực A_1 và A_2 được bố trí không đối xứng với trục của màng. Tín hiệu điện tương ứng với sự thay đổi khác nhau của C_1 và C_2 không phụ thuộc vào hằng số điện môi của chất khí, ngay cả trong điều kiện áp suất cao, độ ẩm lớn, hoặc có hơi của chất hữu cơ, chất khí bị ion hóa và phóng xạ. Mạch đo và điện áp nuôi dùng cho cảm biến này giống như trường hợp tụ điện đối xứng. Các đặc trưng cũng tương tự như trường hợp trước. Khi sử dụng để đo áp suất tuyệt đối, cảm biến được đóng kín ở phía các tụ điện.

11.3. Chân không kế nhiệt

Nguyên lý chung của chân không kế nhiệt dùng dây nóng là dựa trên hiện tượng thay đổi độ dẫn nhiệt của chất khí khi áp suất thay đổi trong khoảng $10^3 \div 10^{-1}$ Pa.

11.3.1. Sự truyền nhiệt trong chất khí

Một số tính chất của chất khí như độ nhớt, độ dẫn nhiệt có liên quan đến sự truyền năng lượng và sự vận chuyển khối. Do các quá trình truyền năng lượng diễn ra thông qua va chạm giữa các phân tử cho nên các tính chất nêu trên sẽ phụ thuộc vào giá trị tương đối của quãng đường tự do λ của các phân tử, tức là phụ thuộc vào áp suất.

Nếu trong chất khí xuất hiện gradient nhiệt độ theo một hướng nào đó (thí dụ hướng Ox) thì sẽ xuất hiện luồng nhiệt Q theo hướng ngược lại sao cho

$$Q = -K \frac{dT}{dt} \quad (11.3)$$

trong đó K là hệ số dẫn nhiệt của chất khí. Khi quãng đường tự do trung bình rất nhỏ so với khoảng cách l từ nguồn phát nhiệt (thành nóng) đến nơi thu nhiệt (thành nguội) $\lambda \ll l$, hệ số K không phụ thuộc vào áp suất.

Khi quãng đường tự do tăng $\lambda \approx (10^{-2} \div 10^{-3}) l$ tương đương với áp suất 10^3 Pa, hệ số dẫn nhiệt bắt đầu phụ thuộc vào áp suất và giảm theo p. Khi $\lambda \sim l$ hệ số K tỷ lệ với áp suất.

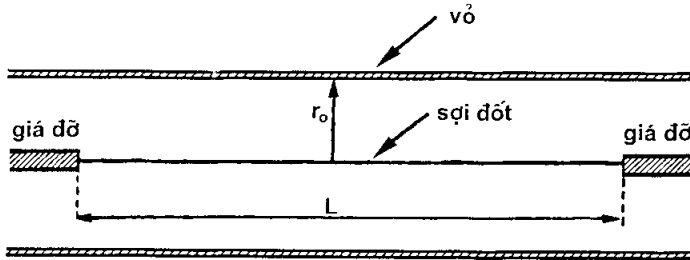
Dựa vào tính chất trên đây người ta đã chế tạo ra cảm biến chân không dùng dây nóng hay còn quen gọi là chân không kế nhiệt.

11.3.2. Nguyên tắc hoạt động của chân không kế nhiệt

Phần tử cơ bản của chân không kế nhiệt là một sợi dây đốt bằng kim loại được đốt nóng bằng hiệu ứng Joule đặt trong một ống hình trụ đồng tâm, mặt ngoài ống tiếp xúc với môi trường và thể tích bên trong của ống thông với áp suất cần đo (h. 11.4).

Nhiệt độ của sợi đốt phụ thuộc chủ yếu vào sự mất nhiệt do dẫn nhiệt trong chất khí. Sự mất nhiệt này càng lớn khi áp suất càng cao. Trên thực tế, công suất cung cấp cho sợi đốt được giữ không đổi, vì vậy việc đo nhiệt độ của

dây cho phép xác định áp suất của chất khí. Nhiệt độ của dây được đo bằng điện trở (phương pháp Pirani) hoặc bằng cặp nhiệt gắn trên sợi đốt.



Hình 11.4: Chân không kế nhiệt.

Trong chế độ tĩnh, công suất P_j được cung cấp bởi hiệu ứng Joule bị chia thành :

- P_{C1} : công suất tiêu hao do dẫn nhiệt trong chất khí;
- P_{C2} : công suất tiêu hao do dẫn nhiệt ở giá đỡ sợi đốt;
- P_r : công suất tiêu hao do bức xạ nhiệt .

Vì vậy:

$$P_j = P_{C1} + P_{C2} + P_r \quad (11.4)$$

Công suất mất mát do dẫn nhiệt của chất khí P_{C1} là hàm của sự phân bố nhiệt theo đường kính ống và phụ thuộc vào r_0 của vỏ, vào nhiệt dung và nhiệt độ của dây. Trong chế độ tĩnh, nhiệt độ T_0 của ống và nhiệt độ T_f của sợi đốt không đổi, bởi vậy có thể viết biểu thức cho P_{C1} :

$$P_{C1} = a.K.(T_f - T_0) = a' \cdot \frac{p}{\sqrt{M}} (T_f - T_0) \quad (11.5)$$

trong đó

- p và M là áp suất và khối lượng phân tử của chất khí;
- a' là hằng số phụ thuộc vào diện tích bề mặt ngoài của sợi đốt (nghĩa là phụ thuộc vào đường kính r và chiều dài L của nó).

Giả thiết nhiệt độ của giá đỡ sợi đốt là đồng đều và bằng nhiệt độ T_0 , đồng thời sợi đốt là đẳng nhiệt, gradient nhiệt độ $T_f - T_0$ theo chiều dài của sợi đốt

không đáng kể so với toàn bộ chiều dài L của nó. Khi đó sự tiêu hao công suất do dẫn nhiệt của giá đỡ sợi đốt được biểu diễn bằng biểu thức:

$$P_{C2} = b.K_f(T_f - T_0) \quad (11.6)$$

trong đó K_f là độ dẫn nhiệt của kim loại làm sợi đốt, b là hằng số đối với một sợi đốt và giá đỡ cho trước.

Tiêu hao công suất do bức xạ được xác định bởi định luật Stefan-Boltzman:

$$P_r = c. \sigma. (\varepsilon_f T_f^4 - \varepsilon_0 T_0^4) \quad (11.7)$$

trong đó:

- ε_f và ε_0 là hệ số phát xạ của dây ở nhiệt độ T_f và của vỏ ở nhiệt độ T_0 ;
- σ là hằng số Stefan của vật đen tuyệt đối ($\sigma = 5,7.10^{-8} \text{ w.m}^{-2}.\text{K}^{-2}$);
- c là hằng số phụ thuộc vào diện tích mặt ngoài của sợi đốt.

Trong ba dạng tiêu hao công suất nhiệt kể trên, chỉ có thành phần P_{C1} phụ thuộc vào áp suất của chất khí. P_{C2} và P_r có thể giảm thiểu bằng cách giảm r , K_f và ε_f . Độ nhạy của cảm biến càng cao khi $(T_f - T_0)$ càng lớn. Tuy nhiên, do P_r cũng nhạy với hiệu $(T_f - T_0)$ nên nhiệt độ sợi đốt phải giữ ở giá trị tương đối thấp, từ 100 °C đến 200 °C trong khi nhiệt độ T_0 của ống thường là nhiệt độ phòng.

11.3.3. Chân không kế Pirani

Chân không kế Pirani cổ điển thường có một sợi đốt gồm một hoặc nhiều phân dạng đường thẳng đặt trong vỏ bọc kim loại hoặc thủy tinh. Cảm biến càng nhạy khi sợi đốt càng dài và mảnh. Vì thế trong các đầu đo hiện đại sợi đốt làm bằng dây dẫn có đường kính nhỏ, cỡ $\sim 10 \mu\text{m}$, được cuốn hình xoắn ốc hoặc bằng dải mảnh. Vật liệu làm dây là kim loại ít bị ô xy hóa, như Pt, W, Ni (h. 11.5).

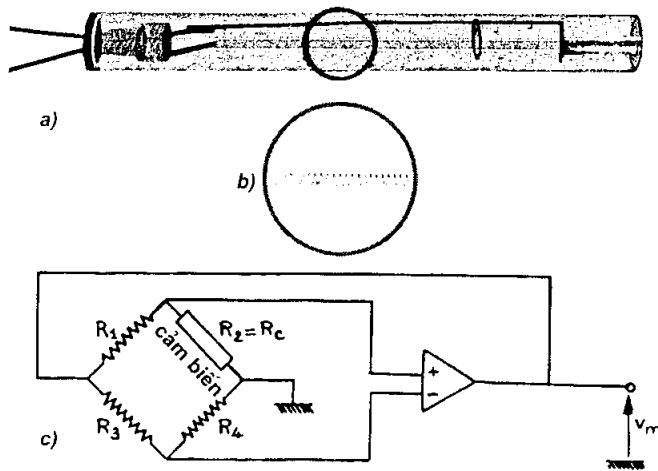
Mạch đo dùng cho cảm biến Pirani là cầu Wheatstone trong đó sợi đốt của đầu đo là một nhánh. Mạch được nuôi bằng một trong hai chế độ:

- Nuôi bằng nguồn điện áp không đổi $U = \text{const}$. Khi đó tín hiệu sẽ là điện áp không cân bằng của cầu. Trước khi đo cầu được cân bằng ở áp suất chuẩn (áp suất so sánh). Áp suất so sánh có thể là áp suất không khí trong phòng hoặc một áp suất biết trước có giá trị nhỏ hơn áp suất làm việc của cảm biến.

- Nuôi bằng điện áp biến thiên sao cho nhiệt độ của dây không đổi, $T = \text{const}$. Lúc đó cầu sẽ tự điều chỉnh bằng một khuếch đại vi sai có độ khuếch đại lớn.

Trong sơ đồ này tín hiệu đo V_m sẽ là sự thay đổi của điện áp nuôi cầu so với trạng thái cân bằng đã xác lập ở chân không cao.

Để giảm ảnh hưởng nhiệt độ T_0 của vỏ bọc, có thể thay điện trở R_1 bằng một cảm biến bù trừ giống như cảm biến chính nhưng phải được hàn kín ở trong chân không cao.



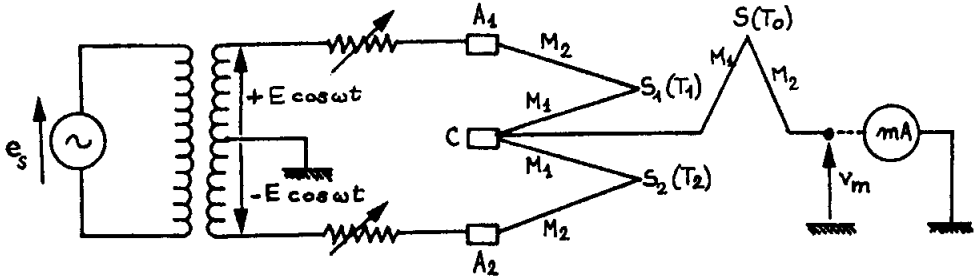
Hình 11.5: Chân không kế Pirani: a) hình dáng bên ngoài; b) dạng sợi đốt; c) mạch đo.

Ưu điểm của cảm biến dây nóng Pirani là chắc chắn và gọn. Tuy nhiên, để sử dụng cần phải chuẩn cảm biến cho từng loại khí. Cảm biến dây nóng Pirani dùng để đo chân không sơ cấp. Nhược điểm là không làm việc được với những chất khí dễ bị phân tích vì sợi đốt có nhiệt độ cao.

11.3.4. Chân không kế dùng cặp nhiệt

Trong chân không kế dùng cặp nhiệt, sợi đốt được nuôi bằng dòng điện không đổi. Nhiệt độ của nó được đo bằng một cặp nhiệt gắn với sợi đốt bằng hạt cườm cách điện. Nhiệt độ của sợi đốt thay đổi trong khoảng $100-200\text{ }^\circ\text{C}$ nên suất nhiệt điện động nhỏ, vì vậy phải dùng cặp nhiệt có độ nhạy cao.

Một loại chân không kế khác thường được sử dụng gồm một hoặc nhiều cặp nhiệt được nung nóng bằng dòng điện xoay chiều. Trên hình 11.6 biểu diễn mạch đo sử dụng chân không kế gồm hai cặp nhiệt điện M_2/M_1 mắc nối tiếp sao cho các nhánh CS_1 và CS_2 làm từ cùng một kim loại. Hai cặp nhiệt mắc



Hình 11.6: Mạch đo dùng đầu đo chân không nhiều cặp nhiệt.

nối tiếp này được nung nóng bằng dòng xoay chiều cung cấp từ một biến thế điện áp thấp có điểm giữa nối đất. Cặp nhiệt thứ ba có cùng bản chất với hai cặp nhiệt kia được cố định trên vỏ của cảm biến dùng để bù trừ với nhiệt độ môi trường bên ngoài. Nó được đặt vào giữa điểm C chung của S_1, S_2 và đầu ra của tín hiệu để sao cho suất điện động $e(T_0)$ ngược với suất điện động của hai cặp nhiệt kia. Tín hiệu đo V_m được biểu diễn bởi biểu thức:

$$V_m = \frac{e_1(T_1) + e_2(T_2)}{2} - e(T_0) = e(T_f) - e(T_0) \quad (11.8)$$

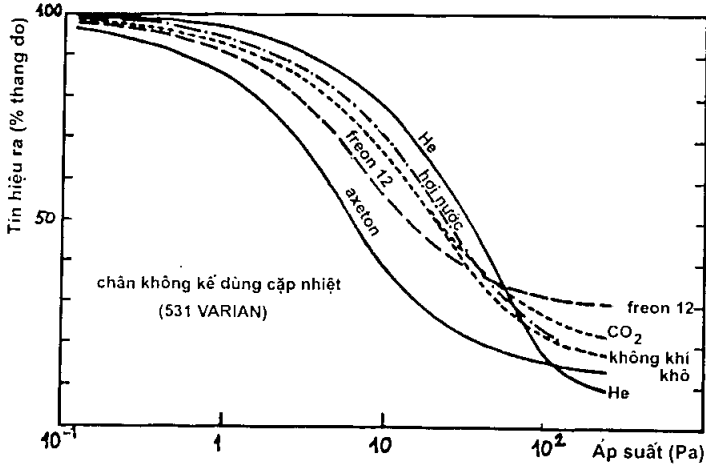
trong đó $e(T_f)$ là suất điện động do hai cặp nhiệt nung nóng (đóng vai trò sợi đốt) cung cấp.

Để có độ nhạy cao, người ta thường sử dụng các cặp nhiệt có suất nhiệt điện động cao như chromel-alumel ($40 \mu V.K^{-1}$) hoặc cupron-tophet ($34 \mu V.K^{-1}$).

Dải đo của chân không kế dùng cặp nhiệt nằm trong khoảng $10^2 \div 10^{-1}$ Pa. Càng gần giới hạn của dải đo độ nhạy càng giảm do vậy phải chuẩn chân không kế đối với từng chất khí. Trên hình 11.7 biểu diễn các đường cong chuẩn đầu đo dùng cặp nhiệt.

Giá trị của tín hiệu đầu ra nằm trong khoảng $5 \div 10$ mV phụ thuộc vào nhiệt độ và bản chất của cặp nhiệt. Để cải thiện độ nhạy, các chân không kế thường có nhiều cặp nhiệt mắc nối tiếp. Độ chính xác của đầu đo dùng cặp

nhệt nung nóng kém hơn độ chính xác của đầu đo Pirani và phụ thuộc chủ yếu vào điều kiện sử dụng. Thời gian đáp ứng cỡ 1s và lớn hơn so với đáp ứng của chân không kế Pirani.



Hình 11.7: Các đường cong chuẩn của chân không kế dùng nhiều cấp nhiệt.

11.4. Chân không kế ion

Nguyên lý hoạt động của cảm biến loại này dựa trên hiện tượng ion hóa các phân tử hoặc nguyên tử của chất khí khi chúng va chạm với điện tử hoặc các ion khác. Số ion được tạo thành sau khi ion hóa phụ thuộc vào bản chất và áp suất của chất khí. Dòng ion thu qua một điện cực là đại lượng đo thứ cấp phản ánh độ lớn của áp suất.

Có ba loại đầu đo ion hóa:

- Đầu đo dùng catot nguội (đầu đo penning) dựa trên hiện tượng ion hóa tự phát và tự duy trì trong chất khí (hiện tượng phóng điện).
- Đầu đo catot nóng dựa trên hiện tượng ion hóa xảy ra do các điện tử phát xạ từ sợi đốt.
- Đầu đo dùng nguồn phóng xạ, trong đó quá trình ion hóa xảy ra dưới tác dụng của tia phóng xạ.

Trong những mục tiếp theo, trước khi khảo sát các loại cảm biến ion hóa đo chân không, sẽ đề cập đến hiện tượng ion hóa chất khí do những nguyên nhân khác nhau và mối quan hệ giữa áp suất và sự ion hóa chất khí.

11.4.1. Ion hóa chất khí

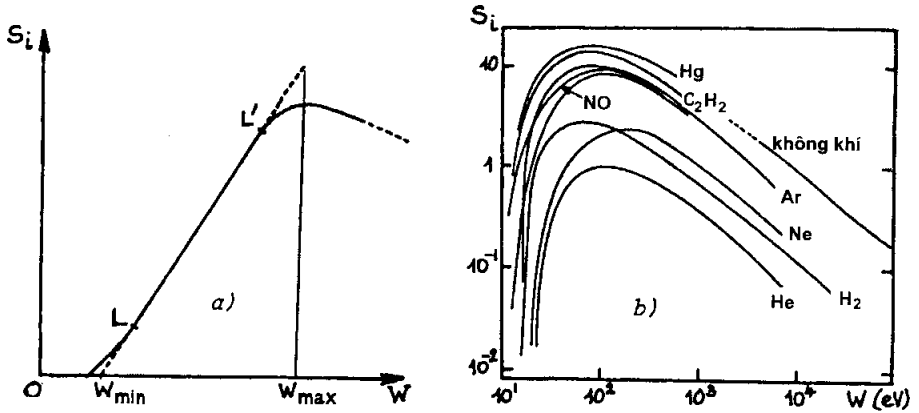
Khi cung cấp năng lượng cho một nguyên tử trung hòa cô lập bằng cách đốt nóng, va chạm hoặc bức xạ, toàn bộ hoặc một phần năng lượng có thể bị nguyên tử hấp thụ làm chuyển một điện tử của nguyên tử từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao hơn, kết quả là nguyên tử ở trạng thái bị kích thích. Nếu năng lượng đủ lớn, nguyên tử có thể mất một điện tử và trở thành ion dương.

Năng lượng tương ứng W_i để làm cho nguyên tử mất điện tử gọi là năng lượng ion hóa (eV). Giá trị của W_i phụ thuộc vào bản chất của nguyên tử và thay đổi trong khoảng từ 24,5 eV (đối với heli) đến 3,9 (đối với cesi). Một nguyên tử, sau khi đã mất một điện tử và trở thành ion dương, có thể tiếp tục mất thêm điện tử thứ hai, thứ ba và gọi là nguyên tử ion hóa hai lần, ba lần... Năng lượng ion hóa những lần sau lớn hơn bởi vì phải làm bật ra các điện tử từ những mức sâu hơn.

Ion hóa do va chạm với điện tử:

Khi có va chạm đàn hồi giữa điện tử năng lượng W với nguyên tử cô lập giả thiết là bất động và không ở trạng thái bị kích thích, một phần W_i của năng lượng đó có thể bị hấp thụ để ion hoá nguyên tử, phần còn lại tồn tại dưới dạng động năng của điện tử và của cặp điện tử-ion mới hình thành. Điều kiện ion hóa là $W \gg W_i$. Tuy nhiên không phải tất cả các va chạm giữa điện tử và nguyên tử đều gây nên hiện tượng ion hóa. Ngay cả khi điều kiện nêu trên được thực hiện, sự phân chia năng lượng sau khi va chạm có thể xảy ra một cách khác nhau, nguyên tử chỉ bị ở trạng thái kích thích và phần năng lượng còn lại tồn tại ở dạng động năng. Xác suất ion hóa phụ thuộc vào bản chất của chất khí và năng lượng của điện tử sơ cấp. Trên thực tế người ta xác định hệ số ion hóa S_i của một chất khí là số cặp điện tử-ion tạo ra bởi một điện tử sơ cấp có năng lượng cho trước trên một đơn vị quãng đường ở một đơn vị áp suất. Hình 11.8 biểu diễn đường cong thay đổi của hệ số ion hóa phụ thuộc vào năng lượng của điện tử sơ cấp và bản chất của chất khí.

Khi áp suất lớn, $p \geq 1$ Pa, các ion và các điện tử thứ cấp có thể tiếp tục ion hóa các nguyên tử khác làm cho quan hệ giữa dòng ion và áp suất trở nên không đơn giản. Khi áp suất thấp, $p \leq 10^{-1}$ Pa, quãng đường tự do của điện tử lớn nên có thể bỏ qua hiện tượng ion hóa thứ cấp, dòng ion là hàm tuyến tính của áp suất.



Hình 11.8: Hệ số ion hóa:

- a) sự phụ thuộc của hệ số ion hóa vào năng lượng điện tử sơ cấp;
- b) ảnh hưởng của bản chất chất khí.

Ion hóa do phóng xạ:

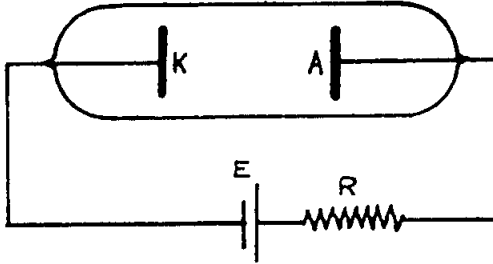
Bức xạ của một số chất phóng xạ, thí dụ tia α , có khả năng ion hóa phân tử và nguyên tử của chất khí. Năng lượng của tia α rất lớn (5,3 MeV đối với poloni và 4,8 MeV đối với radi), cho nên khi va chạm đàn hồi với phân tử của chất khí, một hạt α có thể tạo nên rất nhiều cặp điện tử-ion trước khi mất một phần đáng kể năng lượng của nó và bị bắt giữ bởi thành của bình chứa chất khí. Số cặp điện tử-ion lớn gấp 10^4 lần so với trường hợp ion hóa do va chạm của điện tử.

Số cặp điện tử-ion sinh ra dưới tác dụng của bức xạ phụ thuộc vào hoạt tính của nguồn, quãng đường mà hạt đi qua trong chất khí và là hàm của bản chất và áp suất của chất khí. Nếu áp suất $p \leq 10^3$ Pa, dòng ion tỷ lệ với áp suất. Với áp suất lớn hơn, hiệu suất ion hóa giảm đi do hiện tượng trung hòa các ion khi chúng tái hợp với điện tử.

11.4.2. Chân không kế catot nguội - chân không kế Penning

Chân không kế catot nguội có cấu tạo bao gồm một ống trong đó có catot và anot bằng kim loại phẳng được đặt song song với nhau, giữa chúng là hiệu điện thế cao cỡ ~ 2000 V. Ngoài ra còn có một điện trở cỡ $M\Omega$ mắc nối tiếp với đầu đo để hạn chế dòng. Nguyên lý cấu tạo của chân không kế catot nguội biểu diễn trên hình 11.9.

Dưới áp suất $p > 5 \cdot 10^{-1}$ Pa và điện trường lớn, giữa anot và catot xảy ra phóng điện kèm theo hiện tượng phát quang đặc trưng. Sự phóng điện này được mô phỏng bởi một số điện tử phát sinh do hiện tượng quang ion hóa các phân tử khí khi có bức xạ chiếu qua ống hoặc do các điện tử phát sinh ở những



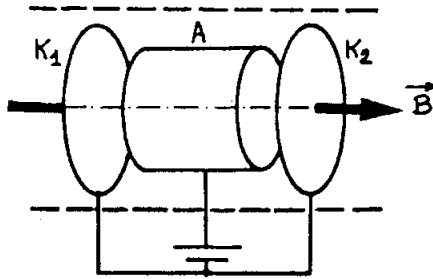
Hình 11.9: Chân không kế ion hóa catot nguội.

chỗ gồ ghề rất nhỏ trên bề mặt catot nơi có điện trường cao hơn những chỗ khác. Những điện tử được giải phóng do ion hóa khí pha chạm và các điện tử phát ra khi các ion đập vào catot sẽ duy trì chế độ phóng điện này.

Khi $p < 5 \cdot 10^{-1}$ Pa, sự phóng điện chấm dứt và dòng ion rất nhỏ vì quãng đường tự do của các điện tử trong chất khí xấp xỉ bằng khoảng cách giữa hai điện cực nên chúng không tạo đủ cặp điện tử-ion.

Để tăng quãng đường tự do của điện tử và do đó tăng hệ số ion hóa S_i , Penning đặt xung quanh ống phóng điện một nam châm vĩnh cửu tạo từ trường $B \sim 0,1$ tesla vuông góc với điện cực. Dưới tác dụng của từ trường, các điện tử chuyển động theo quỹ đạo xoắn ốc và quãng đường đi trong ống của chúng tăng lên rất nhiều làm tăng xác suất va chạm với phân tử và nguyên tử khí do đó có thể duy trì phóng điện đến áp suất 10^{-5} Pa.

Trên hình 11.10 biểu diễn nguyên lý của chân không kế Penning đối xứng. Chân không kế Penning đối xứng có hai catot phẳng dạng đĩa, giữa chúng đặt một anot hình trụ là nơi sẽ xảy ra phóng điện. Cảm ứng từ \vec{B} hướng theo trục của hệ. Tín hiệu điện là dòng i trong mạch giữa anot và catot và là kết quả tổng cộng của dòng điện tử thu tại anot và dòng ion thu được tại catot. Tỷ số giữa dòng điện i và áp suất khá phức tạp và phụ thuộc nhiều vào cấu trúc đầu đo và bản chất của chất khí. Tuy nhiên độ nhạy $S = \Delta i / \Delta p$ tương đối



Hình 11.10: Chân không kế Penning đối xứng.

ổn định trong khoảng 3 bậc của áp suất và đạt giá trị $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ A/Pa. Thời gian đáp ứng cỡ $\sim 0,5$ s (khi chân không kế đã phóng điện).

11.4.3. Chân không kế catot nóng

Đầu đo catot nóng có 3 điện cực dạng hình trụ đồng trục, trong đó:

- Một cực là catot được đốt nóng bằng hiệu ứng Joule và phát xạ điện tử theo hiệu ứng nhiệt ion.
- Một anot đặt dưới điện áp dương so với catot để tăng tốc điện tử và thu nhận điện tử.
- Một cực góp để thu các ion dương hình thành khi điện tử chuyển động và đập với phân tử khí.

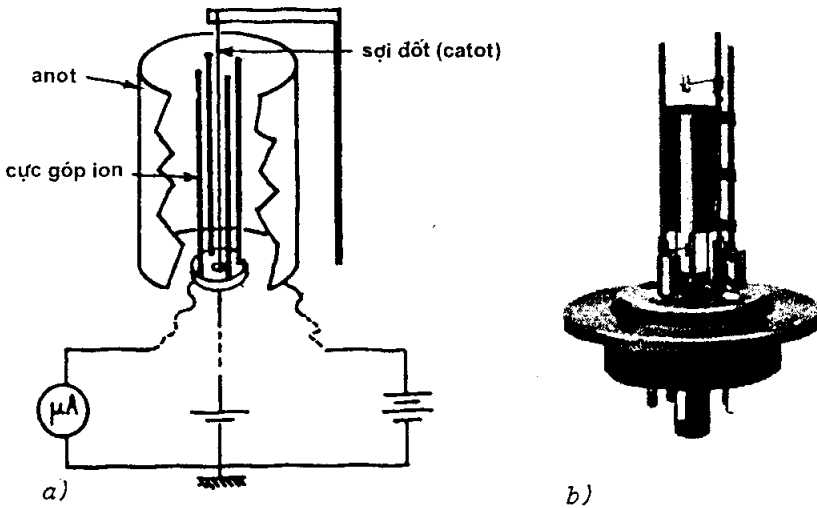
Người ta phân biệt hai loại chân không kế khác nhau phụ thuộc vào vị trí tương đối giữa các điện cực.

Trong loại triot bình thường, lưới kim loại hình trụ đóng vai trò anot và bao quanh catot có dạng một sợi đốt nằm dọc theo trục của hình trụ, giữa chúng là cực góp, ngoài cùng là vỏ bằng kim loại bao quanh toàn bộ cấu trúc (h. 11.11).

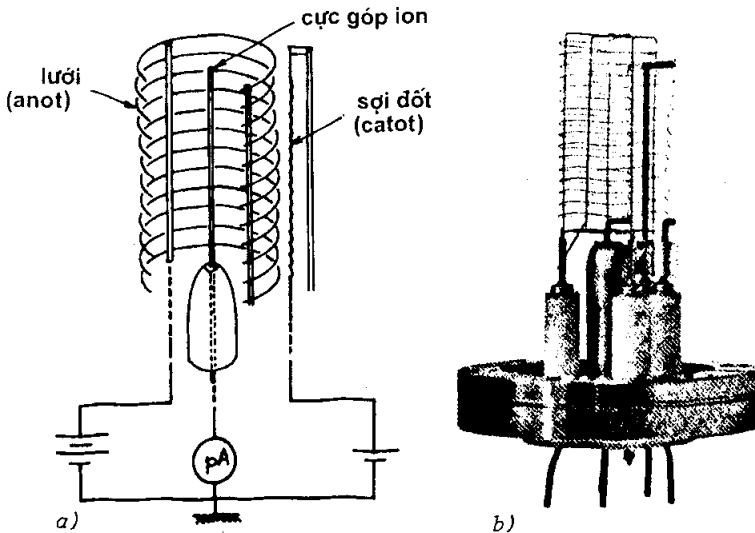
Loại triot thứ hai, triot Bayard-Alpert, có cấu trúc hình học ngược lại với loại thứ nhất, trong đó vị trí của catot và cực góp (tương ứng với anot dạng lưới) hoán vị cho nhau: cực góp là một sợi dây kim loại nằm dọc theo trục của lưới (h. 11.12). Loại thứ hai hoạt động tốt hơn loại triot bình thường.

Loại chân không kế thứ nhất thích hợp để đo áp suất $p \geq 10^{-5}$ Pa, loại thứ hai mở rộng phạm vi đo về phía áp suất thấp $10^{-8} \div 10^{-9}$ Pa.

Chế độ điện áp trên điện cực của chân không kế như sau: lưới đóng vai trò anot được đặt dưới điện áp $+150 \div 200$ V so với cực góp nối đất qua dụng cụ đo.



Hình 11-11: Chân không kế ion hóa catot nóng loại triot bình thường:
a) nguyên lý cấu tạo; b) hình dáng chế tạo.



Hình 11-12: Chân không kế ion hóa catot nóng loại triot Bayard-Alpert:
a) nguyên lý cấu tạo; b) hình dáng chế tạo.

catot có điện thế $+30 \div 50$ V so với cực góp. Các điện tử xuất phát từ catot được tăng tốc do hiệu thế giữa lưới và catot. Một phần trong số các điện tử này tạo ra các ion giữa lưới và catot, năng lượng của chúng giảm dần và chúng sẽ bị bắt tại lưới. Phần khác có năng lượng lớn hơn chui vào khoảng không gian giữa lưới và cực góp, ion hóa chất khí tại đó và mất năng lượng. Cũng có một số điện tử không bị va chạm và có năng lượng cực đại không thể đi qua đường đẳng thế ứng với điện thế catot và quay ngược lại. Khi quay trở lại như vậy chúng sẽ ion hóa phân tử chất khí và bị bắt tại lưới. Điều này làm cho quãng đường của điện tử tăng lên và số cặp điện tử-ion cũng tăng theo. Các ion hình thành giữa lưới và cực góp chạy về cực góp tạo thành dòng góp i_i . Các điện tử bị bắt tại lưới tạo thành dòng i_e , dòng này bằng dòng phát xạ của catot. Số ion hình thành trong quá trình ion hóa tỷ lệ với số điện tử đã gây nên sự ion hóa và với số phân tử khí, do đó tỷ lệ với áp suất của môi trường do:

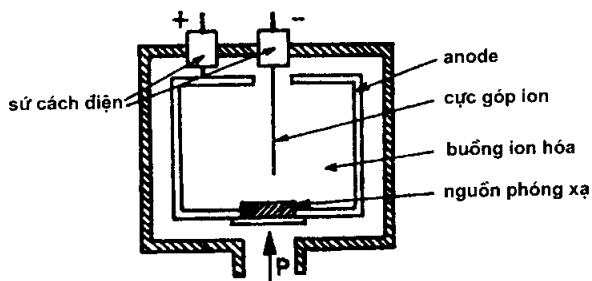
$$i_i = S \cdot i_e \cdot p \quad (11.9)$$

Tỷ số i_i/i_e gọi là hệ số chân không của triot bình thường, nó luôn nhỏ hơn 1. Hệ số S là độ nhạy của chân không kế (được đo bằng Pa^{-1} hoặc mbar^{-1}) phụ thuộc vào các kích thước hình học đặc trưng của chân không kế và bản chất của chất khí (thông qua hệ số ion hóa). Trường hợp triot bình thường, trong khí nitơ, $S \approx 10^2 \div 5 \cdot 10^2 \text{ Pa}^{-1}$ phụ thuộc vào các model khác nhau, với triot B-A $S \approx 10^3 - 3 \cdot 10^3 \text{ Pa}^{-1}$. Cả hai loại chân không kế đều không cho giá trị tuyệt đối và phải chuẩn trước khi sử dụng.

11.4.4. Chân không kế ion hóa bằng nguồn phóng xạ

Nguồn phóng xạ α thường là muối radi hoặc poloni chế tạo dưới dạng màng mỏng trên một tấm kim loại và được phủ bằng một lớp kim loại mỏng để chống ăn mòn và ngăn cản sự khuếch tán chất phóng xạ ra buồng chân không. Tấm kim loại có nguồn phóng xạ được gắn vào đế của một hộp kim loại hình trụ chính là buồng ion hóa. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của chân không kế ion hóa bằng nguồn phóng xạ biểu diễn trên hình 11.13.

Cực góp ion có dạng một dây mảnh được nối với cực âm so với bình ion hóa (50 - 100 V). Nó phải được cách điện tốt bởi vì dòng ion rất nhỏ. Giới hạn đo của chân không kế ion dùng nguồn phóng xạ nằm trong khoảng $10^3 \div 10^2 \text{ Pa}$. Giới hạn trên của dải đo liên quan đến hiện tượng tái hợp điện tử-ion, còn giới hạn dưới là do có sự tồn tại của dòng điện dư của các điện tử thứ cấp



Hình. 11.13: Chân không kế dùng nguồn phóng xạ.

sinh ra khi các hạt α bắn phá cực góp. Chân không kế phóng xạ tuy đơn giản nhưng ít được sử dụng vì lý do nguy hiểm phóng xạ.

CHƯƠNG 12

CẢM BIẾN BỨC XẠ HẠT NHÂN

Mỗi nguyên tố phóng xạ là một nguồn bức xạ hạt nhân. Những bức xạ này phụ thuộc vào bản chất của nguồn và được tạo thành từ các hạt mang điện tích (như hạt α , β) và không mang điện tích (như neutron, photon, γ). Nghiên cứu sự tương tác của các bức xạ với vật chất cho phép phát hiện những bức xạ đó và xác định môi trường vật chất mà chúng đi qua.

Một hệ nghiên cứu bức xạ hạt nhân bao gồm một nguồn, một detector là cảm biến phóng xạ và vật nghiên cứu đặt ở vị trí thích hợp. Một phần của chùm tia tới vật nghiên cứu được truyền hoặc tán xạ đến cảm biến phóng xạ hạt nhân và do vậy sẽ phản ánh một số thông số vật lý của môi trường như bề dày, mật độ, mức v.v...

Ưu điểm nổi bật của các đầu đo phóng xạ hạt nhân là cho phép tiến hành phép đo một cách không trực tiếp, đo trên một vật chuyển động, đo qua thành bình và đo trong những môi trường đặc biệt khó tiếp cận như môi trường có áp suất lớn, nhiệt độ cao, có ăn mòn hóa học...

12.1. Đầu đo bằng ion hóa chất khí

12.1.1. Nguyên lý chung

Trong một thể tích chứa chất khí có hai điện cực đặt dưới hiệu điện thế không đổi. Bức xạ hạt nhân chiếu tới làm ion hóa chất khí và giải phóng ra các điện tích được thu lại ở các điện cực. Các điện cực này thường có dạng hình trụ: vỏ đầu đo đóng vai trò catot thường xuyên nối đất, trong khi đó anot là một sợi dây mảnh đồng trục được đặt dưới một điện áp nhất định.

Năng lượng trung bình W_1 cần thiết để tạo cặp điện tử-ion một mặt phụ thuộc vào bản chất của chất khí, mặt khác, ở mức độ thấp hơn, phụ thuộc vào

năng lượng và bản chất của hạt chiếu tới. Thí dụ: để tạo cặp ion bằng hạt α của poloni ở những môi trường khác nhau đòi hỏi năng lượng trung bình khác nhau:

- 35,6 eV trong không khí;
- 29,7 eV trong khí neon;
- 23,6 eV trong khí xenon.

Nếu hạt mất một năng lượng W khi đi qua phần thể tích của đầu đo thì nó tạo ra N_0 cặp điện tử-ion:

$$N_0 = \frac{W}{W_1} \quad (12.1)$$

Các hạt tích điện này chuyển động trong điện trường E với tốc độ phụ thuộc vào điện trường, vào bản chất và áp suất của chất khí. Tốc độ của điện tử lớn hơn rất nhiều so với tốc độ của ion, $v_e \gg v_i$, cho nên điện tử đạt tới anot trước khi ion di chuyển được một khoảng không đáng kể.

Nếu điện trường đủ mạnh, các điện tử thu được năng lượng đủ lớn để tạo ra những cặp điện tử-ion mới (do va chạm với phân tử khí): N điện tử sẽ gây ra dN cặp điện tử-ion mới trên quãng đường dx :

$$dN = \alpha \cdot N \cdot dx \quad (12.2)$$

trong đó α là hệ số phụ thuộc vào áp suất p , điện trường E và bản chất của chất khí theo biểu thức:

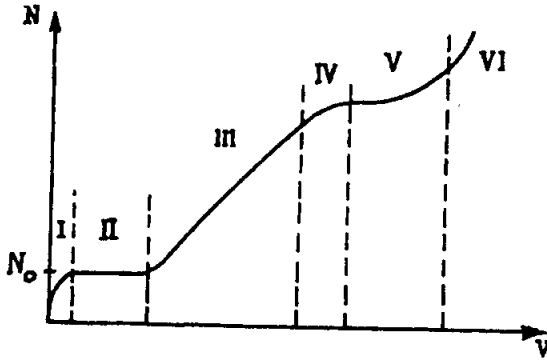
$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (12.3)$$

trong đó A và B là các hằng số. Quá trình ion hóa thứ cấp này xảy ra trong không khí ngay từ khi tỷ số $E/p > 22,5$ mV/cm.Pa (tương đương 2300 V/cm ở áp suất 1 atm.). Đối với N_0 cặp điện tử-ion tạo thành trong thể tích khí có ích của đầu đo, số điện tích N thu được ở điện cực và biên độ tín hiệu ra phụ thuộc vào điện áp trên điện cực. Tùy thuộc vào giá trị của V người ta phân biệt các chế độ làm việc khác nhau của đầu đo (h. 12.1):

Vùng I: E tương đối nhỏ, một phần điện tử và ion tái hợp trước khi đến được điện cực, $N < N_0$.

Vùng II: tất cả các điện tích hình thành đều đến được điện cực và bị thu gom

ở đó không phụ thuộc vào điện thế V , $N = N_0$. Chế độ này gọi là chế độ bù ion hóa.



Hình 12.1: Các chế độ làm việc của đầu đo bức xạ hạt nhân bằng ion hóa chất khí.

Vùng III: trong vùng này có sự nhân hạt tải do va chạm, $N = MN_0$, hệ số nhân M không phụ thuộc vào N_0 và có thể đạt tới 10^3 . Đây là chế độ đếm tỷ lệ.

Vùng IV: trong vùng này hệ số nhân M phụ thuộc vào N_0 , đây là chế độ bán tỷ lệ.

Vùng V: tín hiệu ra của đầu đo không phụ thuộc vào N_0 , đây là chế độ đếm Geiger-Muller.

Vùng VI: trong vùng này chế độ hoạt động không ổn định, xảy ra hiện tượng phóng điện khi điện thế đạt giá trị điện thế phóng điện.

12.1.2. Bù ion hóa

Khi chất khí chứa trong đầu đo chịu ảnh hưởng của luồng hạt bức xạ chiếu liên tục, tại anot sẽ thu được dòng điện I . Dòng này tỷ lệ với số hạt bức xạ tới thể tích khí trong một giây và với số N_0 cặp điện tử-ion do một hạt tạo thành:

$$I = q_e \cdot n \cdot N_0 \quad (12.4)$$

trong đó $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Trong trường hợp bức xạ tia X hoặc tia γ , dòng điện I có thể biểu diễn dưới dạng biểu thức:

$$I = \frac{k.v.p.D}{1,08} \cdot 10^{-13} \quad (12.5)$$

trong đó:

- I đo bằng A;
- k là hằng số của chất khí, k = 1 đối với không khí;
- v là thể tích hữu ích của đầu đo (thể tích chứa chất khí);
- p là áp suất đo bằng atm.
- D là liều lượng bức xạ trong một đơn vị thời gian và được đo bằng ronghen/h.

Dòng điện I có giá trị nằm trong khoảng $10^{-15} \div 10^{-4}$ A và phụ thuộc vào D nhưng không phụ thuộc vào điện thế trong một dải cỡ hàng trăm vôn. Tín hiệu đo là điện áp V_m rơi trên điện trở R_m khi dòng điện này chạy qua. Điện trở R_m phải có giá trị rất lớn, $R_m > 10^{10} \Omega$.

Khi chế tạo buồng ion hóa, tùy thuộc vào bản chất của bức xạ cần phát hiện, người ta chọn chất khí, áp suất và cửa sổ chiếu thích hợp sao cho đạt hiệu quả phát hiện cao nhất. Hiệu quả phát hiện được xác định như là tỷ số giữa số xung phát ra và số hạt chiếu tới.

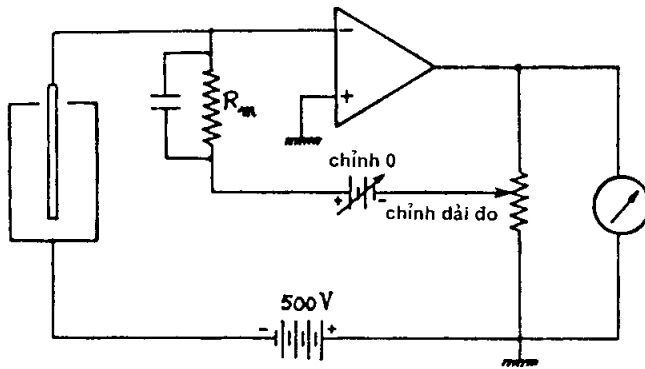
Dưới đây giới thiệu các số thông số chế tạo buồng ion hóa dùng cho một số loại khí:

- Bức xạ α và β : không khí dưới áp suất p nhỏ hơn hoặc bằng áp suất khí quyển, cửa sổ mảnh bằng nhôm hoặc beri;
- Bức xạ tia X: chất khí nặng (Ar, Xe) với áp suất p nhỏ hơn hoặc bằng áp suất khí quyển, cửa sổ mảnh bằng beri;
- Bức xạ tia γ : chất khí nặng (Ar, Xe) dưới áp suất p lớn hơn hoặc bằng áp suất khí quyển, thành buồng có độ dày cỡ quãng đường tự do trung bình của điện tử.

Để có khái niệm cụ thể, sau đây là một thí dụ thực tế: buồng ion hóa CRG11 dùng cho luồng tia γ mạnh (sản phẩm của hãng R.T.C):

- Thể tích có ích: 10 cm^3 ;
- Khí điện đầy buồng: nitơ, áp suất 1,05 bar;
- Điện áp phân cực: 600 V;
- Độ nhạy (tia γ của ^{60}Co): $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ A/R.h}^{-1}$;
- Liều lượng cực đại: 108 R.h^{-1} .

Để đo dòng do buồng ion hóa cung cấp người ta thường sử dụng mạch chuyển đổi dòng-điện áp (h. 12.2).



Hình 12.2: Sơ đồ đo ghép nối với buồng ion hóa.

Điều kiện cần thiết là dòng I phải không quá nhỏ. Dạng xung điện ở đầu ra phụ thuộc vào:

- Hằng số thời gian $R_m C$ xác định bởi giá trị của điện trở tải R_m và tổng điện dung của buồng với điện dung đầu vào của thiết bị đo.
- Thời gian gom điện tử ở anot ($t_1 \approx 10^{-6}$ s) và gom ion dương ở catot ($t_2 \approx 10^{-3}$ s).

Ưu điểm của buồng ion hóa là thể tích hữu ích lớn và độ tuyến tính đáp ứng tốt. Hiệu suất phát hiện xấp xỉ 1 đối với tia α , $0,8 \div 0,9$ đối với tia β và 10^{-2} đối với tia γ .

12.1.3. Ống đếm tỷ lệ

Nguyên lý của ống đếm tỷ lệ dựa vào việc sử dụng hiệu ứng nhân (do va chạm) số ion N_0 hình thành khi có chùm tia bức xạ chiếu vào chất khí. Hệ số nhân M (nằm trong khoảng $10^2 \div 10^3$) phụ thuộc vào bản chất của chất khí và tăng theo áp suất và điện áp. Quá trình khuếch đại này có thể đủ lớn để cho phép phát hiện chỉ một hạt bức xạ duy nhất. Ứng với N_0 ion tạo thành, điện tích thu được $Q = MN_0 q_e$ và điện áp $V_m = MN_0 q_e / C$, trong đó C là điện dung ở đầu ra của ống đếm. Thí dụ: $M = 500$, $N_0 = 200$, $C = 10$ pF, $V_m = 1,6$ mV.

Biên độ xung ra tỷ lệ với năng lượng mà hạt mất đi khi nó đi qua thể tích hữu ích của đầu đo. Sự phân biệt biên độ của xung ra cho phép lựa chọn hạt trong số các hạt tới khác nhau, thí dụ cho phép phát hiện bức xạ α (N_0 lớn) trong khi có mặt các bức xạ β và γ (N_0 nhỏ).

12.1.4. Ống đếm Geiger-Muller

Khi điện trường đặt vào đủ mạnh, các ion sơ cấp nhận được năng lượng đủ lớn để kích thích tạo ra các ion thứ cấp do va chạm. Các ion này lại phát ra photon (trong dải phổ cực tím UV). Đến lượt mình, các photon UV này gây nên hiệu ứng ion hóa chất khí (hiệu ứng quang điện) và phát xạ điện tử từ vật liệu kim loại làm catot. Kết quả là xảy ra hiện tượng thác lũ, đặc biệt dọc theo dây anot, tạo nên tín hiệu ở đầu ra có biên độ (từ 1 đến 10 V) không phụ thuộc vào số ion sơ cấp N_0 tạo thành khi hạt phóng xạ chiếu tới. Ống đếm G-M chỉ dùng để phát hiện hạt chứ không dùng để đo năng lượng của hạt.

Để dùng dòng thác lũ có thể áp dụng một trong hai cách:

- Trộn vào với chất khí của ống đếm (thường là khí hiếm) một loại khí khác, thí dụ khí halôgen, để hấp thụ bức xạ tia cực tím và dùng dòng thác lũ, ống đếm sẽ tự ngắt.
- Mắc vào mạch anot một điện trở R_1 tương đối lớn, từ 2 đến 10 M Ω . Khi xảy ra hiện tượng thác lũ, sụt thế trên R_1 sẽ làm giảm điện áp giữa catot và anot xuống thấp hơn điện áp ngưỡng.

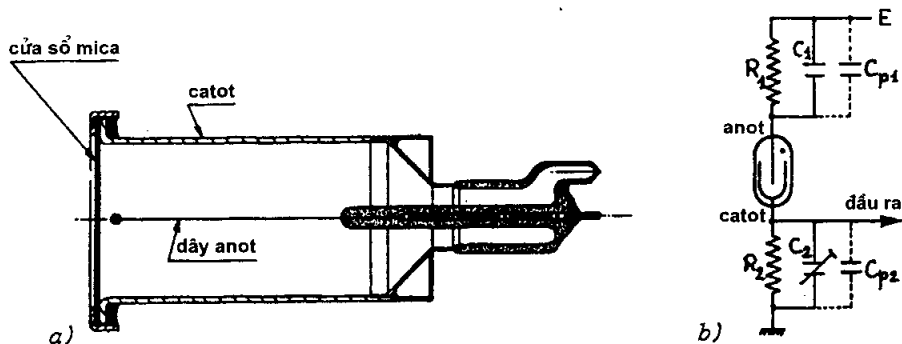
Phụ thuộc vào điện áp V đặt trên ống đếm, chế độ G-M có thể kéo dài hàng trăm vôn, ngưỡng dưới nằm trong khoảng $\sim 300 \div 400$ V và giới hạn trên trong phạm vi $\sim 700 \div 900$ V. Trong dải điện áp này, đối với một bức xạ hạt nhân cho trước, tỷ lệ đếm n (số xung trong một giây) ít phụ thuộc vào điện áp V:

$$\frac{1}{n} = \frac{dn}{dV} < 10^{-4} \text{ V}^{-1} \quad (12.6)$$

Nguyên lý cấu tạo của ống đếm G-M biểu diễn trên hình 12.3. Điện trở anot R_1 , ngoài tác dụng để tắt hiện tượng thác lũ như vừa giới thiệu còn có tác dụng bảo vệ. Điện trở catot R_2 là điện trở đo có giá trị $\sim 0,1 \div 1$ M Ω . Biên độ xung điện áp V_2 trên hai đầu điện trở R_2 được biểu diễn bằng biểu thức:

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (E - V_s) \quad (12.7)$$

trong đó E là điện áp nuôi anốt và V_s là điện áp ngưỡng của dải điện áp làm việc.



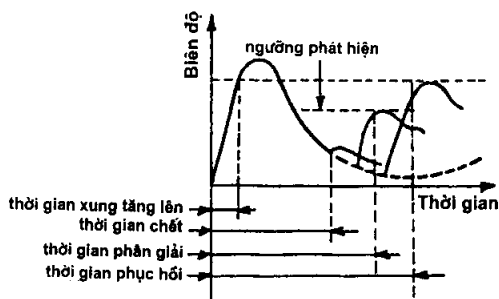
Hình 12.3: Ống đếm Geiger-Muller: a) sơ đồ cấu tạo; b) mạch điện.

Để tránh biến dạng xung do điện dung ký sinh (C_{p1} , C_{p2}) của điện cực và dây dẫn gây nên, người ta thêm vào một mạch bù trừ gồm hai điện dung C_1 và C_2 được chọn sao cho

$$(C_{p1} + C_1)R_1 = (C_{p2} + C_2)R_2 \quad (12.8)$$

Xung ra được đặc trưng bởi thời gian xung lên ngắn ($\sim \mu s$), thời gian xung xuống dài do cần dập tắt phóng điện ($\sim 50 \div 150 \mu s$).

Dưới đây sẽ định nghĩa những khoảng thời gian đặc trưng của tín hiệu xung (h. 12.4).



Hình 12.4: Các khoảng thời gian đặc trưng của tín hiệu xung.

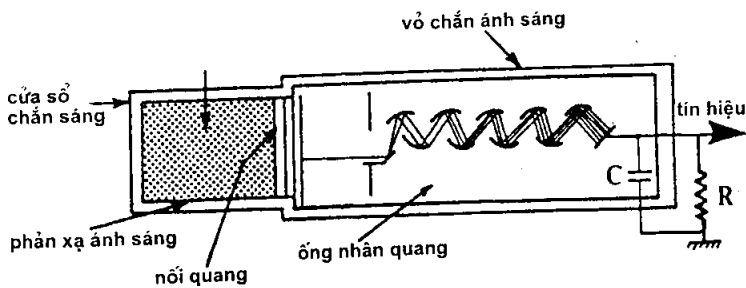
- Thời gian chết: là khoảng thời gian tính từ thời điểm bắt đầu của một xung bình thường cho đến thời điểm để sao cho trong khoảng thời gian giữa hai thời điểm này ống không nhạy với các sự kiện ion hóa khác. Thời gian chết thường có giá trị nằm trong khoảng $10 \div 200 \mu\text{s}$ phụ thuộc vào các ống khác nhau.
- Thời gian phân giải: là khoảng thời gian tối thiểu đủ để phân biệt được hai sự kiện ion hóa.
- Thời gian phục hồi: là khoảng thời gian tối thiểu để phân biệt hai sự kiện ion hóa cung cấp xung có biên độ bình thường.

Thí dụ về đặc trưng của một ống G-M, ống ZP1410 (hãng RTC):

- Lĩnh vực sử dụng: phát hiện hạt α , β , γ liều lượng $10^{-4} \div 3 \text{ R/h}$;
- Tỷ lệ đếm γ : 320 xung.s^{-1} với liều lượng 10^{-2} R/h (^{60}Co);
- Thời gian chết cực đại: $175 \mu\text{s}$;
- Cửa sổ mica: dày $1,5 \text{ mg.cm}^{-2}$;
- Thành ống Fe-Cr: dày 910 mg.cm^{-2} .
- Chất khí trong đầu đo: neon-halogen;
- Điện áp nuôi: 575 V .

12.2. Đầu đo nhấp nháy

Đầu đo nhấp nháy là một hệ gồm bộ nhấp nháy và bộ nhân quang (h. 12.5). Bộ nhấp nháy được làm từ một vật liệu cho phép chuyển đổi năng lượng



Hình 12.5: Đầu đo nhấp nháy.

của hạt tới thành photon ánh sáng có bước sóng giữa xanh và cực tím. Các photon tới photocatốt của bộ nhân quang làm phát xạ điện tử ở đó, số

lượng của chúng sau đó được nhân lên do phát xạ thứ cấp và được thu lại ở anot để hình thành tín hiệu điện ở đầu ra của đầu đo nhấp nháy.

Sự phát sáng của bộ nhấp nháy là hiện tượng phát quang: năng lượng tới làm cho nguyên tử hoặc phân tử chuyển sang trạng thái kích thích, khi trở về trạng thái cơ bản chúng phát ra photon.

Trong một số chất hữu cơ (antraxen, toluen), phát quang là tính chất phân tử và xuất hiện cả ở trạng thái rắn và trạng thái lỏng. Trong những chất vô cơ (sulfua kẽm ZnS, NaI) phát quang là hiện tượng chỉ xảy ra trong tinh thể do có sự tồn tại của khuyết tật là các tâm kích hoạt (tạp, bất đối xứng...). Để phát hiện các hạt tích điện phải dùng ZnS và các vật liệu hữu cơ nhẹ như antraxen. Các hạt γ được phát hiện một cách gián tiếp bằng hiệu ứng nhấp nháy gây nên bởi các điện tử được giải phóng do hiệu ứng quang điện trong vật liệu NaI và CsI. Người ta cũng phát hiện các neutron nhiệt nhờ hỗn hợp của bor (^{10}B) và sulfua kẽm (ZnS), hiệu ứng nhấp nháy gây nên do các hạt α phát ra khi vật liệu bị hạt neutron nhiệt bắn phá.

Kết hợp hiệu ứng nhấp nháy và nhân quang:

Giả thiết một hạt tới truyền năng lượng W cho bộ nhấp nháy, hạt sẽ làm phát xạ n_s photon:

$$n_s = \frac{W}{W_1} = r_s \cdot \frac{W}{h\nu} \quad (12.9)$$

trong đó r_s là hiệu suất phát quang. Trong số n_s photon này, chỉ có n_k photon đến được photocatot:

$$\frac{n_k}{n_s} = r_0 \quad (12.10)$$

r_0 gọi là hiệu suất chuyển đổi quang.

Nếu có n_k photon đến được catot, chúng sẽ gây ra n_e điện tử phát xạ:

$$n_e = \eta_k \cdot n_k \quad (12.11)$$

trong đó η_k là hiệu suất lượng tử của photocatot. Thông thường η_k nằm trong khoảng $\sim 10\% \div 30\%$ phụ thuộc vào thành phần cấu tạo của nó.

Số điện tử thu được tại anot được tính bằng biểu thức:

$$n_a = M \cdot n_e = M \cdot \eta_k \cdot r_0 \cdot r_s \cdot \frac{W}{h\nu} \quad (12.12)$$

trong đó M là hệ số khuếch đại của bộ nhân quang.

Thí dụ: đối với một hạt α 5 MeV truyền năng lượng cho bộ nhấp nháy làm bằng sulfua kẽm, các hệ số có giá trị như sau:

$$\begin{aligned} - r_s &= 28 \%, & h\nu &= 3 \text{ eV } (\lambda = 0,45 \text{ } \mu\text{m}), & n_s &= 4,7 \cdot 10^5 \\ - r_0 &= 30 \%, & n_k &= 1,4 \cdot 10^5, \\ - \eta_k &= 10 \%, & n_e &= 1,4 \cdot 10^4, \\ - M &= 106, & n_a &= 1,4 \cdot 10^{10}. \end{aligned}$$

Để cải thiện hiệu suất chuyển đổi quang r_0 của đầu đo nhấp nháy (tới 30 %) phải kết hợp hai biện pháp:

- Giảm sự mất mát ánh sáng bằng cách tăng phản xạ của bề mặt bộ nhấp nháy;
- Đảm bảo nối với bộ nhân quang bằng “đệm quang” có chiết suất nằm trong khoảng giữa chiết suất của bộ nhấp nháy và chiết suất của thủy tinh làm vỏ bộ nhân quang.

Ưu điểm của đầu đo nhấp nháy là tỷ lệ đếm cao và hiệu suất phát hiện lớn đối với tia gamma. Nhược điểm của đầu đo loại này là có cấu tạo phức tạp vì phải dùng bộ nhân quang.

12.3. Đầu đo bán dẫn

Khi hạt phóng xạ được thu nhận ở đầu đo nó làm ion hóa nguyên tử của chất bán dẫn tạo ra cặp điện tử-lỗ trống. Năng lượng W_1 của hạt mất đi cho việc tạo thành cặp điện tử-lỗ trống cỡ vài eV (3,6 eV đối với silic ở 300K), nhỏ hơn so với năng lượng W_1 cần thiết để ion hóa chất khí. Để ngăn cản sự tái hợp điện tử-lỗ trống, các điện tích này phải được giải phóng trong vùng có điện trường đủ mạnh để đảm bảo sự phân chia cặp và thu gom chúng, đây là trường hợp trong vùng nghèo của chuyển tiếp PN (điốt) phân cực ngược. Chiều rộng vùng nghèo l_d được xác định bởi biểu thức:

$$l_d = \sqrt{\rho \cdot V} \quad (12.13)$$

trong đó ρ là điện trở suất của chất bán dẫn trong vùng lân cận của chuyển tiếp, V là điện áp ngược đặt vào chuyển tiếp.

Để tăng thể tích hữu hiệu của đầu đo phải tăng chiều rộng vùng nghèo, một mặt làm tăng điện trở suất của vùng lân cận chuyển tiếp, mặt khác làm phân cực chuyển tiếp dưới điện áp ngược lớn hơn (nhưng vẫn phải thấp hơn điện áp đánh thủng).

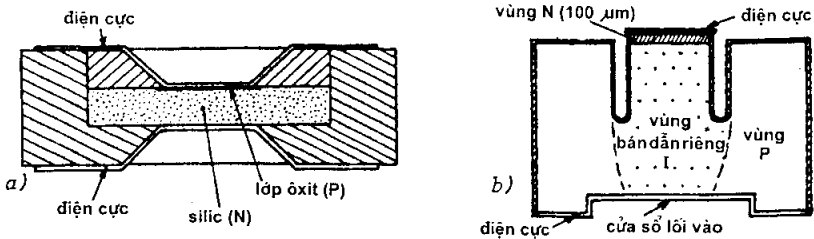
Ngoài ra, để tránh tổn hao năng lượng của hạt trên đường đi tới vùng nghèo, bề dày vùng này (vùng chết nằm ngoài vùng nghèo) phải rất nhỏ nghĩa là phải rất sát với vùng nghèo để miền nghèo có thể trải rộng đến gần sát bề mặt đầu đo. Có hai điểm mấu chốt mà các công nghệ khác nhau đều hướng tới, đó là mở rộng vùng nghèo và thu hẹp vùng chết. Dưới đây trình bày hai kiểu đầu đo bán dẫn.

Điot dùng hàng rào thế bề mặt:

Chuyển tiếp được hình thành bằng cách oxy hóa bề mặt silic loại N, lớp ôxit là loại P sau đó phủ lớp vàng dày $\approx 200 \text{ \AA}$ làm điện cực (h. 12.6a). Vùng nghèo trải rộng toàn bộ bề dày silic ($\sim 1 \text{ mm}$) nghĩa là không có vùng chết (cả phía trước và phía sau).

Điot silic hoặc gecmani pha tạp Li:

Đầu đo chế tạo bằng cách khuếch tán nhiệt và di chuyển Li (nguyên tử donor) dưới điện trường vào trong silic hoặc gecmani loại P. Li trung hòa tạp acceptor ($\approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) tạo thành diot gồm 3 vùng (h.12.6b):

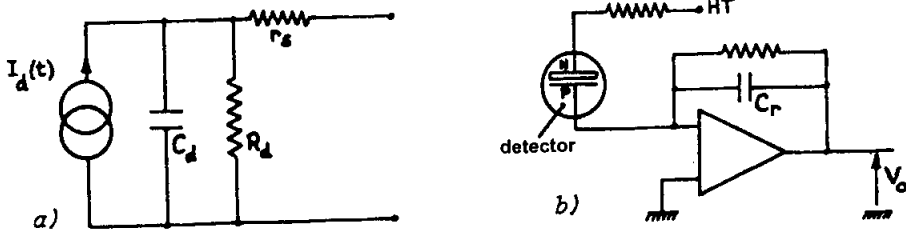


Hình 12.6: Đầu đo bán dẫn: a) diot hàng rào thế bề mặt; b) diot silic pha tạp Li.

- Vùng loại N nơi các tạp chất Li (N) đã triệt tiêu đặc tính loại P của vật liệu ban đầu (do nồng độ tạp chất Li lớn hơn nhiều so với nồng độ hạt dẫn cơ bản của Si - nồng độ photpho - trước khi khuếch tán).
- Vùng loại I là bán dẫn thuần có điện trở suất lớn, nơi Li bù trừ đặc tính P ban đầu của vùng.
- Vùng loại P không bị thay đổi bởi Li.

Đây là diot loại PIN. Ứng dụng diot silic pha tạp Li để phát hiện hạt α và β ở 300 K, loại Si pha tạp Li hoặc Ge pha tạp Li để phát hiện tia X và tia γ ở 77 K.

Sơ đồ tương đương của diot - detector hạt nhân có dạng giống như của photodiode và được biểu diễn trên hình 12.7a.



Hình 12.7: Đầu đo bán dẫn: a) sơ đồ tương đương; b) bộ khuếch đại điện áp.

Khi hạt truyền năng lượng cho đầu đo, nguồn dòng cung cấp xung $I_d(t)$. Điện tích tương ứng Q_d được chuyển thành xung điện áp biên độ V_0 nhờ bộ khuếch đại điện tích:

$$V_0 = \frac{Q_d}{C_r} \quad (12.14)$$

trong đó C_r là điện dung của bộ khuếch đại.

Điện tích Q_d có thể biểu diễn theo năng lượng W mà hạt nhượng cho đầu đo và theo năng lượng W_1 cần thiết để tạo cặp điện tử-lỗ trống (bằng 3,6 eV đối với silic ở 300 K):

$$Q_d = \frac{W}{W_1} \cdot q_e \quad (12.15)$$

trong đó $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Từ đây:

$$V_0 = \frac{W}{W_1 C_r} \cdot q_e \quad (12.16)$$

Thí dụ: trường hợp đầu đo silic với $C_r = 10^{-12}$ F:

$$\frac{V_0}{W} = 44 \text{ mV/MeV} \quad (12.17)$$

Ưu điểm của các đầu đo bán dẫn là có kích thước nhỏ, chắc chắn, có độ tuyến tính giữa tín hiệu ra và năng lượng thu được, thời gian đáp ứng nhỏ (cỡ 10^{-9} s).

CHƯƠNG 13

CẢM BIẾN ĐỘ ẨM

Độ ẩm cao của không khí và của chất khí nói chung có thể có hậu quả nghiêm trọng đối với các quá trình lý hóa và sinh lý. Bởi vậy đo độ ẩm là điều bắt buộc trong nhiều thiết bị và môi trường làm việc vì những lý do có thể liệt kê dưới đây.

Trong đời sống, độ ẩm tương đối cần phải duy trì để đảm bảo cảm giác dễ chịu cho con người thay đổi trong một khoảng tương đối rộng: từ 35 % đến 70 %. Nếu độ ẩm tương đối thấp hơn 35 %, bộ máy tiêu hóa bị kích thích, còn nếu lớn hơn 70 % thì sự ra mồ hôi sẽ bị giảm nghiêm trọng. Nói chung độ ẩm ảnh hưởng đến tiêu thụ năng lượng: độ ẩm càng cao thì càng tốn phí năng lượng để có cùng điều kiện môi trường.

Trong công nghiệp, các điều kiện về độ ẩm rất khác nhau phụ thuộc vào sản phẩm cụ thể. Trong một số trường hợp, phải duy trì độ ẩm không đổi trong môi trường làm việc, thí dụ, trong công nghiệp dệt, bởi vì sự thay đổi độ ẩm làm thay đổi các đặc tính của sợi (như sức căng cơ học). Trong công nghệ thực phẩm, điều kiện bảo quản thực phẩm tối ưu phụ thuộc vào loại sản phẩm, thường là ở nhiệt độ $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ và độ ẩm trong khoảng 85 - 90 %. Độ ẩm cao quá làm cho thực phẩm bị hỏng, và thấp quá làm giảm trọng lượng do bay hơi nước.

Vấn đề phát hiện vết hơi nước: trong nhiều quá trình công nghiệp, việc tránh vết hơi nước trong không khí hoặc trong các chất khí (cacbon, etylen, khí tự nhiên...) là rất quan trọng, bởi vì sự có mặt của hơi nước ở một lượng đáng kể có thể gây nên những phản ứng phụ hoặc gây nên quá trình ngưng tụ. Nhu cầu phát hiện độ ẩm rất nhỏ cỡ phần triệu thể tích (ppm) đặc biệt quan trọng đối với một số ứng dụng công nghiệp như năng lượng hạt nhân, vi điện tử, luyện kim, gia công nhiệt, điện áp cao.

13.1. Những định nghĩa cơ bản về không khí ẩm

Xét không khí ẩm có thể tích V ở nhiệt độ T . Khối lượng M không khí ẩm chứa trong thể tích V là tổng của khối lượng không khí khô m_a và khối lượng của hơi nước m_v . Gọi áp suất tổng cộng P là tổng của áp suất riêng phần của không khí khô p_a và của hơi nước p_v ($P = p_a + p_v$). Khi đó một số khái niệm chung được định nghĩa như sau:

Tỷ lệ trộn r (kg/kg):

Tỷ lệ trộn r là tỷ số giữa khối lượng hơi nước và khối lượng không khí khô mà lượng hơi nước trộn trong đó:

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (13.1)$$

Áp suất hơi bão hòa:

Áp suất hơi bão hòa $p_s(T)$ (đo bằng Pa) là áp suất hơi nước ở trạng thái cân bằng với nước (lỏng) ở nhiệt độ T . Đây là giá trị lớn nhất mà áp suất riêng phần p_v có thể đạt tới ở nhiệt độ T . Lớn hơn áp suất này sẽ xảy ra ngưng tụ.

Độ ẩm tương đối:

Độ ẩm tương đối U (%) là tỷ số giữa áp suất riêng của hơi nước và áp suất hơi bão hòa ở nhiệt độ T :

$$U = \frac{p_v}{p_s(T)} \cdot 100 \quad (13.2)$$

Nhiệt độ hóa sương:

Nhiệt độ hóa sương T_d ($^{\circ}\text{C}$) là nhiệt độ cần phải làm lạnh không khí ẩm xuống tới đó để đạt được trạng thái bão hòa, tỷ số trộn r không thay đổi trong quá trình làm lạnh. Đây chính là nhiệt độ để sao cho

$$p_v = p_s(T_d) \quad (13.3)$$

Nhiệt độ ẩm:

Nhiệt độ ẩm T_h ($^{\circ}\text{C}$) là nhiệt độ cân bằng của một khối lượng nước hóa hơi và không khí trong trường hợp khi nhiệt lượng cần thiết để hóa hơi chỉ được trích từ không khí.

Enthalpy riêng:

Tổng nhiệt lượng chứa trong không khí ẩm có nguồn gốc chính là enthalpy tương ứng với không khí khô ở 0 °C. Enthalpy riêng i (đo bằng kJ/kg) được tính cho một đơn vị khối lượng của không khí khô.

Thí dụ, để chuyển không khí ẩm có chứa khối lượng không khí khô m_a xác định bởi điều kiện A ($T = T_A, r = r_A$) sang điều kiện B ($T = T_B, r = r_B$) cần cung cấp một năng lượng:

$$(i_A - i_B) \cdot m_a \tag{13.4}$$

trong đó i_A và i_B là enthalpy riêng ở điều kiện A và B.

Tiện lợi của enthalpy riêng là có thể nhóm nhiệt lượng “nhảy” tương ứng với thay đổi nhiệt độ ($T_B - T_A$) giữa A và B với nhiệt lượng “ẩn” tương ứng với sự thay đổi ($r_B - r_A$) của tỷ lệ trộn giữa A và B thành một số hạng:

$$i(T,r) = C_{pa} \cdot T + r(L_0 + C_{pv} \cdot T) \tag{13.5}$$

trong đó:

- C_{pa} là nhiệt dung riêng của không khí khô, 1,006 kJ/kg.°C ($T = 20$ °C);
- C_{pv} là nhiệt dung riêng của hơi nước, 1,84 kJ/kg.°C ($T = 20$ °C);
- L_0 là nhiệt lượng ẩn của quá trình bay hơi ở $T_0 = 0$ °C, 2501 kJ/kg.

Mối liên hệ giữa các đại lượng đặc trưng cho độ ẩm:

- Tỷ lệ trộn và áp suất hơi

$$r = \delta \frac{p_v}{P - p_v} \tag{13.6}$$

trong đó
$$\delta = \frac{M_v}{M_a} \cong 0,622 \tag{13.7}$$

M_a và M_v là khối lượng phân tử của không khí và hơi nước.

- Nhiệt độ ẩm và áp suất hơi:

$$p_v = p_s(T_h) - A P (T - T_h) \tag{13.8}$$

trong đó
$$A = \frac{C_{pa}}{\delta L_{T_h}} \cdot \frac{P - p_s(T_h)}{P} \tag{13.9}$$

với $A = 0,00064$ khi $T_h = 20$ °C.

13.2. Phân loại ẩm kế

Có thể phân chia ẩm kế thành hai loại chính:

- Loại thứ nhất dựa trên nguyên lý vật lý cho phép trực tiếp xác định độ ẩm, thí dụ ẩm kế ngưng tụ, ẩm kế điện ly.
- Loại thứ hai có nguyên lý dựa trên việc đo tính chất của vật có liên quan đến độ ẩm, thí dụ ẩm kế biến thiên trở kháng.

Các loại ẩm kế khác nhau này, tùy theo nguyên tắc hoạt động, cho phép tiếp cận với một trong những thông số của không khí ẩm đã mô tả ở mục trước. Các thông số của không khí ẩm và loại ẩm kế thích hợp để đo chúng được liệt kê như sau:

- Nhiệt độ hóa sương T_d đo bằng ẩm kế ngưng tụ, ẩm kế hấp thụ, ẩm kế ôxit nhôm và ẩm kế điện ly;
- Nhiệt độ ẩm T_h đo bằng psychromet.
- Độ ẩm tương đối U đo bằng ẩm kế biến thiên điện trở và ẩm kế biến thiên điện dung.

Nói chung rất khó so sánh các loại ẩm kế khác nhau bởi vì chúng đo các thông số khác nhau của không khí ẩm. Trước khi chọn một ẩm kế cần phải biết thông số chính muốn đo để chọn lựa thiết bị cho phép đo với độ sai lệch nhỏ nhất.

13.3. Ẩm kế ngưng tụ

13.3.1. Nguyên lý hoạt động và cấu tạo của ẩm kế

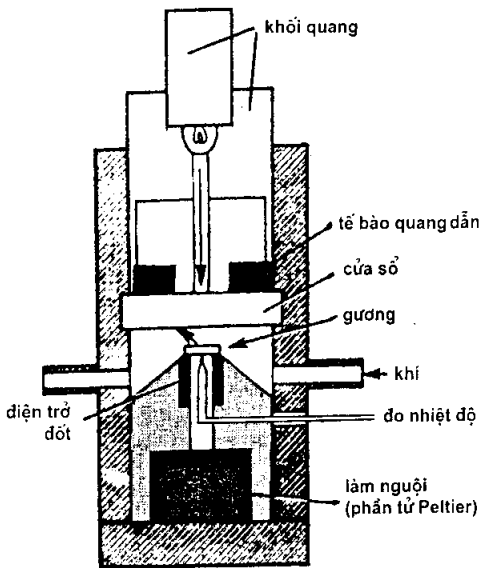
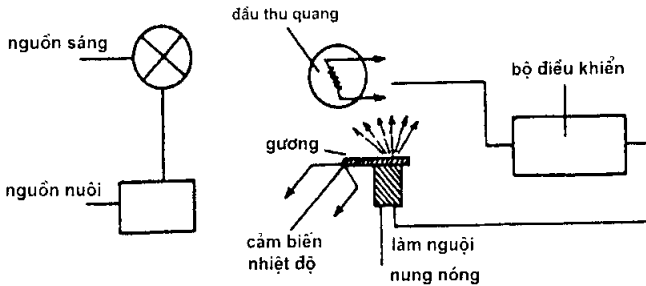
Khi làm lạnh một vật có thể đo nhiệt độ một cách liên tục cho đến khi hình thành lớp sương hoặc lớp băng trên bề mặt của nó. Tiếp theo, ổn định quá trình làm lạnh bằng cách giữ trạng thái cân bằng giữa không khí và lớp sương. Nhiệt độ đo được chính là điểm sương T_d (dew point) còn gọi là điểm băng giá T_f (frost point). Bắt đầu từ điểm sương này người ta đo áp suất hơi trong không khí ẩm.

Các ẩm kế đo điểm sương chỉ đáng tin cậy khi chúng được tự động hóa. Trên hình 13.1 biểu diễn sơ đồ nguyên lý và cấu tạo của một ẩm kế tự động theo nguyên lý ngưng tụ.

Các phần tử của ẩm kế ngưng tụ bao gồm :

- Gương bằng kim loại và hệ thống điều chỉnh nhiệt độ của gương;
- Cảm biến đo nhiệt độ của gương (điện trở platin hoặc cặp nhiệt);
- Nguồn phát chùm tia ánh sáng và đầu đo quang.

Khi không có ngưng tụ hơi nước, nguồn sáng chiếu vào gương để sao cho tia phản xạ không chiếu đến đầu đo. Lúc này hệ thống điều khiển phát tín hiệu để



Hình 13.1: Ẩm kế ngưng tụ: a) sơ đồ nguyên lý; b) cấu tạo của đầu đo.

làm lạnh gương (bằng hiệu ứng Peltier hoặc bằng nitơ lỏng) cho đến khi xuất hiện sự ngưng tụ. Khi xuất hiện lớp sương trên bề mặt gương, ánh sáng bị tán xạ đến đầu thu quang kích thích phát tín hiệu nung nóng gương thông qua bộ điều

khiến. Khi nhiệt độ gương tăng, lớp sương biến mất cùng với sự chấm dứt hiện tượng tán xạ ánh sáng và một chu kỳ làm lạnh mới lại được bắt đầu. Bằng cách hiệu chỉnh thích hợp có thể nhận được lớp ngưng tụ có bề dày cố định và tạo ra trạng thái cân bằng giữa hơi nước và lớp ngưng tụ. Cảm biến nhiệt độ đặt phía sau gương cho phép xác định nhiệt độ của gương.

13.3.2. Các yếu tố ảnh hưởng

Gradient nhiệt độ và sự dò nhiệt ảnh hưởng rất mạnh đến độ chính xác của đầu đo. Theo lý thuyết, nhiệt độ hóa sương là nhiệt độ của bề mặt phân biên giữa không khí và nước. Tuy nhiên trên thực tế luôn luôn tồn tại gradient nhiệt độ giữa bề mặt này và cảm biến nhiệt độ vì nó đặt sau gương. Đây là chưa kể đến sai số gây nên bởi hiệu ứng dẫn nhiệt của dây dẫn. Tuy vậy, đây là sai số hệ thống và có thể loại bỏ bằng cách chuẩn ẩm kế.

Khi điểm hóa sương thấp hơn $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, nước có thể tồn tại dưới dạng băng hoặc dạng chất lỏng chậm đông. Do vậy, với cùng tỷ lệ trộn r có thể có hai điểm cân bằng tương ứng với các áp suất riêng phần khác nhau. Trong trường hợp này, với cùng tỷ lệ trộn r cho trước, nhiệt độ hóa sương và nhiệt độ băng giá có thể khác nhau. Để tránh hiện tượng này có thể áp dụng biện pháp làm lạnh ở nhiệt độ rất thấp để chắc chắn là đã đạt được trạng thái rắn sau đó nâng lên nhiệt độ đóng băng.

Quá trình chuyển trạng thái giữa nước và băng không nhất thiết phải xảy ra xung quanh điểm $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Một số máy đo có thể làm việc ở trong nước chậm đông ở nhiệt độ thấp hơn $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Các thiết bị tốt còn được trang bị thêm bộ phận quan sát quang học làm việc bình thường ngay cả ở nhiệt độ hóa sương.

13.3.3. Các đặc trưng

Đây là loại ẩm kế duy nhất có phạm vi đo rất rộng, từ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ đến $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, thậm chí có thể mở rộng giới hạn trên cao hơn nữa cho những ứng dụng đặc biệt. Thí dụ, một số ẩm kế có thể làm việc ở $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ để đo nhiệt độ hóa sương của axit hoặc để đo dưới áp suất cao.

Độ chính xác khi đo điểm hóa sương T_d phụ thuộc vào độ chính xác khi đo nhiệt độ và vào sai số hệ thống. Một số ẩm kế có độ chính xác đến $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Đối với những chất có điểm hóa sương cao hơn $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, thời gian đáp ứng cỡ khoảng vài phút. Ở $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ phải mất 3 giờ với lưu lượng 10 l/h để hình thành một lớp băng $0,3\text{ }\mu\text{m}$, tương đương với thời gian đáp ứng ở điều kiện này.

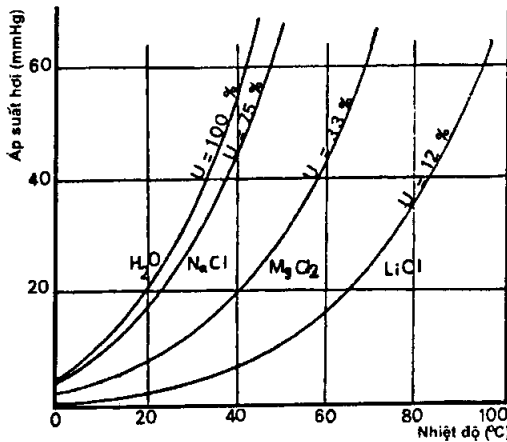
Ưu điểm nổi bật của ẩm kế ngưng tụ là có thể làm việc trong môi trường ăn mòn (thí dụ khí nhiên liệu). Tuy vậy, sự phức tạp về cấu tạo, giá thành cao, nhu cầu hiệu chỉnh thường xuyên là những nhược điểm chính làm cho ẩm kế loại này chỉ được sử dụng trong phòng thí nghiệm.

13.4. Ẩm kế hấp thụ

13.4.1. Nguyên tắc đo

Nguyên tắc đo độ ẩm dùng ẩm kế hấp thụ dựa trên hai hiện tượng:

- Áp suất hơi ở phía trên của một dung dịch bão hòa chứa các muối hòa tan nhỏ hơn áp suất hơi ở bên trên mặt nước với cùng điều kiện nhiệt độ như nhau (h.13.2).
- Độ dẫn điện của một muối kết tinh nhỏ hơn rất nhiều so với độ dẫn điện của dung dịch của chính muối đó với tỷ lệ cỡ $10^{-3} \div 10^{-4}$. Hiện tượng này cho phép thực hiện việc nung nóng dung dịch và hiệu chỉnh công suất nung.



Hình 13.2: Đường cong áp suất hơi phụ thuộc vào nhiệt độ của một số dung dịch bão hòa

Khi đo độ ẩm bằng ẩm kế hấp thụ người ta nung nóng dung dịch muối chứa trong ẩm kế cho đến khi áp suất hơi bão hòa ở phía trên dung dịch bằng áp suất hơi ở trong môi trường không khí bình thường. Biết được nhiệt độ này sẽ xác định được áp suất hơi và nhiệt độ hóa sương.

Thông thường người ta chọn các dung dịch muối bão hòa sao cho ở một nhiệt độ cho trước áp suất hơi càng nhỏ càng tốt. Trên thực tế clorua liti (LiCl) là muối duy nhất được sử dụng để chế tạo ẩm kế (h. 13.2). Trong bảng 13.1 ghi các giá trị áp suất hơi bão hòa trên mặt nước và trên dung dịch muối clorua liti bão hòa ở những nhiệt độ khác nhau. Đường cong áp suất hơi gần như tương ứng với đường cong độ ẩm tương đối 12 %.

Bảng 13.1

Nhiệt độ dung dịch T, °C	Áp suất hơi trên mặt nước p _s (nước, T), Pa	Áp suất hơi trên mặt LiCl p _s (LiCl, T), Pa	Độ ẩm tương đối $U = \frac{p_s(\text{LiCl}, T)}{p_s(\text{H}_2\text{O}, T)}$ (%)
5	872,47	119,2	13,7
10	1227,94	157,6	12,8
15	1705,32	203,6	11,9
20	2338,54	260,6	11,1
25	3168,74	353,2	11,1
30	4245,20	473,9	11,2
35	5626,45	628,7	11,2
40	7381,27	823,6	11,2
45	9589,84	1066,1	11,1
50	12344,78	1364,6	11,1
55	15752,26	1727,5	11,0
60	19933,09	2163,4	10,9
65	25023,74	2681,1	10,7

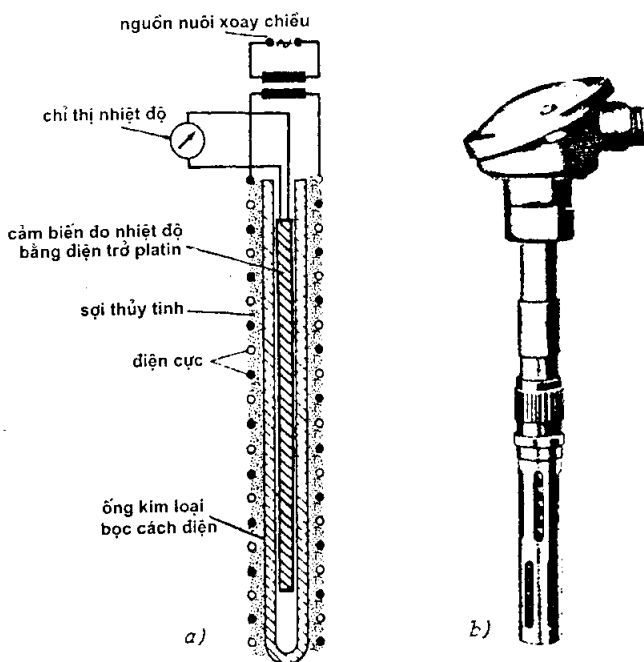
Thí dụ: ứng với cùng một giá trị của áp suất hơi bằng 2163 Pa, nhiệt độ hóa sương là 18,8 °C (cân bằng trên nước) nhưng nhiệt độ cân bằng của dung dịch LiCl bão hòa là 60 °C.

13.4.2. Ẩm kế LiCl

Cảm biến có cấu tạo bao gồm một ống được bao bọc bởi một lớp vải tẩm dung dịch LiCl trên đó có cuốn hai điện cực bằng kim loại không bị ăn mòn. Giữa hai điện cực này đặt một điện áp xoay chiều cho dòng điện chạy qua trong dung dịch để đốt nóng và làm bay hơi nước. Khi nước bay hơi hết, dòng điện giữa các điện cực giảm xuống một cách đáng kể bởi vì độ dẫn của muối clorua liti ở thể rắn nhỏ hơn rất nhiều so với độ dẫn của dung dịch, do vậy nhiệt độ của cảm biến giảm xuống. Đồng thời, vì LiCl là chất ưa nước

nên nó lại hấp thụ hơi nước, độ ẩm tăng và dòng điện I lại tăng lên làm cho nhiệt độ của cảm biến tăng lên. Cuối cùng sẽ đạt được cân bằng giữa muối rỗng LiCl và dung dịch. Theo nguyên lý nêu trên, cân bằng này xảy ra ở nhiệt độ liên quan trực tiếp đến áp suất hơi và cũng đồng thời đến nhiệt độ hóa sương T_d . Như vậy có thể xác định được T_d . Trong hệ thống này phần tử điều chỉnh chính là clorua liti.

Sơ đồ cấu tạo của ẩm kế LiCl biểu diễn trên hình 13.3.



Hình 13.3: Đầu đo dùng clorua liti: a) sơ đồ nguyên lý; b) hình dáng bên ngoài.

13.4.3. Các đặc trưng

Ẩm kế clorua liti là loại đo nhiệt độ hóa sương với độ chính xác cao. Việc đo nhiệt độ cân bằng thực hiện bằng cách đốt nóng cảm biến (thay vì phải làm lạnh như trong trường hợp cảm biến ngưng tụ) là ưu điểm của loại cảm biến này vì sự đơn giản, độ tin cậy cao và giá thành thấp.

Độ chính xác có thể đạt tới $\pm 0,2$ °C. Độ chính xác này phụ thuộc vào độ chính xác của cảm biến nhiệt độ đặt trong đầu đo, vào cấu tạo của đầu đo và

điều kiện sử dụng (như sự lưu thông không khí, nhiệt độ môi trường). Nếu cảm biến được chuẩn hóa, độ chính xác là ± 1 °C khi tốc độ lưu thông không khí thấp hơn 0,5 m/s.

Thời gian đáp ứng của đầu đo LiCl tương đối lớn, cỡ hàng chục phút. Phạm vi đo nhiệt độ hóa sương nằm trong khoảng từ -10 °C đến 60 °C. Độ chính xác phụ thuộc vào khoảng nhiệt độ như sau:

- -10 °C $\leq T_d \leq 34$ °C và 41 °C $\leq T_d \leq 65$ °C, độ chính xác: ± 1 °C;
- 34 °C $\leq T_d \leq 41$ °C, độ chính xác: ± 2 °C.

13.5. Ẩm kế biến thiên trở kháng

Ẩm kế biến thiên trở kháng có phần tử nhạy là chất hút ẩm. Khi sử dụng người ta đo sự thay đổi của một tính chất vật lý của nó (như điện trở hoặc điện dung) phụ thuộc vào độ ẩm của môi trường. Các phần tử nhạy của cảm biến có kích thước rất nhỏ cho phép đo gần như theo điểm với thời gian đáp ứng nhỏ.

Các chất hút ẩm có khả năng chứa lượng nước thay đổi phụ thuộc vào độ ẩm tương đối của không khí. Nếu muốn chế tạo cảm biến dựa trên nguyên tắc này cần phải sử dụng các chất có tính chất điện là hàm của lượng nước (tức là của độ ẩm), hàm này phải ổn định theo thời gian, có tính thuận nghịch và tuyến tính.

Các cảm biến độ ẩm dựa trên nguyên lý biến thiên trở kháng được phân thành ba họ chính:

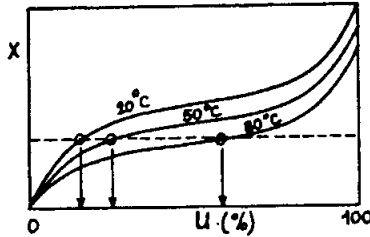
- Ẩm kế điện trở;
- Ẩm kế tụ điện dùng chất điện môi polyme;
- Ẩm kế tụ điện dùng chất điện môi là Al_2O_3 .

13.5.1. Ẩm kế điện trở

13.5.1.1. Nguyên tắc hoạt động và phương pháp chế tạo

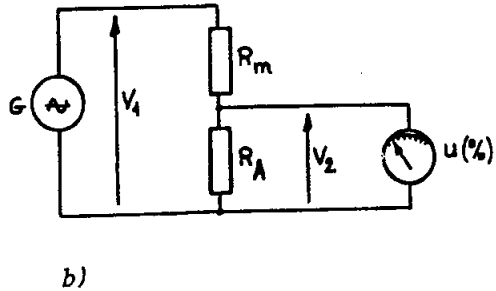
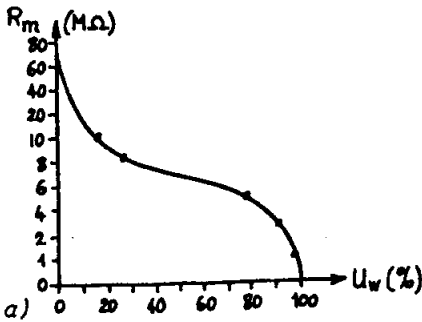
Trong ẩm kế điện trở, người ta dùng một lượng nhất định chất hút ẩm phủ lên để có kích thước nhỏ (vài mm^2). Trên bề mặt này cũng đồng thời phủ thêm hai điện cực bằng kim loại không bị oxy hóa. Giá trị của điện trở R đo được

giữa hai điện cực phụ thuộc vào hàm lượng nước (tỷ số giữa khối lượng nước hấp thụ và khối lượng chất khô) và vào nhiệt độ chất hút ẩm, mà hàm lượng nước lại phụ thuộc vào độ ẩm tương đối và nhiệt độ (h. 13.4).



Hình 13.4: Hàm lượng nước trong chất hấp thụ là hàm của độ ẩm và nhiệt độ.

Một số nhà chế tạo dùng chất lỏng làm chất hút ẩm. Các chất điện phân là những chất dẫn điện. Điện trở của chúng phụ thuộc vào thể tích, mà thể tích lại thay đổi theo hàm lượng nước. Người ta sử dụng tính chất này để tìm cách biến đổi độ ẩm tương đối thành tín hiệu điện. Trên hình 13.5a biểu diễn đường cong đặc trưng cho sự phụ thuộc của điện trở vào độ ẩm tương đối của phân tử nhạy cảm của ẩm kế. Có thể thấy rằng phạm vi thay đổi điện trở của ẩm kế tương đối rộng, từ $1\text{ M}\Omega$ đến tận $80\text{ M}\Omega$.



Hình 13.5: Ẩm kế điện trở: a) sự phụ thuộc của điện trở vào độ ẩm tương đối; b) mạch đo.

Trên thực tế, điện trở R_m của ẩm kế phụ thuộc đồng thời vào độ ẩm tương đối và nhiệt độ. Tuy vậy, ảnh hưởng của nhiệt độ có thể bù trừ bằng cách sử dụng sơ đồ mạch đo thể như biểu diễn trên hình 13.5b. Trong mạch này điện trở R_A mắc nối tiếp với R_m và có cùng hệ số nhiệt với R_m .

13.5.1.2. Các đặc trưng

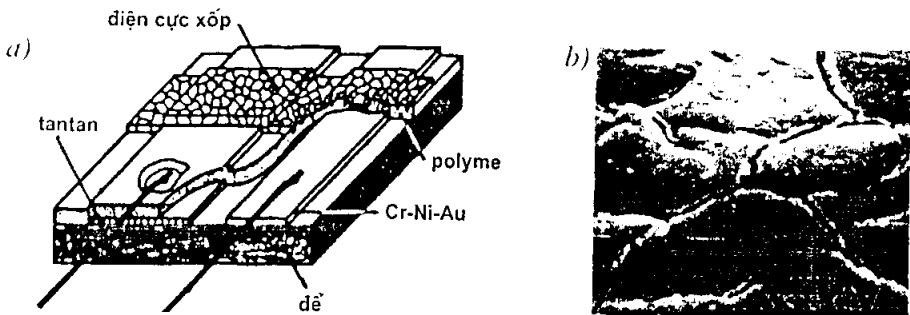
Các đặc trưng đo lường chủ yếu của ẩm kế điện trở biến thiên được liệt kê như sau:

- Dải đo độ ẩm: từ 5 % đến 95 %;
- Dải nhiệt độ: từ - 10 °C đến +50 hoặc 60 °C;
- Thời gian đáp ứng: ~ 10 s;
- Độ chính xác: ± 2 % đến ± 5 %

13.5.2. Ẩm kế tụ điện polyme

Ẩm kế tụ điện dùng chất điện môi polyme là một màng polyme dày cỡ μm có khả năng hấp thụ phân tử nước của không khí. Sự hấp thụ hơi nước này làm thay đổi hằng số điện môi ϵ của lớp polyme do đó làm thay đổi điện dung của tụ điện dùng lớp polyme này làm chất điện môi. Thực nghiệm cho thấy, sự thay đổi của điện dung tụ điện là hàm tuyến tính của độ ẩm với một hệ số ít phụ thuộc vào nhiệt độ.

Trên hình 13.6a biểu diễn sơ đồ nguyên lý của một ẩm kế tụ điện dùng chất điện môi polyme do hãng CORECI chế tạo.



Hình 13.6: Ẩm kế tụ điện polyme: a) sơ đồ cấu tạo; b) điện cực xếp.

Lớp polyme được phủ trên điện cực thứ nhất bằng tantan, sau đó một lớp Cr dày $100 \text{ \AA} \div 10000 \text{ \AA}$ được phủ tiếp lên polyme bằng phương pháp bay hơi trong chân không để làm điện cực thứ hai. Lớp phủ Cr gây nên các vết nứt trong lớp điện môi (h. 13.6b) làm tăng khả năng tiếp xúc của lớp này với không khí của môi trường nghiên cứu, do vậy trên thực tế thời gian đáp ứng của ẩm kế không phụ thuộc vào bề dày lớp điện môi.

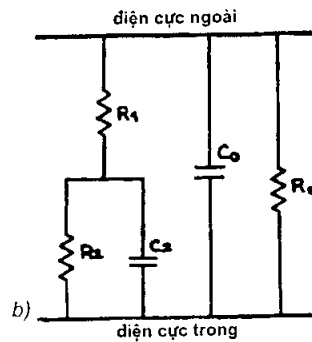
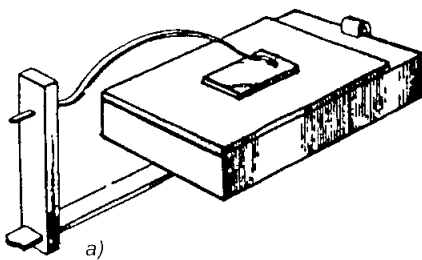
Các đặc trưng đo lường chủ yếu của ẩm kế tụ điện dùng chất điện môi là polyme như sau:

- Phạm vi đo: từ 0 % đến 100 % trong dải nhiệt độ làm việc thay đổi từ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ đến 80 hoặc $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Độ chính xác: từ $\pm 2\text{ }%$ đến $\pm 3\text{ }%$;
- Thời gian đáp ứng: cỡ vài giây.

Ngoài ra phải kể đến một số đặc tính ưu việt khác của cảm biến như: ít chịu ảnh hưởng của nhiệt độ, phần tử nhạy có thể nhúng vào nước mà không bị hư hỏng.

13.5.3. Ẩm kế tụ điện Al_2O_3

Trong ẩm kế loại này, lớp điện môi là Al_2O_3 được chế tạo bằng phương pháp anot hóa tấm nhôm, và bản thân tấm nhôm đóng vai trò là điện cực thứ nhất của tụ điện. Điện cực thứ hai là một màng mỏng kim loại được chế tạo trên mặt kia của lớp điện môi (h. 13.7a).



Hình 13.7: Ẩm kế tụ điện Al_2O_3 : a) sơ đồ cấu tạo; b) mạch tương đương.

Các kết quả nghiên cứu cho thấy, nếu chiều dày lớp Al_2O_3 nhỏ hơn $0,3\text{ }\mu\text{m}$ thì thay đổi trở kháng của tụ điện chỉ phụ thuộc vào áp suất riêng phần của hơi nước và không phụ thuộc vào nhiệt độ, do vậy có thể đo độ ẩm tuyệt đối của môi trường.

Quá trình anot hóa để tạo lớp điện môi được thực hiện bằng cách điện phân dung dịch axit sunfuric H_2SO_4 trong nước dùng nhôm làm anot. Oxy hình thành trên điện cực Al sẽ oxy hóa bề mặt điện cực này thành Al_2O_3 . Ôxít

nhôm là chất cách điện nên sẽ tạo thành nhiều điểm đánh thủng làm cho lớp này có cấu trúc xốp.

Thí dụ: trong bể chứa axit H_2SO_4 nồng độ 15 % ở nhiệt độ $10^\circ C$ điện phân dưới điện áp 15 V, sẽ nhận được lớp ôxít nhôm xốp chứa $7,7 \cdot 10^{10}$ lỗ hổng trên diện tích 1 cm^2 , đường kính lỗ hổng thay đổi trong khoảng $100 \div 300 \text{ \AA}$. Như vậy, tương ứng với bề mặt ngoài bằng 1 cm^2 sẽ có bề mặt hấp thụ bằng $0,2 \text{ m}^2$.

Để thay đổi hình dạng và sự phân bố lỗ hổng (tức là thay đổi tính chất của lớp điện môi đối với độ ẩm) có thể tác động bằng nhiều cách như:

- Thay đổi nhiệt độ và nồng độ dung dịch điện phân chứa trong bể;
- Thay đổi điện áp nguồn;
- Thay đổi thời gian oxy hóa anot;
- Thêm các ion phụ gia vào dung dịch.

Các ẩm kế chế tạo theo chế độ nêu ở trên thích hợp với độ ẩm thấp. Đối với chế độ ứng dụng này, yêu cầu lớp điện môi phải càng mỏng càng tốt. Vì vậy sau khi oxy hóa anot, lớp điện môi được mài cơ học với mục đích giảm bề dày để làm cho cảm biến chỉ nhạy ở nhiệt độ hóa sương của môi trường bao quanh.

Điện cực thứ hai phủ trên lớp điện môi Al_2O_3 thường là một trong các kim loại như Al, Cu, Au, Pt, Pd, hoặc hợp chất Ni-Cr.

Các đặc trưng đo lường chính của ẩm kế tụ điện sử dụng chất điện môi Al_2O_3 như sau:

- Ẩm kế cho phép đo nhiệt độ hóa sương T_d trong phạm vi thay đổi từ $-80^\circ C$ đến $+70^\circ C$.
- Cảm biến được chế tạo để sử dụng trực tiếp tại điểm cần đo độ ẩm.
- Thời gian đáp ứng cỡ vài giây.

Ưu điểm của cảm biến này là có thể làm việc trong dải áp suất rất rộng, từ chân không đến hàng trăm bar.

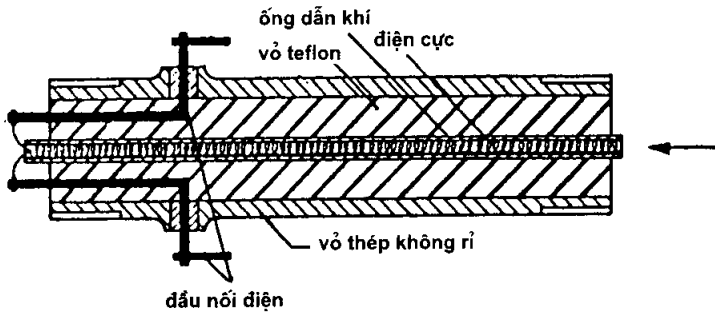
Tuy nhiên, cần tránh sử dụng cảm biến trong môi trường có chứa các chất ăn mòn (như NaCl, lưu huỳnh) vì chúng có thể ăn mòn nhôm và làm hư hỏng phần tử nhạy ẩm của ẩm kế.

13.6. Ẩm kế điện ly

13.6.1. Nguyên lý hoạt động và phương pháp chế tạo

Ẩm kế điện ly dùng để đo lượng hơi nước rất nhỏ trong không khí hoặc trong các chất khí. Phần tử nhạy cảm của ẩm kế là một chiếc ống dài 10 cm, bên trong ống có lớp P_2O_5 (anhydride phosphoric) được cuốn hai điện cực bằng platin hoặc rođi. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của ẩm kế điện ly biểu diễn trên hình 13.8.

Khi chất khí nghiên cứu chạy qua ống đo, hơi nước sẽ bị lớp anhydride photphoric hấp thụ thành H_2PO_3 . Điện áp một chiều cỡ 70 V đặt giữa hai điện cực sẽ gây nên hiện tượng điện phân nước giải phóng O_2 , H_2 và tái sinh P_2O_5 .



Hình 13.8: Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của ẩm kế điện ly.

Theo định luật Faraday về tỷ số giữa điện lượng chạy qua các điện cực và lượng nước bị điện phân, cần 96500 culong (c) để phân ly 1 gam hóa trị (9g) của nước (1 phân tử gam H_2O hóa trị 2 chứa 16 g O_2 và 2 g H_2). Nếu gọi dm_e/dt là khối lượng nước bị giữ (cũng là lượng nước bị điện ly) trong một đơn vị thời gian thì cường độ dòng điện phân I sẽ là:

$$I = \frac{96500}{9 \cdot 10^{-3}} \frac{dm_e}{dt} \quad (13.10)$$

và:

$$\frac{dm_e}{dt} = \alpha \cdot C_V \cdot Q_V \quad (13.11)$$

trong đó:

- Dòng điện đo bằng A, dm/dt đo bằng kg/s;
- Q_V là lưu lượng khí (m^3/s) đi qua đầu đo;
- C_V là nồng độ hơi nước (kg hơi nước/ m^3 không khí).
- α là hệ số giữ phân tử nước trong lớp P_2O_5 . Nếu tốc độ khí không đổi, đối với một cấu trúc hình học, hệ số α không đổi, do đó có thể xác định α bằng cách chuẩn đầu đo.

Biểu thức của dòng điện I cuối cùng có thể viết thành:

$$I = \frac{96500}{9 \cdot 10^{-3}} \cdot \alpha \cdot C_V \cdot Q_V \quad (13.12)$$

hay là $I = k \cdot C_V \quad (13.13)$

trong đó $k = \frac{96500}{9 \cdot 10^{-3}} \cdot \alpha \cdot Q_V \quad (13.14)$

Đối với một thể tích không khí cho trước, dòng điện phân tỷ lệ với nồng độ hơi nước biểu diễn bằng kg hơi nước/ m^3 không khí.

13.6.2. Các đặc trưng

Ấm kế loại này đặc biệt thích hợp với các chất khí chứa lượng hơi nước rất nhỏ. Giới hạn dưới của dải đo bị hạn chế bởi các vấn đề về hấp thụ và nhả hơi nước trên đường dẫn khí, thí dụ, các phép đo công nghiệp không thể thực hiện được khi nhiệt độ hóa sương hạ xuống tới $-70^\circ C$ (với nồng độ $10 \div 20$ ppm).

Mặc dù sử dụng ống dẫn khí bằng thép không rỉ, các hiện tượng hấp thụ vẫn làm tăng thời gian cần thiết để đạt tới trạng thái cân bằng (24 giờ đối với nồng độ nhỏ hơn 10 ppm và $T_d < -70^\circ C$).

Thời gian đáp ứng phụ thuộc chủ yếu vào hướng thay đổi độ ẩm:

- Nếu theo hướng tăng độ ẩm (giữa 100 và 1000 ppm) thời gian đáp ứng nhỏ hơn 30 s;
- Nếu theo hướng giảm độ ẩm (giữa 1000 và 100 ppm) thời gian đáp ứng tăng lên và có thể đạt tới vài phút.

Theo nguyên lý làm việc của đầu đo, chất P_2O_5 được tự động tái sinh thường xuyên. Tuy vậy thời gian sống của lớp này có giới hạn cho nên phải tái sinh

nó theo chu kỳ. Tần số tái sinh phụ thuộc vào điều kiện sử dụng và độ sạch của chất khí phân tích. Có thể giảm tần số này bằng cách sử dụng bộ lọc bằng thép không rỉ kết dính.

Ẩm kế điện ly được sử dụng để đo độ ẩm của rất nhiều loại khí như nitơ, hydro, metan, CO_2 , các chất khí làm lạnh (freon), không khí... Một số chất khí không dùng được với ẩm kế điện ly vì chúng làm hư hỏng đầu đo hoặc làm thay đổi hoạt động của nó, thí dụ khí amôniac, hơi rượu (các chất này tác dụng với P_2O_5).

CHƯƠNG 14

CẢM BIẾN ĐIỆN HÓA

Cảm biến điện hóa là một vật dẫn điện được đặt trong môi trường nghiên cứu nơi sẽ xảy ra quá trình trao đổi điện tích giữa các hạt tích điện có mặt trong môi trường và cảm biến. Sự thay đổi năng lượng tự do ở phân biên (là kết quả của quá trình vận chuyển hạt dẫn) được cảm biến thu nhận và truyền qua hệ đo dưới dạng tín hiệu điện (dòng điện hoặc điện thế).

Các cảm biến điện hóa được chia thành bốn loại: cảm biến điện thế, cảm biến dòng điện, cảm biến độ dẫn và cảm biến chọn lọc ion trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường (ISFET).

14.1. Cảm biến điện thế

Các cảm biến điện thế dựa trên nguyên tắc xác định sự khác nhau về điện thế giữa điện cực đo và điện cực so sánh (là điện cực có điện thế không đổi và có tính lặp lại khi nó được đặt trong môi trường nghiên cứu). Sự khác nhau về điện thế giữa hai điện cực là hàm của hoạt độ của các ion trong chất điện phân nơi đặt cảm biến. Điều kiện hoạt động của cảm biến điện thế là không có dòng điện trong mạch đo, vì thế người ta còn gọi nó là cảm biến có dòng điện bằng 0.

14.1.1. Nguyên tắc chung

Đo điện thế là phương pháp dựa trên việc đo sự khác nhau về thế giữa hai điện cực đặt trong một dung dịch. Thế của một điện cực là hàm của nồng độ ion có trong dung dịch cho nên việc đo điện thế của các điện cực cho phép xác định nồng độ dung dịch hoặc theo dõi sự thay đổi của nồng độ trong quá trình diễn ra phản ứng hóa học.

Phản ứng oxy hóa khử là phản ứng trao đổi điện tử tuân theo theo phương trình:



trong đó Ox là chất oxy hóa, và Red là chất khử. Theo hướng (1), chất nhận điện tử đóng vai trò chất oxy hóa và nó bị khử. Theo hướng (2), chất nhường điện tử đóng vai trò chất khử và nó bị oxy hóa.

Khi nhúng một điện cực kim loại không bị ăn mòn vào trong dung dịch oxy hóa khử, các điện tử được trao đổi giữa điện cực và dung dịch gây nên phản ứng điện hóa. Sau một thời gian sẽ đạt tới trạng thái cân bằng trong đó phản ứng trao đổi



xảy ra cùng tốc độ với phản ứng trao đổi ngược lại



Vào thời điểm này thành phần dung dịch ở gần điện cực không thay đổi nữa, và điện cực đạt được thế cân bằng E.

14.1.1.1. Định luật Nernst

Nói chung, trong một dung dịch hòa tan, các ion ứng xử giống như các phân tử trong chất khí lý tưởng. Nếu áp suất thẩm thấu của loại ion này lớn hơn áp suất thẩm thấu của loại ion khác thì sẽ xảy ra trao đổi điện tử ở điện cực để bù trừ cho sự chênh lệch áp suất đó.

Giả sử C_1 và P_1 là nồng độ và áp suất thẩm thấu của chất oxy hóa, C_2 và P_2 là nồng độ và áp suất thẩm thấu của chất khử. Nếu $P_1 > P_2$ thì phản ứng chiếm ưu thế trên điện cực là phản ứng (14.2). Bởi vậy trên điện cực sẽ xuất hiện điện tích dương có giá trị giới hạn bởi vì công w do phản ứng này cung cấp sẽ bị bù trừ hoàn toàn với công cần phải sinh ra để lấy từ điện cực dương một điện tử mang điện tích âm. Đối với một ion có thể viết biểu thức cân bằng:

$$w = E \cdot q \quad (14.4)$$

trong đó w là công do phản ứng cung cấp, E là thế cân bằng và q là điện tích của điện tử.

Đối với một ion-gam ta có:

$$W = E.N.q \quad (14.5)$$

nghĩa là

$$W = E.F \quad (14.6)$$

trong đó N là số Avogadro ($N=6,02.10^{23}$), và F là hằng số Faraday ($F=96493$ culong).

Đối với cả hai dạng của phản ứng (14.1) ở nhiệt độ không đổi sẽ có mối liên hệ:

$$dW = \frac{RT}{P} dP \quad (14.7)$$

trong đó R là hằng số của chất khí lý tưởng, T là nhiệt độ tuyệt đối và P là áp suất liên quan với nồng độ bởi biểu thức:

$$P = k C \quad (14.8)$$

do đó có thể viết

$$dW = \frac{RT}{C} dC \quad (14.9)$$

Gọi W_1 và W_2 là công để thực hiện phản ứng (1) và (2), khi đó

$$dW = dW_1 + dW_2 \quad (14.10)$$

$$dW = \frac{RT}{C_1} dC_1 + \frac{RT}{C_2} dC_2 \quad (14.11)$$

Do nồng độ tổng cộng luôn không đổi:

$$dC_1 = -dC_2 = dC \quad (14.12)$$

và

$$dW = \frac{RT}{C_1} dC + \frac{RT}{C_2} dC \quad (14.13)$$

nên

$$W = W_0 + RT \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (14.14)$$

Đặt

$$W_0 = FE_0 \quad (14.15)$$

ta được:

$$W = F \left[E_0 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \right] \quad (14.16)$$

So sánh hai biểu thức (14.6) và (14.16) ta tìm được biểu thức của thế cân bằng:

$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (14.17)$$

Khi trong phản ứng hóa học có n điện tử tham gia, biểu thức của thế cân bằng sẽ có dạng:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (14.18)$$

Các tính toán trên đây dựa trên giả thiết dung dịch là lý tưởng. Tuy nhiên trên thực tế hệ nghiên cứu không phải là lý tưởng như vẫn thường xảy ra. Trong những trường hợp như vậy cần phải thay nồng độ C bằng hoạt độ a theo biểu thức:

$$a = \gamma.C \quad (14.19)$$

trong đó γ là hệ số của hoạt độ. Khi đó biểu thức của thế cân bằng sẽ trở thành

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \quad (14.20)$$

Một cách tổng quát, biểu thức của định luật Nernst được viết lại dưới dạng:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{\text{Ox}}{\text{Red}} \right) \quad (14.21)$$

trong đó (Ox) và (Red) là hoạt độ của chất oxy hóa và chất khử (tương ứng), nghĩa là

$$E = E_0 + \frac{2,3RT}{nF} \log \left(\frac{\text{Ox}}{\text{Red}} \right) \quad (14.22)$$

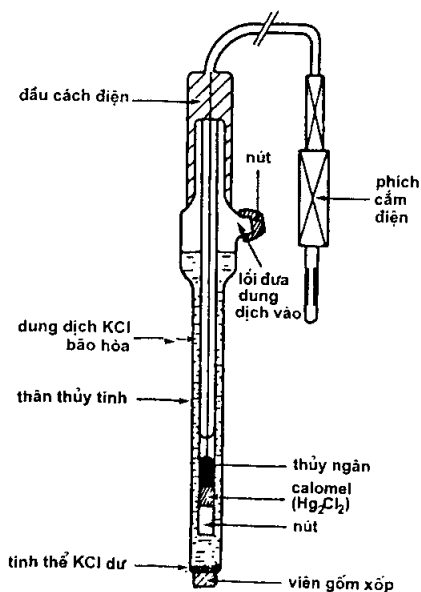
Tỷ số $\frac{2,3RT}{nF}$ gọi là hệ số Nernst, nó xác định độ dốc của đáp ứng điện cực.

Độ dốc này có giá trị thay đổi phụ thuộc vào nhiệt độ. Ở nhiệt độ 25 °C hệ số Nernst có giá trị bằng 59,16 mV.

14.1.1.2. Điện cực so sánh

Trên thực tế không thể đo điện thế của một điện cực một cách trực tiếp: chỉ có thể xác định hiệu điện thế giữa hai điện cực. Bởi vậy người ta đo hiệu điện thế giữa điện cực kim loại không bị ăn mòn hóa học (điện cực chỉ thị) và một điện cực so sánh (còn gọi là điện cực chuẩn) có điện thế không đổi được coi là điểm gốc.

Theo quy ước, người ta sử dụng điện cực chuẩn hydro để xác định điện thế không. Nó là một điện cực platin đặt trong dung dịch nước của các ion H^+ có hoạt độ bằng 1 trong đó có dòng hydro (với áp suất bằng áp suất khí quyển) chảy qua và tiếp xúc với platin. Hiệu điện thế giữa điện cực này với dung dịch được cố định ở giá trị không. Điện cực chuẩn hydro phải được sử dụng cẩn thận vì nó rất dễ bị nhiễm bẩn và hư hỏng, đồng thời việc cân bằng nó đòi hỏi nhiều thời gian.

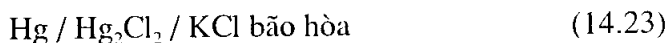


Hình 14.1: Điện cực so sánh calomel.

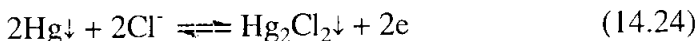
Trong thực nghiệm đối với các phép đo thông thường người ta dùng một điện cực so sánh để sử dụng hơn và có suất điện động được xác định chính xác, đó là điện cực calomel (h. 14.1), sulfat thủy ngân hoặc clorua bạc.

Điện cực so sánh calomel gồm một thân chính bằng thủy tinh điện đầy dung dịch clorua kali bão hòa. Thân này được bịt ở đầu phía dưới bằng một viên gốm xốp cho phép tiếp xúc trực tiếp với dung dịch nghiên cứu và thiết lập mối liên hệ về điện.

Trong thân chính bằng thủy tinh có đặt phân tử so sánh là thủy ngân tiếp xúc với clorua thủy ngân:



Sự cân bằng ở điện cực calomel dựa trên phản ứng:

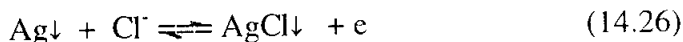


và điện thế của nó chỉ phụ thuộc vào hoạt độ của các ion clo Cl^- :

$$E = E_0 - 0,058 \log |\text{Cl}^-| \quad (14.25)$$

Khi điện cực được điền đầy clorua kali, điện thế của nó bằng 244,4 mV ở 25 °C so với điện thế của điện cực chuẩn hydro.

Điện cực so sánh dùng bạc-clorua bạc là một dây bạc phủ clorua bạc đặt trong dung dịch chứa ion clo. Hoạt động của điện cực dựa trên phản ứng:



và điện thế của nó bằng:

$$E_0 = E_0 - 0,058 \log |\text{Cl}^-| \quad (14.27)$$

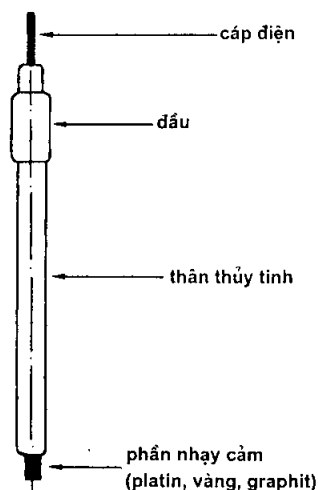
Điện thế này phụ thuộc vào hoạt độ của ion clo trong điện cực.

14.1.2. Điện cực đo thế oxy hóa - khử

Khi đo thế oxy hóa-khử thường phải sử dụng điện cực không bị ăn mòn hoạt động giống như vật cho và nhận điện tử. Nếu điện cực này được đặt trong một dung dịch chứa hệ oxy hóa-khử cần nghiên cứu thì nó sẽ có một điện thế với giá trị E xác định bởi biểu thức (14.21). Nếu nồng độ chất oxy hóa và chất khử thay đổi thì việc đo điện thế của điện cực sẽ cho phép theo dõi sự tiến triển của các phản ứng có kèm theo sự thay đổi nồng độ của một trong những thành phần tham gia phản ứng.

Việc đo hiệu điện thế giữa điện cực chỉ thị và điện cực so sánh được thực hiện bằng cách sử dụng các millivôn kế có trở kháng vào lớn. Các điện cực chỉ thị hay sử dụng là các điện cực kim loại không bị ăn mòn (vàng, platin,

thủy ngân, bạc), cacbon thủy tinh hay graphit. Chúng có cấu tạo bao gồm một que bằng platin (hoặc vàng, graphit...) nằm trong một ống thủy tinh hoặc polyme bảo vệ sao cho phần dưới của que (gọi là phần nhạy cảm) không bị che chắn để có thể tiếp xúc với dung dịch. Điện cực được nối điện ra ngoài bằng dây cáp dẫn điện. Trên hình 14.2 biểu diễn một điện cực kim loại dùng để đo thế oxy hoá khử.



Hình 14.2: Điện cực kim loại.

Điện cực platin sử dụng để đo điện thế từ $-0,1$ V đến $+0,9$ V, điện cực vàng dùng cho trường hợp khi điện thế cần đo nằm trong khoảng -1 V ÷ $+0,3$ V. Điện cực bạc được sử dụng để thực hiện các phép đo trong dung dịch mà bạc không tham gia vào các phản ứng điện hóa, tức là trong dung dịch không chứa ion Ag^+ .

14.1.3. Điện cực đo độ pH

Độ pH (logarit của hoạt độ của các ion H^+) thể hiện tính axit của dung dịch. Trên thực tế, việc đo độ pH thường xuyên được tiến hành trong nhiều lĩnh vực khác nhau như công nghiệp hóa học, nông nghiệp, dược, hóa dầu, sinh học lâm sàng...

Ngay từ năm 1909 Haber đã nhận thấy rằng một số loại thủy tinh (có thành phần xác định) là chất dẫn điện yếu, điện thế trên mặt phân cách của một

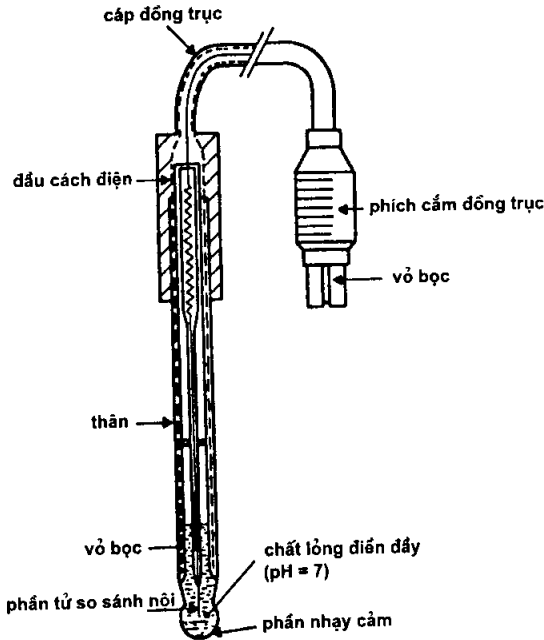
màng thủy tinh dẫn điện với dung dịch nước phụ thuộc vào độ pH của dung dịch và tuân theo định luật Nernst:

$$E = E_0' + \frac{RT}{F} \ln a_{H^+} \quad (14.28)$$

trong đó:

- E_0' là điện thế chuẩn của điện cực (với một điện cực so sánh cho trước);
- a_{H^+} là hoạt độ theo ion H^+ của dung dịch nghiên cứu.

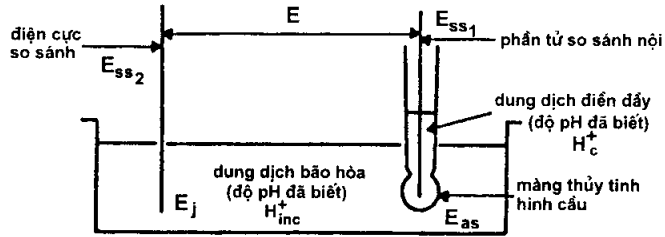
Điện cực màng thủy tinh có thành phần chính là một màng mỏng dạng hình cầu, hình trụ hoặc hình côn làm từ thủy tinh có thành phần đặc biệt. Màng được hàn với một ống thủy tinh có điện trở cao. Thể tích bên trong của điện cực (màng hình cầu) chứa dung dịch có độ pH đã biết trước (thường pH ~ 7) trong đó có đặt một phân tử so sánh nội (h. 14.3).



Hình 14.3: Điện cực dùng màng thủy tinh.

Để đo độ pH của một dung dịch, chỉ cần đặt điện cực màng thủy tinh vào trong dung dịch và đo hiệu điện thế xuất hiện giữa phân tử so sánh nội của

nó với điện cực so sánh cùng nằm trong dung dịch này. Muốn vậy, điện cực thủy tinh và điện cực so sánh được nối với một pH-met. Thực chất pH-met là một milivôn kế có trở kháng đầu vào rất lớn ($Z_e \geq 10^{12} \Omega$) kết hợp với một mạch điện chuyển đổi hiệu điện thế thành đại lượng số theo đơn vị pH.



Hình 14.4: Sơ đồ đo dùng điện cực thủy tinh.

Nếu tính đến các phân tử khác nhau có mặt trong cấu trúc đo (h. 14.4) thì hiệu điện thế giữa điện cực thủy tinh và điện cực so sánh được viết dưới dạng:

$$E = E_{ss_1} + E_{as} - E_{ss_2} - E_j - \frac{2,3RT}{F} \log(H_c^+) + \frac{2,3RT}{F} \log(H_{inc}^+) \quad (14.29)$$

với:

- E_{ss_1} là điện thế của phân tử so sánh nội của điện cực thủy tinh;
- E_{ss_2} là điện thế của điện cực so sánh;
- E_j là điện thế của chuyển tiếp lỏng tồn tại giữa dung dịch điện giải điện cực so sánh và dung dịch nghiên cứu;
- E_{as} là điện thế bất đối xứng của màng thủy tinh.

Nếu nhóm các số hạng không phụ thuộc vào pH lại với nhau thì biểu thức trên có thể viết lại như sau:

$$E = E'_0 - \frac{2,3RT}{F} \text{pH} \quad (14.30)$$

trong đó E'_0 là điện thế chuẩn của điện cực thủy tinh, và $\frac{2,3RT}{F}$ là độ dốc lý thuyết của điện cực thủy tinh.

14.1.4. Các điện cực đặc thù

Từ những năm 1934 Lengyel và Blum đã phát hiện thấy một số loại thủy tinh không sử dụng được để đo độ pH nhưng lại rất nhạy với hoạt tính của các ion kiềm như Na^+ , K^+ , Li^+ . Tính chất này được sử dụng để chế tạo các điện cực đặc thù.

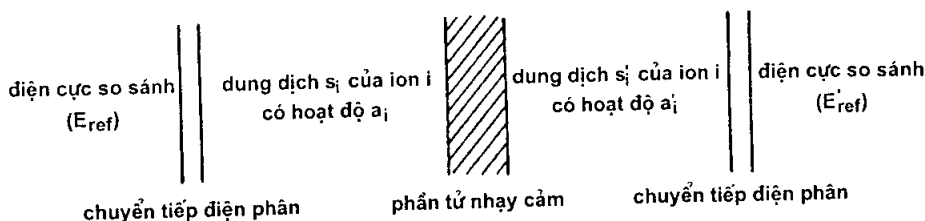
Phân tích cực của điện cực đặc thù là mặt phân cách giữa phần tử nhạy cảm của điện cực và dung dịch đo. Sự trao đổi ion xảy ra trên mặt phân cách này dẫn đến cân bằng nhiệt động trong đó thế điện hóa của các ion nằm ở hai phía của mặt phân cách bằng nhau. Các thế đó được xác định bởi hoạt độ của các ion khảo sát, hoạt độ này không đổi trong phần tử nhạy cảm nhưng thay đổi trong dung dịch đo. Các tính toán cụ thể sẽ dẫn đến biểu thức của định luật Nernst:

$$E = E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i \quad (14.31)$$

trong đó:

- E là hiệu thế giữa phần tử nhạy cảm và dung dịch;
- E_0 là thế chuẩn của phần tử nhạy cảm, liên quan trực tiếp đến hoạt độ không đổi của các ion i mà nó chứa đựng;
- z_i là điện tích của ion thứ i;
- a_i là hoạt độ của các ion i trong dung dịch đo.

Trên thực tế không thể đo trực tiếp hiệu thế này giữa hai môi trường có bản chất vật lý khác nhau. Để đo những biến thiên của E khi a_i thay đổi người ta xây dựng “chuỗi điện hóa” như biểu diễn trên hình 14.5 trong đó dung dịch s'_i của ion i có hoạt độ a'_i là hằng số.



Hình 14.5: Chuỗi điện hóa sử dụng để đo hoạt độ của ion.

Hiệu thế tổng cộng đo giữa hai đầu của chuỗi được biểu diễn bởi biểu thức:

$$E = \{E_{\text{ref}} + E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i\} - \{E'_{\text{ref}} + E_0 + (RT/z_i F) \ln a'_i\} \quad (14.32)$$

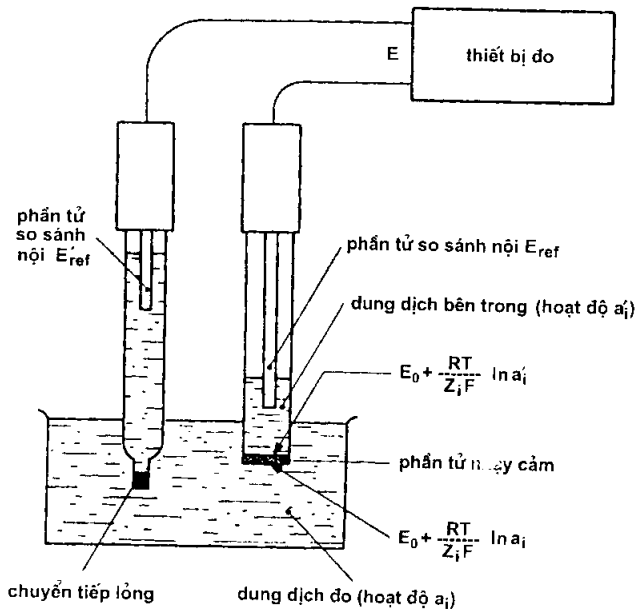
Nếu tập hợp các số hạng không đổi lại với nhau vào một số hạng chung

$$E'_0 = E_{\text{ref}} - (RT/z_i F) \ln a'_i - E'_{\text{ref}} \quad (14.33)$$

ta sẽ nhận được biểu thức:

$$E = E'_0 + (RT/z_i F) \ln a_i \quad (14.34)$$

Trên hình 14.6 biểu diễn sơ đồ nguyên lý của một điện cực đặc thù kết hợp với một điện cực so sánh.



Hình 14.6: Sơ đồ nguyên lý của hệ đo sử dụng điện cực đặc thù.

Các điện cực đặc thù phản ứng với hoạt độ của các ion. Đối với một nhiệt độ ổn định cho trước, hoạt độ này phụ thuộc vào:

- Nồng độ, điện tích và kích thước của các ion nghiên cứu;
- Bản chất và số lượng các ion ngoại lai có mặt trong dung dịch đo.

Trong một môi trường đã cho, hoạt độ liên quan đến nồng độ theo biểu thức $a = \gamma C$, trong đó hệ số γ của hoạt độ phụ thuộc chủ yếu vào lực ion, nghĩa là

vào số lượng và điện tích của tổng thể ion có mặt trong dung dịch. Nếu đảm bảo được điều kiện để sao cho lực ion của dung dịch chuẩn và dung dịch đo gần như nhau thì γ là hằng số. Biểu thức của điện thế E biểu diễn qua nồng độ các ion C_i có dạng:

$$E = E'_0 + (RT/z_i F) \ln(\gamma_i C_i) \quad (14.35)$$

Về mặt kỹ thuật, trong khi đo người ta thường thêm vào dung dịch đo một lượng dư thừa đáng kể các ion như nhau (gọi là “chất điện phân đệm” hoặc “muối đệm”) để cho sự thay đổi của nồng độ đo luôn rất nhỏ so với lượng ion tổng thể có mặt trong dung dịch và do đó có thể bỏ qua.

Thời gian đáp ứng của một điện cực đặc thù phụ thuộc vào thời gian ổn định của thế trên điện cực. Đường cong $E = f(t)$ có dạng expone, cho nên trên thực tế thời gian đáp ứng được xác định bằng thời gian cần thiết để đạt được độ ổn định qui định trước cho thế của điện cực. Nói chung, thời gian đáp ứng của điện cực nằm trong khoảng từ vài giây cho đến hàng chục phút do có nhiều thông số ảnh hưởng, thí dụ:

- Bản chất phần tử nhạy cảm ảnh hưởng đến động học của quá trình thiết lập cân bằng của sự trao đổi ion trên mặt phân cách;
- Nồng độ ion cần đo càng nhỏ thì thời gian thiết lập cân bằng càng lớn;

14.2. Cảm biến dòng điện

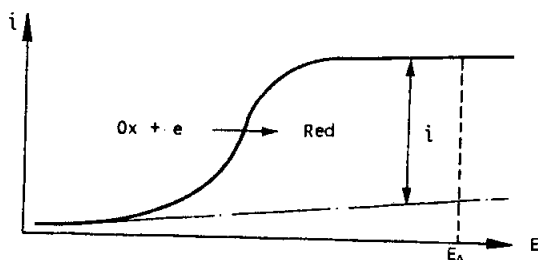
Cảm biến loại này hoạt động nhờ một dòng điện chạy qua mạch đo khi đặt một hiệu điện thế giữa hai điện cực, thường là một điện cực kim loại và một điện cực so sánh. Mật độ của các hạt tích điện tỷ lệ với cường độ dòng điện chạy giữa hai điện cực.

14.2.1. Nguyên lý đo

Cường độ dòng điện chạy giữa hai điện cực là hàm của mật độ các hạt tích điện trong dung dịch và điện thế đặt giữa hai điện cực. Trong những điều kiện xác định, sau khi chuẩn có thể xác định được nồng độ từ phép đo cường độ dòng điện. Trong phần lớn các trường hợp người ta tiến hành oxy hóa hoặc khử một loại hạt tích điện trên điện cực chỉ thị, còn điện cực thứ hai là điện cực so sánh.

Nếu đặt vào điện cực chỉ thị một điện thế E biến thiên so với điện cực so sánh và vẽ đường cong $i = f(E)$, chiều cao i của bậc giới hạn khuếch tán sẽ tỷ lệ với nồng độ các hạt bị oxy hóa (hoặc bị khử) trên điện cực chỉ thị (h. 14.7).

Trong cảm biến dòng điện người ta tiến hành điện phân giữa một điện cực chỉ thị và một điện cực so sánh bằng cách cố định điện thế điện phân E_A tương ứng với bậc giới hạn khuếch tán rồi xác định chiều cao của bậc khuếch tán này, nó có giá trị tỷ lệ với nồng độ của chất oxy hóa hay chất khử trên điện cực chỉ thị. Có thể tiến hành chuẩn trước trong cùng điều kiện bằng cách sử dụng dung dịch chứa nồng độ biết trước của chất cần xác định. Đường cong chuẩn cho phép suy ra nồng độ các ion cần đo.



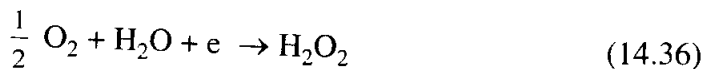
Hình 14.7: Đường cong dòng điện - thế.

Các giá trị của dòng điện cần đo rất thay đổi, nó phụ thuộc vào lượng các hạt tích cực về điện tác động lên điện cực chỉ thị, vào bề mặt điện cực v.v...

14.2.2. Điện cực đo khí

Trong số các cảm biến dòng điện cho phép đo chất khí hòa tan trong dung dịch, người ta thường sử dụng các điện cực phát hiện oxy.

Đầu đo oxy cấu tạo từ hai điện cực có khả năng phân cực: một catot bằng platin và một anot bằng bạc phủ clorua bạc. Cả hai điện cực được đặt vào chất điện phân là clorua kali (KCl). Hệ thống điện cực này được ngăn cách với môi trường nghiên cứu bằng một màng cho oxy thấm qua. Dưới tác dụng của điện áp phân cực 650 mV đặt vào giữa hai điện cực, oxy khuếch tán qua màng sẽ bị khử tại catot theo phản ứng:

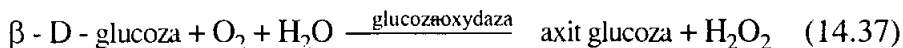


Dòng điện chạy giữa hai điện cực do phản ứng điện hóa trong trường hợp này tỷ lệ trực tiếp với lượng oxy bị khử và do vậy tỷ lệ với hàm lượng oxy trong dung dịch. Dòng điện được đo sau khi đã khuếch đại và được chỉ thị trực tiếp bằng số hoặc biểu diễn dưới dạng nồng độ oxy trong chất khí (ppm) hay áp suất riêng phần của oxy.

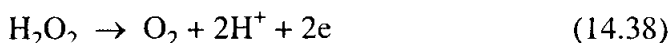
14.2.3. Điện cực enzym

Các điện cực enzym được chế tạo dưới dạng một màng enzym. Một mặt của màng tiếp xúc với môi trường nghiên cứu, mặt kia tiếp xúc với buồng đo.

Màng của điện cực enzym để đo hàm lượng glucoza là vật chứa glucoza oxydaza. Sự có mặt của glucoza oxydaza làm cho glucoza cần đo bị oxy hóa:



Buồng đo dòng điện gồm hai điện cực có khả năng phân cực, một catot bạc phủ clorua bạc và một anot platin tiếp xúc với màng, cả hai đều được nhúng vào trong một chất điện phân đậm có pha thêm clorua kali. Điện áp phân cực được đặt vào giữa hai điện cực. Dưới tác động của điện áp phân cực này, nước oxy già được giải phóng ra sẽ bị oxy hóa ở mặt phân cách giữa anot và màng theo phản ứng:



Dòng điện thu được sẽ tỷ lệ trực tiếp với lượng nước oxy già bị oxy hóa, và do vậy nó cũng tỷ lệ với hàm lượng glucoza trong môi trường nghiên cứu.

Phạm vi đo nồng độ glucoza nằm trong khoảng từ 10^{-3} đến 10^{-7} M. Trong dải đo này đáp ứng của cảm biến là tuyến tính với độ nhạy cỡ 1,5 $\mu\text{A}/\text{milimol}/\text{lit}$ glucoza. Thời gian đáp ứng nằm trong khoảng $30 \div 45$ s.

14.3. Cảm biến đo độ dẫn

Đối với cảm biến loại này người ta đặt điện thế hoặc cho dòng xoay chiều chạy qua giữa hai điện cực không bị ăn mòn đặt trong cấu trúc đo. Việc áp dụng dòng xoay chiều cho phép hạn chế các sai số gây nên bởi hiện tượng phân cực các điện cực do kết quả của các phản ứng xảy ra trên điện cực. Điện trở hoặc độ dẫn của môi trường nghiên cứu xác định bằng cách đo điện thế (nếu cho dòng xoay chiều chạy trong mạch) hoặc đo dòng (nếu đặt điện thế xoay chiều giữa hai điện cực).

14.3.1. Đo độ dẫn của chất điện phân

Độ dẫn điện G của một vật (đơn vị là simen - S) là nghịch đảo của điện trở và được xác định bởi biểu thức:

$$G = \gamma \cdot (S/\ell) \quad (14.39)$$

trong đó S là diện tích mặt cắt ngang (cm^2) và l là chiều dài của vật (cm), hằng số γ đặc trưng cho vật liệu gọi là độ dẫn và được đo bằng đơn vị S.cm^{-1} . Việc đo độ dẫn điện của một chất điện phân được thực hiện bằng cách nhúng vào trong dung dịch này một cấu trúc bao gồm hai điện cực có diện tích bề mặt S và cách nhau một khoảng l đã biết.

Cấu trúc đo được chuẩn bằng cách đo độ dẫn điện G_e của một chất điện phân đã biết trước độ dẫn γ_e của nó:

$$k = S/l = G_e/\gamma_e \quad (14.40)$$

trong đó k là hằng số của độ dẫn của cấu trúc đo. Như vậy, đo độ dẫn điện G của một chất điện phân sẽ dễ dàng xác định được độ dẫn γ của nó:

$$\gamma = k.G \quad (14.41)$$

Việc đo đạc không thể tiến hành với dòng điện một chiều, bởi vì nó gây nên hiện tượng phân cực các điện cực và sự điện phân làm thay đổi điện trở của nó. Chính vì vậy phải đo bằng dòng xoay chiều với tần số đủ lớn để loại trừ các hiệu ứng gây nhiễu. Sử dụng những máy đo độ dẫn hiện đại có thể chọn tần số đo tốt nhất (từ 50 Hz đến nhiều kHz), vận hành theo giá trị thực tế của độ dẫn, để dung hòa giữa hiệu ứng phân cực của các điện cực (phân cực càng mạnh khi dung dịch càng dẫn điện tốt và tần số càng thấp) và hiệu ứng của các điện dung ký sinh do các dây dẫn và cấu trúc gây nên (hiệu ứng này càng mạnh khi tần số càng cao). Trong mạch tương đương của hệ đo, sự phân cực được biểu diễn bằng một trở kháng mắc nối tiếp với điện cực, và các điện dung ký sinh tương đương với một trở kháng song song với điện cực.

Các dải tần số áp dụng cho dung dịch đo có độ dẫn khác nhau như sau:

- Dung dịch dẫn điện yếu, độ dẫn nhỏ hơn vài microsimen: tần số thấp trong phạm vi $50 \div 62,5$ Hz;
- Dung dịch dẫn điện tốt, độ dẫn lớn hơn vài milisimen: tần số cao trong phạm vi $4 \div 16$ kHz;
- Dung dịch dẫn điện trung bình, sử dụng tần số nằm trong khoảng $10^2 \div 10^3$ Hz;

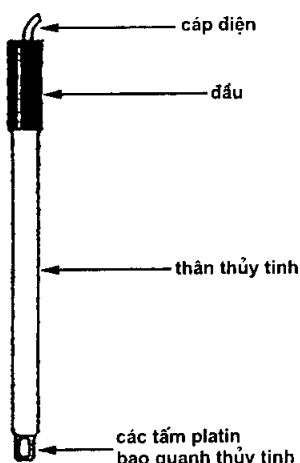
Độ dẫn của chất điện phân phụ thuộc vào nhiệt độ. Mối quan hệ này được biểu diễn bởi biểu thức:

$$\gamma = \gamma_{25} \{ 1 + \alpha_{25}(T - 25) \} \quad (14.42)$$

trong đó α_{25} là hệ số thay đổi nhiệt của độ dẫn xác định theo độ dẫn ở 25 °C và T là nhiệt độ (°C).

14.3.2. Các loại cảm biến đo độ dẫn

Cảm biến đo độ dẫn dùng trong phòng thí nghiệm gồm một thân chính bằng thủy tinh có hai tấm hoặc hai vòng platin (h. 14.8). Trên bề mặt của hai vòng platin có phủ lớp platin dạng vân nhánh cây (bằng phương pháp điện phân) để tạo bề mặt xốp. Tác dụng của lớp platin xốp là để tránh hiện tượng phân cực điện phân (thường xảy ra trên các bề mặt đều đặn và cân đối). Thân điện cực có một đầu làm bằng chất cách điện, bên trong đầu là dây cáp dẫn điện.



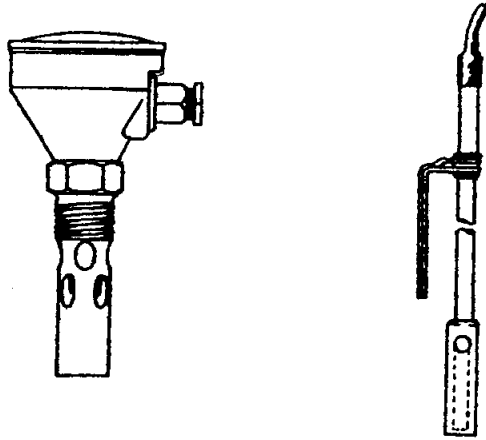
Hình 14.8: Đầu đo độ dẫn dùng trong phòng thí nghiệm.

Các đầu đo độ dẫn thông dụng thường khác nhau chủ yếu ở kích thước phần thân điện cực và kích thước các tấm hoặc các vòng platin.

Các đầu đo độ dẫn dùng trong công nghiệp tồn tại ở nhiều kích thước và hình dạng khác nhau: đầu đo điện cực hình vòng đồng tâm, điện cực dạng đường thẳng, điện cực phẳng song song... (h. 14.9).

Phụ thuộc vào dạng sử dụng, người ta chế tạo các đầu đo dùng cho dòng chảy, đầu đo vít trên các đường ống dẫn, hoặc đầu đo dùng cho các thùng chứa.

Để đo độ dẫn nhỏ, nên sử dụng các đầu đo có hằng số k lớn ($k \sim 100 \text{ cm}$) để cho giá trị của độ dẫn điện G đủ lớn. Các đầu đo này thường gồm hai điện



Hình 14.9: Các đầu đo độ dẫn dùng trong công nghiệp.

cực dạng vòng đồng tâm bằng thép không rỉ, điện cực ngoài đóng vai trò vỏ bọc dẫn điện.

Để đo độ dẫn lớn, người ta sử dụng các đầu đo có hằng số k nhỏ để giá trị của độ dẫn điện G đo được không quá lớn. Các đầu đo này sử dụng để đo độ dẫn của dung dịch axit hoặc kiềm đậm đặc. Đây thường là các đầu đo dùng các điện cực thẳng bằng vật liệu không bị ăn mòn như than, vàng, platin, paladi v.v...

Các điện cực công nghiệp thường làm bằng thép không rỉ hoặc cacbon. Trong những môi trường ăn mòn mạnh phải sử dụng các điện cực bằng vàng, platin hay paladi.

14.4. Cảm biến ISFET

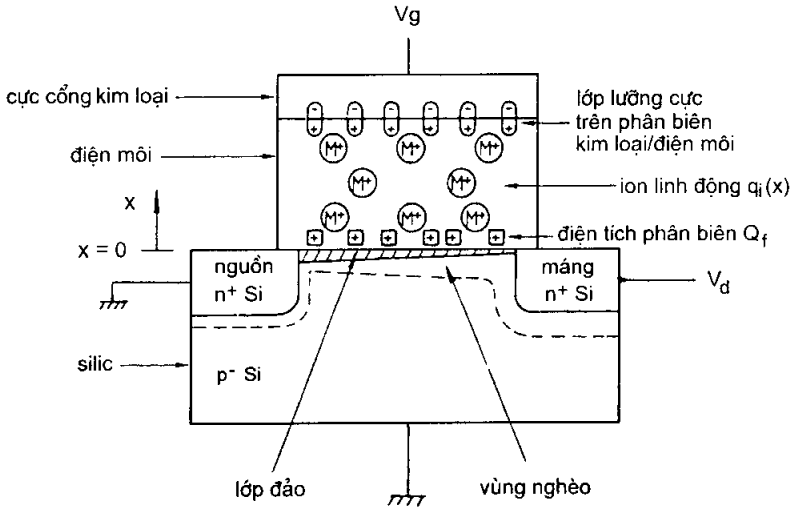
Hiệu ứng trường bề mặt là sự biến điệu mép dải năng lượng làm thay đổi nồng độ hạt dẫn trên bề mặt chất bán dẫn khi có điện áp đặt trên bề mặt đó. Hiện tượng này đã được ứng dụng để chế tạo các tranzito hiệu ứng trường - FET (Field Effect Transistor).

Cảm biến hiệu ứng trường đầu tiên là cảm biến chọn lọc ion trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường (ISFET) ra đời vào năm 1970. Từ đó đến nay phạm vi ứng dụng của cảm biến loại này ngày càng mở rộng. Cảm biến ion trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường đã trở thành một hướng phát triển quan trọng của lĩnh vực cảm biến điện hóa.

14.4.1. Các loại cảm biến trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường

14.4.1.1. Cấu trúc tranzito hiệu ứng trường

Cấu trúc của một tranzito hiệu ứng trường điều khiển bằng cực cổng kênh n biểu diễn trên hình 14.10.



Hình 14.10: Cấu trúc tranzito hiệu ứng trường điều khiển bằng cực cổng kênh n.

Khi điện áp đặt trên cực cổng lớn hơn điện áp ngưỡng, bề mặt của bán dẫn silic bị đảo mạnh và xuất hiện độ dẫn kênh giữa nguồn và máng. Biểu thức của điện áp ngưỡng V_t có dạng:

$$V_t = \phi_{ms} - \frac{(Q_f + Q_D)}{C} + 2\phi_f - \frac{Q_i}{C} - \frac{N_p}{\epsilon_0} \quad (14.43)$$

$$Q_i = \frac{1}{\alpha} \int_0^d x q_i(x) dx \quad (14.44)$$

trong đó ϕ_{ms} là hiệu công thoát giữa kim loại làm cực cổng và silic, d và C là bề dày và điện dung trên một đơn vị diện tích của chất điện môi, Q_f là điện tích (dương) trên mặt phân cách Si/SiO₂, Q_D là điện tích cực đại trong vùng

nghèo, và ϕ_f là chênh lệch thế giữa mức Fermi và mức thuận trong silic. Q_i là điện tích hiệu dụng trên bề mặt do phân bố điện tích ion $q_i(x)$ trong điện môi gây nên. Số hạng cuối cùng trong biểu thức (14.43) liên quan đến lớp lưỡng cực trên phân biên giữa cực cổng và lớp điện môi: N là nồng độ các lưỡng cực có momen bằng p trên một đơn vị diện tích. Biểu thức của dòng máng I_d được viết cho trường hợp không bão hòa:

$$I_d = \mu C \frac{W}{L} [(V_g - V_t)V_d - \frac{1}{2}V_d^2] \quad (14.45)$$

và trường hợp bão hòa:

$$I_d = \mu C \frac{W}{2L} (V_g - V_t)^2 \quad (14.46)$$

trong đó W và L là chiều rộng và chiều dài kênh, μ là độ linh động của điện tử trong kênh. Có một số biểu thức đơn giản hóa thường được sử dụng trong đó bỏ qua điện trở nối tiếp do có hiện tượng khuếch tán nguồn-máng thường gặp trong cấu trúc ISFET. Các đặc trưng của tranzito hiệu ứng trường không tuyến tính và phụ thuộc vào nhiệt độ. Bằng kỹ thuật đo vi sai có thể tuyến tính hóa các đặc trưng và ổn định nhiệt đầu ra cho các linh kiện sử dụng trong cảm biến trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường.

14.4.1.2. Hiệu ứng mặt phân biên và hiệu ứng khối

Từ những điều trình bày trên đây có thể nhận thấy rằng một tranzito hiệu ứng trường kết hợp màng nhạy hóa học tiếp xúc với lớp điện môi sẽ phản ứng với những thay đổi của C , ϕ_{ms} , Q_i , N hoặc p của lớp tổ hợp này. Trong trường hợp vật liệu nhạy cảm tiếp xúc với dung dịch thay thế cho tiếp xúc kim loại cực cửa, cấu trúc nhận được sẽ nhạy với mọi sự thay đổi thế giữa vật liệu và dung dịch. Trong số các đại lượng kể trên, C và Q_i thuộc về các tính chất khối, ϕ_{ms} , N và p là các tính chất có thể bị thay đổi bởi các hiệu ứng bề mặt. Những chênh lệch thế giữa màng và dung dịch trước hết là các hiệu ứng bề mặt. Các loại cảm biến hiệu ứng trường có nguyên lý hoạt động dựa vào một hoặc một số trong những hiệu ứng này. Trong phần lớn các trường hợp, chỉ có sự thay đổi của một thông số là yếu tố cần tìm, và các thay đổi khác là hiệu ứng thứ cấp thường được mô tả như là sự không ổn định của thực nghiệm.

Các ISFET lý tưởng có nguyên lý hoạt động dựa vào các hiệu ứng bề mặt: phản ứng đầu tiên là sự khác nhau về thế điện hóa của một ion giữa dung dịch và vật liệu nhạy cảm, với thế phân biên và khuếch tán được đặt trên các lớp bề mặt của vật liệu. Để có đáp ứng nhanh, các lớp bề mặt này phải rất mỏng.

Các tranzito hiệu ứng trường nhạy khí dựa trên các hiệu ứng bề mặt và hiệu ứng khối. Trong các linh kiện nhạy hydro có cực cổng là lớp paladi (có bề dày lớn), đáp ứng sinh ra do phân ly của hydro hay của chất khí chứa hydro hấp thụ trên bề mặt xúc tác của cổng kéo theo sự khuếch tán nguyên tử hydro xuyên qua thể tích, linh kiện này hoạt động giống như một bộ lọc. Khi đó nguyên tử hydro được phát hiện trên mặt phân biên kim loại - điện môi hoặc từ sự thay đổi hiệu công thoát của kim loại (sự hình thành lớp lưỡng cực) hay thế phân biên. Trong một số linh kiện khác dựa trên hiệu ứng bề mặt, lớp lưỡng cực hình thành do hấp thụ khí trên bề mặt cực cổng. Cả hai cơ chế nói trên đều được ứng dụng trong các tranzito hiệu ứng trường có cực cổng xốp nhạy với amoniac và một số chất khí khác.

14.4.1.3. Tranzito hiệu ứng trường chọn lọc ion (ISFET)

Điện cực chọn lọc ion và cấu trúc ISFET:

Nguyên lý đo sử dụng điện cực chọn lọc ion biểu diễn trên hình 14.11. Điện cực chọn lọc ion có cấu tạo gồm một màng chọn lọc ion với một tiếp xúc bên trong, hoặc một dung dịch và điện cực so sánh, hoặc trong trường hợp đặc biệt: một tiếp xúc rắn. Thế phân biên E_i được thiết lập do cân bằng giữa dung dịch nghiên cứu và màng chọn lọc ion. Thế này được đo tương đối so với thế E_{ref} của điện cực so sánh trong dung dịch khảo sát. Thế đo được của mạch sẽ là:

$$E_i = E_0 + E_{in} - E_{ref} \quad (14.47)$$

E_{ref} và thế của tiếp xúc trong E_{in} coi như không đổi. Để cân bằng một ion I có điện tích $+z_i$ qua phân biên, E_i được tính từ phương trình Nernst:

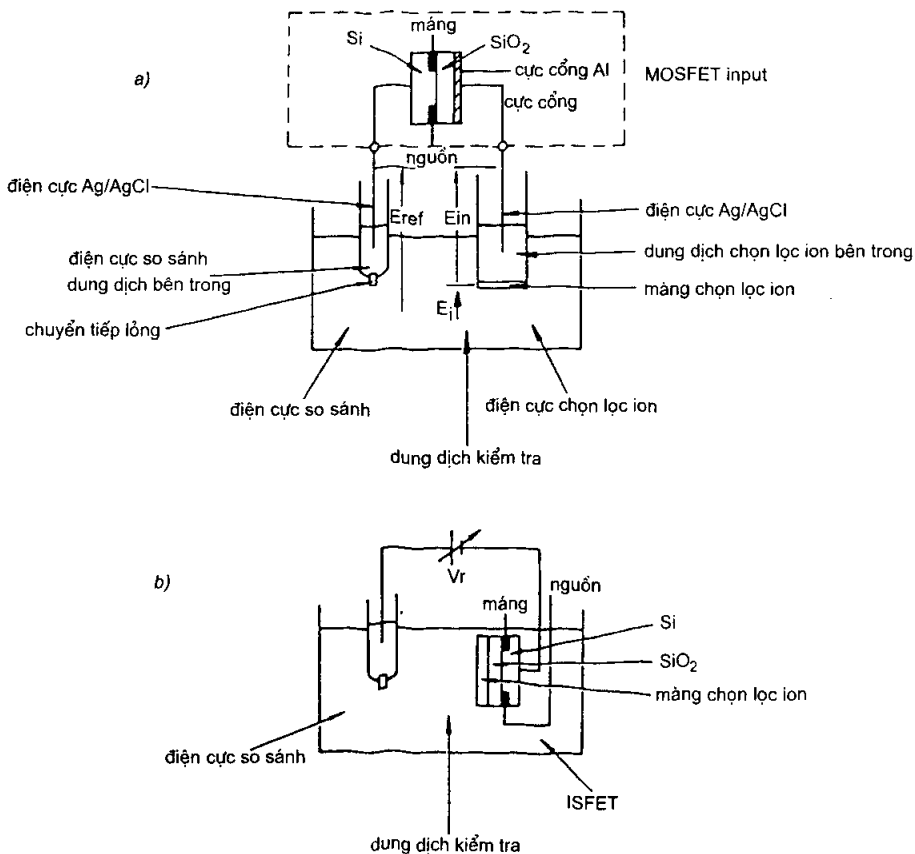
$$E_i = E_0 + 2,303 \frac{RT}{z_i} \log \frac{a_i(s)}{a_i(m)} \quad (14.48)$$

trong đó E_0 là số hạng không đổi xuất hiện do có sự khác nhau về thế hóa của ion I trong hai pha, $a_i(m)$ và $a_i(s)$ là hoạt độ của ion I trong màng và trong dung dịch, R là hằng số của chất khí lý tưởng, F là số Faraday.

Đối với màng lý tưởng tuân theo định luật Nernst, $a_i(m)$ là hằng số, khi đó:

$$E_i = E'_0 + k \log a_i(s) \quad (14.49)$$

trong đó $k = 2,303RT/z_iF$ tương đương với sự thay đổi của hoạt độ bằng $59,2/z_i$ mV/decade ở 25°C .



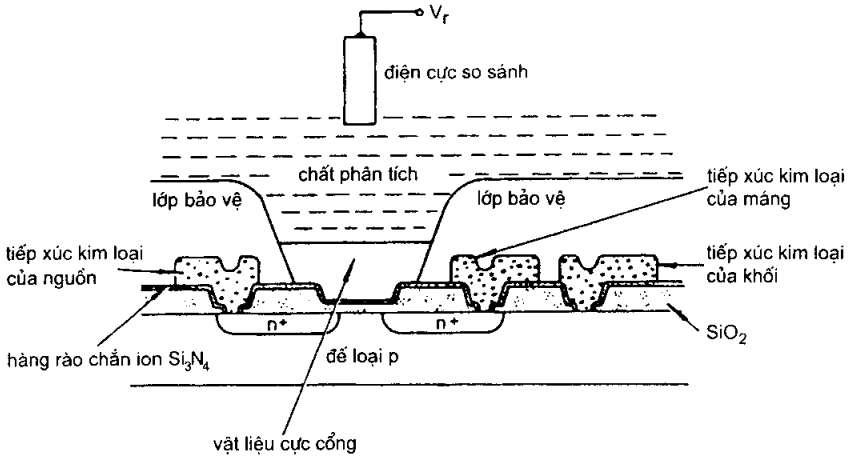
Hình 14.11: a) Điện cực chọn lọc ion kết hợp với MOSFET;
b) Cấu trúc ISFET tương ứng.

Hoạt độ a_i trong dung dịch liên quan đến nồng độ thông qua hệ số hoạt độ γ_i :

$$a_i = \gamma_i m_i \quad (14.50)$$

Hệ số γ_i là hàm của nồng độ dung dịch.

Các điện cực chọn lọc ion thường có trở kháng tương đối lớn ($>10 \text{ M}\Omega$), chúng được ghép kết hợp với các MOSFET (tranzito hiệu ứng trường trên cơ sở cấu trúc kim loại-oxit-bán dẫn) đóng vai trò như tầng đệm khuếch đại đầu vào. Tổ hợp này là nguồn gốc trực tiếp dẫn đến sự ra đời của ISFET - cảm biến chọn lọc ion trên cơ sở tranzito hiệu ứng trường. Trên hình 14.11b biểu diễn chuỗi ISFET là tổ hợp của điện cực chọn lọc và MOSFET. Trên hình 14.12 biểu diễn cấu trúc ISFET trong đó cổng MOSFET được thay thế bằng tổ hợp màng chọn lọc ion, dung dịch và điện cực so sánh. Cấu trúc điện môi kép bao gồm lớp Si_3N_4 (hoạt động như hàng rào ngăn cản chuyển động của ion) thường được sử dụng để ngăn cản sự nhiễm bẩn ion của SiO_2 .



Hình 14.12: Cấu trúc ISFET sử dụng lớp điện môi kép $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$

Trong khi làm việc, điện thế V_r được đặt trên điện cực so sánh. Nếu giữ V_r cố định thì mọi sự thay đổi thế E_i của màng sẽ làm biến điệu điện thế hiệu dụng của cổng và do vậy làm thay đổi I_d . Biểu thức của điện áp ngưỡng được viết dưới dạng:

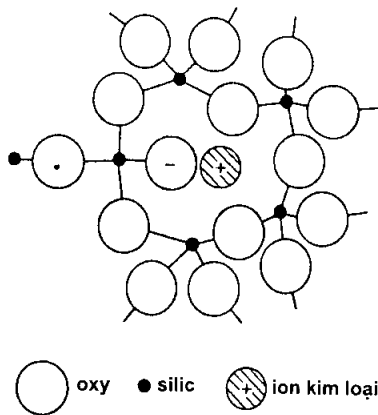
$$V_t = E_{\text{ref}} - E_o' - k \log a_i(s) - \frac{\Phi_{\text{si}}}{e} - \frac{(Q_f + Q_D)}{C} + 2\Phi_f - \frac{Q_i}{C} \quad (14.51)$$

trong đó ϕ_{si} là công thoát của silic.

Vật liệu làm màng chọn lọc ion:

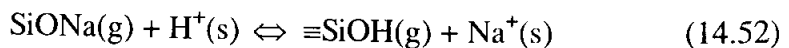
Yêu cầu đối với điện cực chọn lọc ion là phải nhanh chóng thiết lập cân bằng ion qua phân biên dung dịch-màng nhạy và đảm bảo sự phụ thuộc nồng độ của thế phân biên như trong biểu thức 14.49. Ngoài ra nó phải là một vật dẫn điện tốt. Các điện cực chọn lọc ion được chia thành ba loại: thủy tinh, muối vô cơ ít hòa tan, màng hữu cơ chứa các tác nhân ion phức.

Điện cực thủy tinh được sử dụng rộng rãi để đo độ pH. Ngoài ra chúng cũng được dùng để phát hiện các ion kim loại hóa trị một (như Ag^+ , NH_4^+), các cation nguyên tố đất hiếm hoặc kim loại chuyển tiếp (Cu^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+}) và các anion nitrat. Phần lớn các điện cực thủy tinh là silicat. Chúng gồm các mạng ngẫu nhiên của nguyên tử silic liên kết gần giống kiểu tứ diện bằng các cầu oxy Si-O-Si dễ bị bẻ gãy bởi các nguyên tử kiềm hóa trị thấp hơn trong nhóm $\equiv SiO(-)M(+)$ (h. 14.13). Các ion kim loại kiềm liên kết yếu với các nguyên tử oxy không kết thành cầu tạo nên độ dẫn ion. Chúng có thể



Hình 14.13: Sơ đồ cấu trúc hai chiều của thủy tinh silicat.

trao đổi với các ion khác trong dung dịch (s), trường hợp điển hình là ion H^+ thâm nhập vào thủy tinh silicat natri (g):

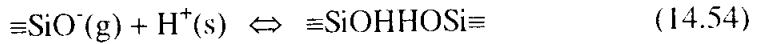


và mạch có thể bị thủy phân:



Cả hai quá trình này đều tham gia vào sự hình thành lớp lọc và thủy hợp bề

mặt chứa các vị trí $\equiv\text{SiO}^-$ để kết hợp với ion dương trong dung dịch:



Thủy tinh silicat kiềm có tính chọn lọc pH cao vì các vị trí $\equiv\text{SiO}^-$ trong phản ứng (14.54) rất nhỏ dễ liên kết với các ion H^+ nhỏ. Các lớp thủy hợp hoạt động giống như hàng rào ngăn cản khuếch tán làm tăng thời gian đáp ứng của cảm biến. Trên thực tế, các thủy tinh pH có chứa thành phần để hạn chế thủy phân, thí dụ các alkalin của kim loại đất hiếm như canxi hay bari, chúng hình thành các nhóm cầu $\equiv\text{Si-O-Ca-O-Si}\equiv$ trở với các phản ứng (14.52) và (14.53).

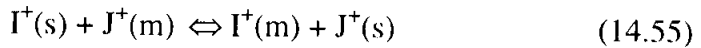
Các màng thủy tinh ứng dụng cho ISFET được chế tạo bằng nhiều kỹ thuật khác nhau: lắng đọng hóa học từ pha hơi, polyme hóa bằng nhúng phủ trong hỗn hợp alkoxid. Cả hai quá trình đều thực hiện ở nhiệt độ cao cho nên phải tiến hành trước khi làm tiếp xúc kim loại.

Các vật liệu vô cơ cách điện như SiO_2 , Si_3N_4 , Ta_2O_5 cũng được ứng dụng để làm màng chọn lọc ion. Khi sử dụng kết hợp các màng này với ISFET để làm cảm biến pH, chúng cho phép giảm kích thước linh kiện và giảm thời gian đáp ứng xuống rất nhiều. Oxit bề mặt làm hình thành các vị trí liên kết proton như phương trình 14.55 và bị hydrat hóa theo 14.54. Chiều sâu thủy hợp phụ thuộc vào loại vật liệu: có thể bỏ qua trong trường hợp Ta_2O_5 và Al_2O_3 nhưng có độ sâu đáng kể trong trường hợp SiO_2 và bề mặt SiO_2 trên Si_3N_4 . Thử nghiệm cho thấy phản ứng của các oxit này với pH là lý tưởng.

Các muối vô cơ loại MX phản ứng với cả hai loại ion M^+ và X^- bằng cách trao đổi trực tiếp giữa dung dịch và các vị trí trong vật rắn. Thí dụ, điện cực flo của đơn tinh thể LaF_3 hoặc điện cực Ag/AgCl đối với các ion Ag^+ hoặc Cl^- . Khả năng ứng dụng các màng điện môi trong cảm biến ISFET thể hiện ở chỗ, trên thực tế bất kỳ muối không hòa tan nào đều có thể sử dụng nếu chúng trao đổi ion trên bề mặt với dung dịch và dễ chế tạo chúng dưới dạng màng mỏng bằng một kỹ thuật thông dụng.

Trao đổi ion của quá trình cân bằng:

Sự cân bằng của màng khi có mặt một ion được biểu diễn bằng phương trình (14.48). Hai cation hóa trị một I^+ và J^+ có mặt trong dung dịch và trong màng hoặc chỉ có mặt trong màng sẽ trao đổi cân bằng ion để đảm bảo cho hệ trung hòa về điện (bất luận chúng có phải là thành phần của màng hay không):



$$K_{ij} = a_i(m)a_j(s)/a_i(s)a_j(m) \quad (14.56)$$

với s là ký hiệu cho dung dịch và m ký hiệu cho màng, a_i và a_j là hoạt độ, k_{ij} là hằng số cân bằng. Trong chất trao đổi ion, nơi hai ion tranh nhau một loại vị trí, thực nghiệm đã chứng tỏ rằng hoạt độ có liên quan đến tỷ lệ mol X_i , X_j của các ion theo định luật:

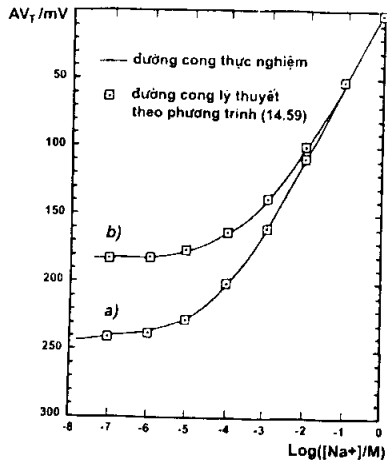
$$a_i(m) = [X_i(m)]^{n_{ij}}, \quad a_j(m) = [X_j(m)]^{n_{ij}} \quad (14.57)$$

với
$$X_i = C_i/C_0, \quad X_j = C_j/C_0, \quad C_i + C_j = C_0 \quad (14.58)$$

trong đó C_i và C_j là nồng độ các ion I^+ và J^+ trong màng, n_{ij} là thông số đặc trưng của các ion I^+ và J^+ . Kết hợp các biểu thức (14.48), (14.56) và (14.57) cho ta phương trình Einsicman:

$$E_{ij} = E_0 + kn_{ij} + \log[a_i^{1/n_{ij}} + (K_{ij}a_j)^{1/n_{ij}}] \quad (14.59)$$

Phương trình này mô tả thế phân biên giữa màng và dung dịch. Sự khác nhau giữa hoạt độ của I^+ và J^+ ở bề mặt và trong thể tích dẫn đến thế khuếch tán. Thực nghiệm đã chứng tỏ rằng, thế này chỉ làm thay đổi K_{ij} trong (14.59). Trong phần lớn các trường hợp K_{ij} có thể được xem như thông số thực nghiệm mô tả đặc tính của ISFET hay ISE. Hình 14.14 biểu diễn phản ứng



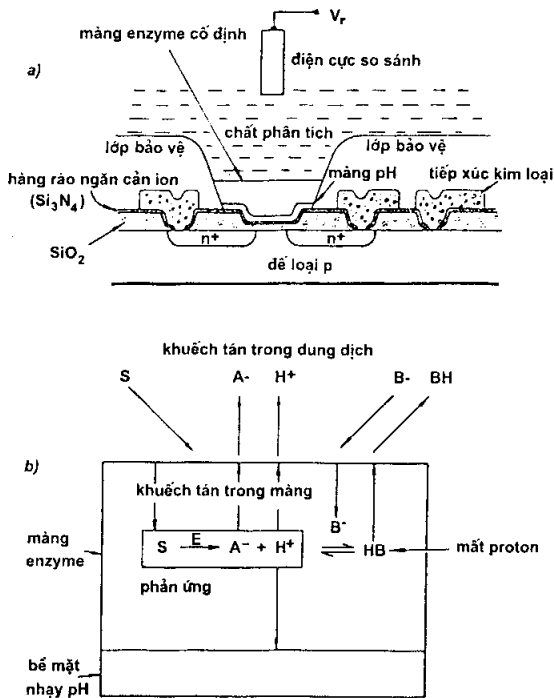
Hình 14.14: Đáp ứng của cảm biến ISFET xác định ion Na^+ và K^+ :
a) ion Na^+ ; b) ion Na^+ + 0,1 MK^+

đối với ion Na^+ và K^+ của ISFET sử dụng màng thủy tinh pha tạp Na (ký hiệu NAS11-18) chế tạo bằng phương pháp phun xạ catot.

14.4.2. Các cảm biến trên cơ sở ISFET

Các cảm biến điện hóa trên cơ sở ISFET được ứng dụng để phát hiện hydro (dùng cực cổng là paladi), khí amoniac (dùng cực cổng xốp) hoặc để xác định độ ẩm. Ngoài ra chúng còn được sử dụng để xác định một cách không trực tiếp các chất phân tích không có tính ion thông qua sản phẩm của các phản ứng hóa học xảy ra trong vùng lân cận của cảm biến.

Trên hình 14.15a biểu diễn loại ISFET cải tiến. Đó là một ISFET được phủ màng có pha chất enzym, gọi là ENFET. Nó cảm nhận sự thay đổi của độ pH



Hình 14.15: Cảm biến ENFET: a) sơ đồ cấu tạo, b) khuếch tán và các quá trình phản ứng.

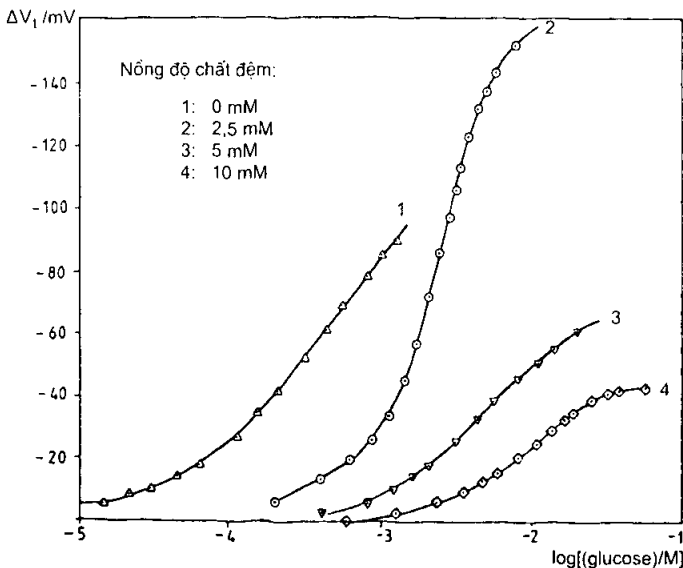
do phản ứng giữa enzym và chất nền. Cảm biến loại này thường được sử dụng kết hợp để đo độ pH của dung dịch.

Một trong những ứng dụng quan trọng là xác định lượng đường trong phản ứng enzym glucoza oxidaza (xem lại biểu thức 14.37 mục 14.2.3).

Sự thay đổi của độ pH trên bề mặt nhạy cảm phụ thuộc vào tốc độ phản ứng và quá trình khuếch tán (h. 14.15b). Khi chất nền (glucoza) khuếch tán vào màng, nó phản ứng để tạo ra các proton: tốc độ của phản ứng càng lớn (so với tốc độ khuếch tán chất nền) thì tỷ lệ chất nền bị chuyển thể trước khi đến được bề mặt nhạy cảm càng cao và tín hiệu đo càng lớn. Cạnh tranh với quá trình này là sự mất proton do khuếch tán vào thể tích dung dịch và do kết hợp với các hạt đệm. Tốc độ mất proton phụ thuộc vào tốc độ khuếch tán proton và nồng độ cũng như vào tốc độ khuếch tán chất đệm.

Các cảm biến thường được chế tạo với bề dày màng thay đổi từ 10 đến 200 μm . Các màng dày cho tín hiệu lớn và thời gian sống cũng dài hơn, bởi vì đến một dung lượng nào đó màng sẽ mất hoạt tính do không còn đủ lượng enzym hoặc mất hoạt tính xúc tác. Các màng mỏng cho đáp ứng nhanh với tín hiệu và thời gian sống nhỏ hơn.

Đáp ứng của ISFET phụ thuộc rất mạnh vào độ pH trong thể tích dung dịch. Sự có mặt của các hạt đệm sẽ làm giảm sự thay đổi pH sinh ra trong phản ứng enzym. Trên hình 14.16 biểu diễn đáp ứng của cảm biến ENFET phụ thuộc vào nồng độ glucoza.



Hình 14.16: Đáp ứng của ENFET đối với nồng độ glucoza trong phostphat.

Các lĩnh vực ứng dụng của cảm biến ISFET rất rộng rãi. Ngoài glucoza, các cảm biến ISFET sử dụng các màng nhạy thích hợp còn được dùng để đo nồng độ pinicilin, acetylcholin và urê.

CHƯƠNG 15

CẢM BIẾN THÀNH PHẦN KHÍ

Các cảm biến đo nồng độ của một thành phần trong hỗn hợp khí phát triển rất mạnh, đặc biệt liên quan đến việc kiểm tra nhiên liệu với mục đích tiết kiệm năng lượng và giảm ô nhiễm môi trường. Rất nhiều cảm biến thành phần khí loại mới được nghiên cứu và chế tạo để phát hiện các phân tử khí tiêu thụ hoặc sản sinh ra trong quá trình oxy hóa nhiên liệu như O_2 , CO , CO_2 , H_2O , SO_2 , SO_3 , NO_x , CH_x , ...

Trong số các cảm biến thành phần khí, cảm biến oxy chiếm vị trí đặc biệt quan trọng. Việc phân tích chính xác và nhanh chóng thành phần oxy đã cho phép triển khai ứng dụng rộng rãi các cảm biến oxy, đặc biệt các cảm biến dùng chất điện phân rắn, trong các lĩnh vực khác nhau như công nghiệp hóa chất, luyện kim, công nghiệp chế biến thực phẩm, lĩnh vực hóa sinh, kiểm tra môi trường làm việc trong các phòng thí nghiệm... Các cảm biến này dành được vị trí ưu tiên đáng kể bởi vì sự thành công về mặt kỹ thuật và thương mại của chúng có vai trò khích lệ trong nghiên cứu các cảm biến mới, đặc biệt cho các loại khí như Cl_2 , SO_2 , HCl , H_2S , H_2 , ...

Hoạt động của các cảm biến đo thành phần khí phải đáp ứng đầy đủ các yêu cầu sau đây:

- Khả năng sử dụng để đo liên tục (hay gần như liên tục) trực tiếp trong môi trường khí cần phân tích hoặc đo gián tiếp trên một luồng khí phân nhánh với mục đích thay đổi một số thông số vật lý của nó (như nhiệt độ, áp suất, tốc độ lưu thông, hoặc tránh bụi bẩn...).
- Không có các chất gây phản ứng hóa học.
- Không có sự can thiệp của con người ở từng lần đo (chuẩn bị mẫu hoặc chuẩn phép đo).

Xét trên những chỉ tiêu này, ranh giới giữa cảm biến và máy phân tích trong lĩnh vực phân tích thành phần khí không còn tồn tại nữa.

Các cảm biến thành phần khí có thể phân thành các loại như sau:

- Cảm biến điện hóa dùng chất điện phân rắn,
- Cảm biến điện,
- Cảm biến xúc tác,
- Cảm biến quang,
- Cảm biến thuận từ.

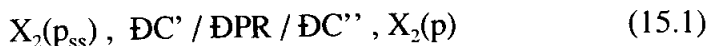
15.1. Cảm biến dùng chất điện phân rắn

Việc sử dụng chất điện phân rắn trong một cấu trúc điện hóa để đo thành phần khí đã bắt đầu từ đầu thế kỷ 20, song những phát minh quan trọng trong lĩnh vực phân tích khí chỉ xuất hiện vào cuối những năm 50 và phải đợi đến thập kỷ 70 mới ra đời các cảm biến khí dưới dạng sản phẩm công nghiệp. Đó là các cảm biến dùng để đo áp suất riêng phần của oxy trong kim loại nóng chảy được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp luyện kim. Trong những năm cuối của thế kỷ 20, việc tìm ra các vật liệu mới dẫn điện bằng ion O^{2-} đã mở ra những khả năng đầy triển vọng cho việc nghiên cứu và chế tạo các cảm biến oxy với những tính năng ưu việt hơn.

15.1.1. Nguyên lý vật lý

15.1.1.1. Định luật Nernst

Sơ đồ nguyên lý của cảm biến điện hóa dùng chất điện phân rắn dưới dạng cấu trúc

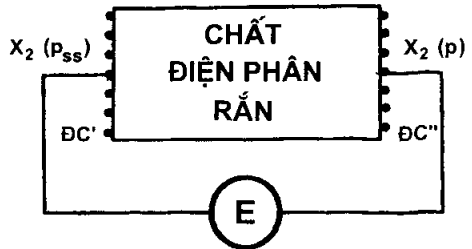


biểu diễn trên hình 15.1.

Trong sơ đồ này:

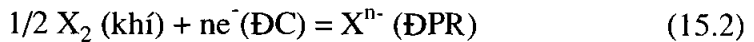
- ĐC' và ĐC'' là hai điện cực dẫn điện bằng điện tử, trơ về hóa học và có cùng bản chất.
- ĐPR (điện phân rắn) là vật liệu không bị thấm thấu bởi chất khí, dẫn điện bằng ion và chứa các ion X^{n-} ;
- X_2 là chất khí phân tích, dưới dạng nguyên chất hoặc hòa tan trong chất lỏng hoặc ở trạng thái cân bằng với hệ khí hóa học, chất lỏng hay chất rắn.

- p và p_{ss} là áp suất của chất khí phân tích ở hai phía của chất điện phân rắn.



Hình 15.1: Sơ đồ nguyên lý của cảm biến dùng chất điện phân rắn.

Ở mỗi điện cực sẽ xảy ra phản ứng dạng:



Trong những điều kiện hoạt động lý tưởng, giữa hai điện cực của cấu trúc này xuất hiện một hiệu điện thế hoặc suất điện động, E_{lt} , tuân theo định luật Nernst:

$$E_{lt} = \frac{RT}{2nF} \ln \frac{p}{p_{ss}} \quad (15.3)$$

trong đó:

- R là hằng số của chất khí lý tưởng ($R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- F là hằng số Faraday (96500 c);
- n là số điện tử trao đổi trong phản ứng điện cực;
- T là nhiệt độ tuyệt đối của cấu trúc.

Sau khi thay các hằng số vào công thức, biểu thức của suất điện động lý thuyết có dạng:

$$E_{lt} = 0,9926 \cdot 10^{-4} \frac{T}{n} \log \frac{p}{p_{ss}} \quad (15.4)$$

Từ biểu thức của E_{lt} , nếu biết nhiệt độ T và áp suất riêng phần p_{ss} ở điện cực so sánh có thể tính được áp suất của chất khí cần đo. Giá trị của E_{lt} nằm trong khoảng vài chục đến hàng trăm milivon.

15.1.1.2. Các thành phần cấu tạo cảm biến

Chất điện phân rắn:

Việc chọn chất điện phân rắn phải đáp ứng một số yêu cầu đôi khi trái ngược nhau. Về mặt lý thuyết, độ dẫn của chất điện phân rắn không bị giới hạn. Tuy nhiên, nó phải đủ lớn để cho trở kháng của cấu trúc không đáng kể so với trở kháng vào của các thiết bị đo: giới hạn trên của điện trở của chất điện phân bằng $\sim 1 \text{ M}\Omega$. Điện trở này phụ thuộc vào bản chất và thành phần của chất điện phân rắn. Nó giảm dần khi nhiệt độ tăng hoặc khi giảm bề dày chất điện phân (thí dụ chất điện phân dạng màng mỏng).

Một đặc trưng cơ bản khác của chất điện phân rắn là độ dẫn điện tử của chúng thường khác không. Định luật Nernst chỉ có thể được áp dụng khi phần đóng góp của độ dẫn điện tử này vào độ dẫn chung của chất điện phân không đáng kể.

Chất điện phân rắn cũng đồng thời phải thỏa mãn các điều kiện không mang đặc tính điện hóa như:

- Tính ổn định hóa - lý (ổn định nhiệt, không có hiện tượng chuyển pha ở trạng thái rắn);
- Tính ổn định cơ học (đặc biệt là độ cứng);
- Hệ số dẫn nở nhiệt tương thích với các thành phần cấu thành cảm biến;
- Trơ về hóa học đối với các chất khí và các vật liệu tiếp xúc khác.

Điện cực so sánh:

Hệ thống so sánh được chọn để đảm bảo duy trì chế độ cân bằng nhiệt động trong quá trình sử dụng. Hệ thống so sánh có thể là một chất khí (nguyên chất hoặc hòa tan trong khí trơ), một hỗn hợp các chất khí hoặc hỗn hợp các chất rắn. Có thể dẫn ra một số thí dụ về hệ so sánh sử dụng trong cảm biến thành phần khí:

- Hỗn hợp khí có thành phần biết trước (O_2 , không khí, $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$, CO/CO_2 , ...);
- Một chất khí hình thành khi phân hủy một hợp chất rắn như

$$\text{MgSO}_4 = \text{MgO} + \text{SO}_3 \quad (15.5)$$
- Một hệ kim loại - hợp chất của kim loại ($\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$, Ni/NiO , Pd/PdO , Ag/AgCl);

- Hệ điện cực so sánh và các ion tan trong dung dịch điện phân. thí dụ trường hợp hệ điện cực Ag/Ag^+ trong đó hoạt độ của các ion bạc bị giới hạn do sulfat bạc hòa tan trong sulfat natri.

Điện cực đo:

Điện cực đo phải là vật dẫn điện tử hoặc ít nhất cũng phải có độ dẫn điện tử đủ lớn. Đương nhiên nó phải trở hóa học đối với chất điện phân và chất khí phân tích. Ngoài ra vật liệu phải có tính chất xúc tác đối với phản ứng điện cực. Tính chất này là yếu tố quan trọng để tăng độ nhạy và giảm thời gian đáp ứng của cảm biến.

Các điện cực đo thường làm bằng platin, đôi khi bằng bạc, và được chế tạo bằng phương pháp bay trong hơi chân không hoặc phún xạ catot.

15.1.2. Các đặc trưng

15.1.2.1. Các đặc trưng đo lường

Các cảm biến dùng chất điện phân rắn để phân tích thành phần khí là các cảm biến tích cực. Trong quá trình cảm biến làm việc ở chế độ phân luồng chỉ cần kiểm tra nhiệt độ của cảm biến. Mối quan hệ cơ bản của các cảm biến loại này là định luật Nernst nhận được từ lý thuyết. Bởi vậy, một khi đã biết trước một cách chính xác giá trị của áp suất so sánh thì không cần phải chuẩn cảm biến.

Cảm biến cho trực tiếp giá trị của điện áp cỡ hàng trăm milivôn. Việc đo điện áp này phải được thực hiện một cách chính xác (tới $\pm 0,1$ mV), khi đó có thể sử dụng cảm biến trực tiếp trong các hệ thống điều chỉnh tự động.

Cảm biến có suất điện động thay đổi theo logarit của áp suất của chất khí cần phân tích. Sai số khi đo suất điện động sẽ dẫn đến sai số của áp suất không phụ thuộc vào giá trị của áp suất.

Thời gian đáp ứng của cảm biến phụ thuộc vào tính chất xúc tác của vật liệu điện cực và của chất điện phân, vào thành phần của chất khí, nhiệt độ và đôi khi vào hình học của cấu trúc cảm biến. Trong trường hợp cảm biến oxy, thời gian đáp ứng cỡ vài giây nếu áp suất riêng phần của oxy trong khí phân tích lớn hơn 10^{-5} atm và cỡ vài phút nếu áp suất oxy nhỏ hơn 10^{-6} atm. Trong chân không thời gian đáp ứng của cảm biến nhỏ hơn nhiều so với trường hợp cũng áp suất riêng phần đó hòa tan trong khí trơ.

Suất điện động của cảm biến thay đổi tuyến tính theo nhiệt độ, bởi vậy nhiệt độ phải ổn định và được đo với độ chính xác không kém hơn $\pm 1^\circ\text{C}$.

15.1.2.2. Các đặc trưng công nghệ

Ở nhiệt độ sử dụng thông thường, cảm biến có trở kháng đáng kể. Bởi vậy khi đo suất điện động của cảm biến nhất thiết phải dùng các milivôn kế có trở kháng vào lớn ($10^{10} - 10^{12} \Omega$).

Các chất điện phân rắn rất nhạy cảm với va đập. Việc giảm thiểu kích thước của cảm biến cho phép loại bỏ nhược điểm đó của chất điện phân.

Các chất điện phân rắn quen dùng chỉ có độ dẫn lớn khi chúng ở nhiệt độ cao, cho nên cảm biến thường có nhiệt độ làm việc lớn hơn 500°C . Ở nhiệt độ này dễ dàng xảy ra các phản ứng oxy hóa, bởi vậy không thể đưa oxy vào nếu có mặt các chất khí khử. Tuy nhiên, các cảm biến oxy vẫn được dùng để điều chỉnh các động cơ nổ, mặc dù các khí thoát ra không ở trạng thái cân bằng. Trong những điều kiện như vậy, vẫn tồn tại mối quan hệ thực nghiệm tương đối phức tạp giữa suất điện động của cảm biến và thành phần chất khí thoát ra cho phép hiệu chỉnh động cơ một cách hợp lý.

Các cảm biến oxy có thể sử dụng để phân tích khí oxy tan trong khí trơ, trong các buồng chân không ($10^{-7} \text{ atm} < p(\text{O}_2) < 1 \text{ atm}$) hoặc để phân tích các hỗn hợp khí CO/CO_2 hay $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ ($10^{-27} \text{ atm} < p(\text{O}_2) < 10^{-11} \text{ atm}$) mà không cần có bất cứ sự thay đổi nào trong cấu trúc của nó.

15.1.2.3. Các nguyên nhân gây nên sai số

Sai số do sự không chính xác khi đo các thông số thực nghiệm:

Sai số 0,1 mV trong khi đo suất điện động của cảm biến tương ứng với sai số của áp suất oxy riêng phần bằng 0,5 %. Trong trường hợp đo nhiệt độ, sai số của phép đo này ảnh hưởng lớn hơn nhiều: nếu sai số nhiệt độ là 1°C thì sai số của áp suất sẽ bằng 3 % (phụ thuộc vào loại cảm biến).

Sai số tương đối do áp suất so sánh p_{ss} gây nên cũng tương đương với sai số của áp suất $p(\text{O}_2)$. Nếu không khí hoặc oxy siêu sạch được sử dụng thì thành phần của chất khí so sánh được biết trước với độ chính xác cao và không phụ thuộc vào nhiệt độ ($\Delta p_{ss}/p_{ss} < 0,1 \%$). Nếu hệ kim loại-oxit kim loại được sử dụng làm hệ so sánh thì phải chuẩn cho từng trường hợp cụ thể bởi vì các số liệu trong các tài liệu thường không đủ độ chính xác.

Sai số do độ dẫn điện tử của chất điện phân:

Thông thường trong chất điện phân rắn số vận chuyển điện tử, t_e , luôn luôn khác không, do vậy việc áp dụng định luật Nernst chỉ là gần đúng. Sự tồn tại của độ dẫn điện tử gây nên ba hiệu ứng:

- Hiệu ứng ngắn mạch làm giảm suất điện động của cảm biến với hệ số giảm bằng $(1 - \bar{t}_e)$, trong đó \bar{t}_e là số vận chuyển điện tử trung bình của chất điện phân rắn.
- Hiệu ứng thấm: xuất hiện dòng chất khí phân tích đi qua chất điện phân, gọi là dòng bán thấm thấu điện tử (semi-permeability electronic), làm thay đổi áp suất chất khí.
- Hiệu ứng rối loạn cân bằng giữa chất điện phân và pha khí ở các điện cực.

Trong trường hợp cảm biến oxy trên cơ sở chất điện phân là ôxít zirconi, ảnh hưởng của thành phần $(1 - \bar{t}_e)$ trở nên đáng kể khi nhiệt độ lớn hơn 1000 °C.

Bắt đầu từ nhiệt độ 900 °C trở lên, dòng bán thấm thấu điện tử có thể làm sai lệch áp suất đo cỡ 10^{-6} atm. Sự rối loạn cân bằng ở điện cực là nguyên nhân quan trọng dẫn đến sai số. Nó bắt đầu gây ảnh hưởng từ nhiệt độ 800 °C và đặc biệt gây tác hại trong trường hợp đo oxy sạch với áp suất nhỏ.

Sai số do rối loạn cân bằng giữa điện cực và pha khí:

Các nguyên nhân sai số do tác động lên cân bằng giữa pha khí và điện cực có thể là:

- Trở kháng của milivôn kế không đủ lớn cho nên xuất hiện dòng điện chạy trong cảm biến;
- Sự có mặt của các chất bẩn ở điện cực (như bụi kim loại, bụi than của các sản phẩm bị cháy...).

Sai số do sự không đồng nhất về nhiệt độ của cảm biến:

Nếu nhiệt độ giữa hai điện cực chênh nhau 1 °C và áp suất riêng phần của oxy đo được là 10^{-3} atm, sai số sẽ là 3,5 %. Để tránh sai số này nên đo nhiệt độ ở điện cực đo.

Sai số do điện thế dư:

Ngay cả khi hai điện cực cùng tiếp xúc với chất khí phân tích dưới cùng áp suất thì suất điện động vẫn khác không, trái với dự đoán của định luật

Nernst, và có giá trị cỡ mV. Để đo chính xác nên trừ bớt điện áp này như là điện thế dư.

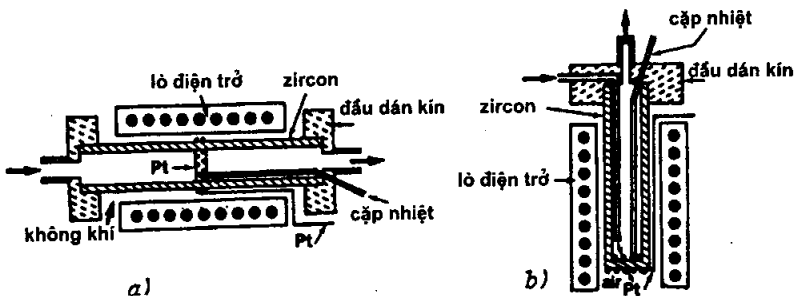
15.1.3. Cấu tạo cảm biến

Trong bảng 15.1 giới thiệu các cảm biến điện thế dùng để xác định thành phần khí và nhiệt độ làm việc của chúng.

Bảng 15.1

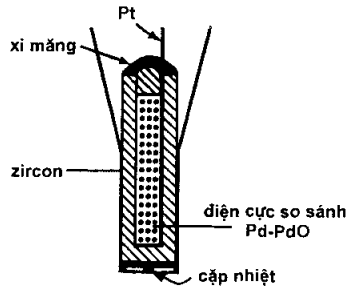
Khí	Cấu trúc cảm biến	Nhiệt độ làm việc (°C)
O ₂ H ₂ O-H ₂ CO ₂ -CO	Khí so sánh, Pt / ZrO ₂ - Y ₂ O ₃ / Pt, O ₂ Khí so sánh: không khí, H ₂ O/H ₂ , CO ₂ /CO, Ni/NiO, Pd/PdO, Co/CoO.	>500
Cl ₂	Ag / SrCl ₂ - KCl - AgCl / RuO ₂ , Pt, Cl ₂ Hệ so sánh: Ag/Ag ⁺	100 - 450
SO ₂ SO ₃	Ag / K ₂ SO ₄ - AgSO ₄ / Pt, SO ₂ + SO ₃ + O ₂ Không khí, Pt / ZrO ₂ -CaO / K ₂ SO ₄ / Pt, SO ₃ + O ₂	700 - 800
S _x	Ag / AgI / Ag ₂ S, S (hơi) Ag / alumine-β (Ag ⁺) / Ag ₂ S, S (hơi)	90 - 400 90 - 800
CO ₂	Ag / K ₂ CO ₃ - Ag ₂ SO ₄ / Pt, CO ₂	700 - 800
NO ₂	Ag / Ba(NO ₃) ₂ , AgCl / Pt, NO ₂	~ 500
I ₂	Ag / RbAg ₄ I ₅ / Pt, I ₂	~ 50

Hình dáng và kích thước của cảm biến rất khác nhau phụ thuộc vào chất điện phân. Các chất điện phân oxit thương mại tồn tại dưới dạng ống (có thể có một đầu bịt kín), đó là các dung dịch rắn trên cơ sở diôxít zircon (thí dụ như ZrO₂ - Y₂O₃ 9% hay ZrO₂ - CaO 15 %). Trên hình 15.2 biểu diễn dạng đơn giản nhất của cảm biến oxy sử dụng chất điện phân rắn là zircon.



Hình 15.2: Cảm biến oxy dùng không khí làm khí so sánh: a) chất điện phân rắn dưới dạng ống hở hai đầu; b) chất điện phân rắn dưới dạng ống một đầu kín.

Một dạng khác của cảm biến oxy dùng hệ thống so sánh kín (hay hệ thống so sánh nội) được biểu diễn trên hình 15.3.

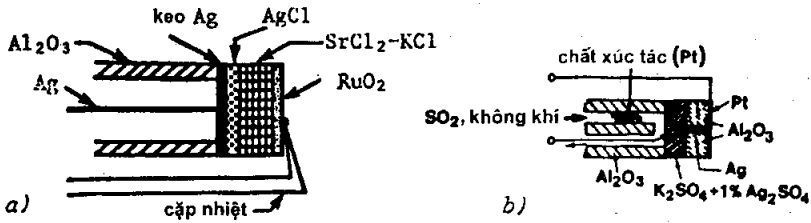


Hình 15.3: Cảm biến oxy dùng hệ thống so sánh kín.

Trong cảm biến loại này, hệ thống điện cực so sánh là hỗn hợp Pd-PdO. Chúng có rất nhiều ưu điểm so với cảm biến dùng không khí làm chất khí so sánh:

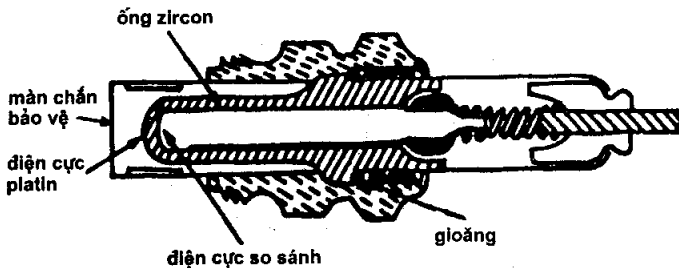
- Có khả năng giảm thiểu kích thước;
- Khả năng chống va đập tốt;
- Công suất nung nóng cảm biến nhỏ, cỡ 10 w;
- Bền vững dưới áp suất cao, tới 400 bar;
- Nhiệt độ của cảm biến đồng nhất vì kích thước nhỏ;
- Có thể đo trực tiếp trong thể tích khí cần phân tích vì có hệ thống so sánh kín và kích thước nhỏ;
- Hỗn hợp Pd-PdO làm việc tốt trong dải áp suất riêng phần của oxy từ 10 đến 10^{-6} atm ở khoảng nhiệt độ 500-600 °C. Nếu nhiệt độ làm việc cao hơn phải sử dụng hỗn hợp Co/CoO làm điện cực so sánh.

Việc chế tạo cảm biến đôi khi đòi hỏi phải sử dụng nhiều kỹ thuật khác nhau tùy thuộc vào dạng tồn tại của các chất điện phân rắn sẽ sử dụng. Trên hình 15.3 biểu diễn cảm biến thành phần khí sử dụng chất điện phân dạng viên hình trụ. Hệ thống so sánh Ag-AgCl của cảm biến clo (h. 15.4a) dưới dạng keo dán kín và dẻo cho phép dán kín tấm bạc trên chất điện phân. Trong trường hợp cảm biến đo anhydrit sulfuric (h. 15.4b), độ kín được đảm bảo bằng cách ép ống đỡ cảm biến trực tiếp lên trên bề mặt viên sulfat kali là chất điện phân có độ dẻo đủ lớn. Trong một số loại cảm biến khác, việc làm kín thực hiện bằng các gioăng kim loại (Ag, Pt).



Hình 15.4: Sơ đồ cấu tạo cảm biến clo (a) và cảm biến anhydrit sulfuric (b).

Trên hình 15.5 biểu diễn cảm biến oxy sử dụng để điều chỉnh các động cơ nổ. Trong cảm biến này chất khí so sánh là không khí. Cảm biến được nâng tới nhiệt độ làm việc nhờ dòng khí thoát ra từ động cơ. Điện cực đo được bảo vệ bằng màn chắn kim loại. Nồng độ CO giảm đáng kể khi sử dụng cảm biến và sự biến thiên của tỷ lệ giữa không khí và nhiên liệu giảm xuống còn 1 % (đối với hệ thống không có điều chỉnh sự biến thiên của tỷ lệ này là 5 %).



Hình 15.5: Cảm biến oxy dùng để điều chỉnh các động cơ nổ.

15.2. Cảm biến trở kháng thay đổi

15.2.1. Đo độ dẫn khối

Ở nhiệt độ cao các oxit của kim loại chuyển tiếp (Fe, Co, Ni) là các hợp chất có thành phần phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất oxy. Độ dẫn của chúng ở một nhiệt độ cho trước có dạng:

$$\sigma = K \cdot p_{O_2}^{\pm 1/n} \quad (15.6)$$

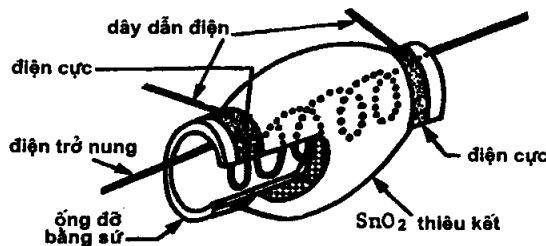
trong đó n là số nguyên có giá trị thay đổi từ 4 đến 6 phụ thuộc vào bản chất của oxit, nhiệt độ và vùng áp suất của oxy.

Cảm biến dựa trên nguyên lý đo độ dẫn khối có cấu tạo gồm một dây dẫn làm bằng oxit coban. Áp suất được đo bằng cách xác định sự biến thiên của điện trở dây dẫn. Cảm biến có thể sử dụng để định lượng oxy trong dải từ 1 vpm đến 100 % và được nghiên cứu ứng dụng cho mục đích điều chỉnh động cơ nổ.

15.2.2. Đo độ dẫn bề mặt

Cảm biến loại này dựa trên nguyên lý thay đổi độ dẫn điện của một màng mỏng bán dẫn khí hấp thụ chất khí trên bề mặt. Các nhà nghiên cứu đã thử nghiệm dùng oxit titan TiO_2 để hiệu chỉnh động cơ nổ. Ở điểm cân bằng hóa học, sự thay đổi của áp suất oxy riêng phần trong luồng khí thải của động cơ gây nên sự thay đổi đáng kể của điện trở màng oxit.

Các cảm biến trên cơ sở ZnO hoặc SnO_2 đã được triển khai rộng rãi ở mức độ sản xuất công nghiệp. Trên hình 15.6 biểu diễn dạng cảm biến thông dụng hiện nay.



Hình 15.6: Cảm biến trên cơ sở oxit bán dẫn.

Màng mỏng oxit thiếc được chế tạo trên đế dạng hình ống làm bằng Al_2O_3 . Hai dây dẫn bằng vàng được nối với hai vòng bằng kim loại trên bề mặt để dẫn điện ra ngoài. Sợi đốt đặt ở phía trong của đế hình ống được dùng để nung nóng cảm biến đến nhiệt độ làm việc ($350\text{ }^\circ\text{C}$). Sự hấp thụ khí trên bề mặt màng oxit bán dẫn tạo nên điện tích không gian làm thay đổi mật độ hạt dẫn tương đương với sự thay đổi độ dẫn bề mặt.

Các cảm biến này có tính lựa chọn thấp và độ dẫn bề mặt là hàm của nhiệt độ môi trường, độ ẩm và áp suất riêng phần của oxy. Để cải thiện tính lựa chọn của cảm biến người ta phải chọn nhiệt độ làm việc thích hợp và pha thêm vào lớp oxit một chất xúc tác như Pd, Cu, Ni, Pt. Cảm biến được sử dụng để phát hiện CO , CH_4 , H_2S và NO_x .

Thời gian đáp ứng của cảm biến nằm trong khoảng từ vài giây đến vài phút. Giới hạn đo cỡ 1 ppm.

Nhược điểm của cảm biến trên cơ sở các ôxit bán dẫn là độ ổn định theo thời gian thấp, thường xuyên phải chuẩn lại hoặc thay thế. Ưu điểm của chúng là giá thành rẻ.

15.2.3. Đo điện dung

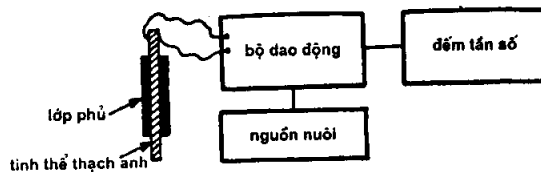
Các cảm biến tụ điện được sử dụng chủ yếu để định lượng hơi nước trong chất khí. Nguyên lý của cảm biến tụ điện dựa trên hiện tượng thay đổi hằng số điện môi của chất điện môi nằm giữa hai bản cực của tụ khi nó bị hấp thụ hơi nước (tham khảo chương 13 “Cảm biến độ ẩm”).

15.3. Cảm biến áp điện thạch anh

Nguyên lý của cảm biến áp điện thạch anh dùng để đo thành phần khí rất đơn giản: tần số dao động của tinh thể thạch anh giảm khi nó hấp phụ các phân tử khí trên bề mặt. Sự biến thiên tần số dao động ΔF của thạch anh là hàm của nồng độ khí hấp phụ:

$$\Delta F = K.C \quad (15.7)$$

trong đó C là nồng độ chất khí phân tích và K là hằng số đặc trưng của tinh thể thạch anh. Cảm biến có tính lựa chọn nhờ vào việc sử dụng vật liệu thích hợp với chất khí nghiên cứu để phủ thành lớp mỏng trên hai mặt của tinh thể thạch anh (h. 15.7).



Hình 15.7: Sơ đồ cảm biến đo thành phần khí bằng dao động thạch anh

Bộ phận chính của thiết bị là một cảm biến áp điện được chế tạo từ một tấm tinh thể thạch anh loại tần số 9 MHz kích thước mỗi chiều từ 10 đến 16 mm, bề dày 0,19 mm. Các điện cực hình tròn có đường kính nằm trong khoảng 3 ÷ 8 mm và chiều dày 0,3 ÷ 1 μ m. Hai mặt của tấm thạch anh được

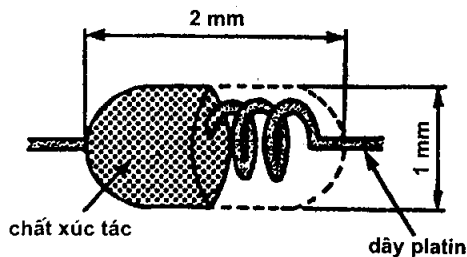
phủ hai lớp hấp thụ chọn lọc đối với chất khí phân tích và có độ ổn định theo thời gian. Cảm biến được nối với một bộ dao động tần số thấp và thiết bị đếm tần.

Các cảm biến loại này đã được chế tạo ở mức độ công nghiệp từ những năm 1964. Chúng được sử dụng rộng rãi cho nhiều mục đích trong các lĩnh vực khác nhau như:

- Xác định độ ẩm (lớp phủ tấm thạch anh làm từ vật liệu polyme có khả năng hút ẩm tốt làm cho cảm biến có độ nhạy cao: 1ppm trong 30 s, tính chọn lọc tốt và thời gian làm việc liên tục là 6 tháng);
- Phân tích cacbua hydro;
- Phát hiện thuốc trừ sâu và các chất khí như SO_2 , NO_2 , NH_3 , HCl và H_2S .

15.4. Cảm biến xúc tác

Cảm biến xúc tác được sử dụng chủ yếu trong công nghiệp để phát hiện các chất khí dễ nổ và dễ cháy. Cảm biến được chế tạo từ một dây platin đường kính 50 μm cuốn hình lò xo đặt chìm bên trong oxit chịu lửa có độ xốp nhỏ, thường là alumin (h. 15.8).



Hình 15.8: Sơ đồ cấu tạo của cảm biến xúc tác.

Alumin được tẩm một trong các chất xúc tác như Pt, Pd, Ir hoặc hỗn hợp Pd-ThO₂. Các chất xúc tác này có tác dụng làm tăng độ nhạy của cảm biến.

Thông thường cảm biến được lắp trong mạch cầu Wheastone với một phần tử khác không nhạy với chất khí phân tích. Hai phần tử này được nung nóng bằng hiệu ứng Joule đến nhiệt độ làm việc (450 °C). Khi có mặt chất khí dễ cháy, nhiệt lượng cháy làm tăng nhiệt độ của cảm biến (phần tử nhạy trong mạch cầu) dẫn đến sự gia tăng điện trở của nó. Sự mất cân bằng của cầu sẽ cung cấp tín hiệu chỉ thị về hàm lượng chất khí dễ cháy trong hỗn hợp khí.

Các cảm biến này không có tính chọn lọc và phản ứng với nhiều khí khác nhau như CH₄, butan, H₂, CO v.v... với nồng độ thấp hơn 5 %.

15.5. Cảm biến thuận từ

15.5.1. Nguyên lý hoạt động

Khi một chất khí đặt trong gradient của một cảm ứng từ \vec{B} , nó chịu tác động của lực song song với từ trường có hướng và cường độ phụ thuộc vào độ từ cảm χ :

$$d\vec{F} = \frac{\chi}{2\mu_0} .dV.\overline{\text{grad}B^2} \quad (15.8)$$

trong đó μ_0 là độ từ thẩm của chân không và dV là vi phân của thể tích.

Phần lớn các chất khí là những chất nghịch từ (χ âm). Tuy nhiên, một số chất khí (như O₂, NO, NO₂) có ít nhất một điện tử tự do và là chất thuận từ (χ dương). Chúng có khả năng từ hóa mạnh hơn nhiều so với các chất khí khác (bảng 15.2). Khi một hỗn hợp các chất khí khác nhau được đặt trong từ trường, chỉ có các chất khí thuận từ bị từ trường tác động.

Bảng 15.2

Chất khí	O ₂	NO	NO ₂	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	Ar	CH ₄
χ	100	45	4	-0,12	-0,36	-0,35	-0,63	-0,58	-0,37

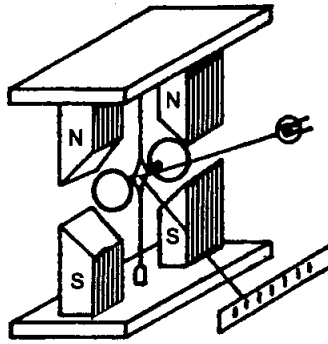
Một tính chất đặc biệt của các chất khí thuận từ là độ từ cảm của chúng phụ thuộc vào nhiệt độ: χ tỷ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối. Dựa trên tính chất thuận từ và sự phụ thuộc của χ vào nhiệt độ người ta đã chế tạo ra các cảm biến thuận từ để đo thành phần chất khí.

15.5.2. Cấu tạo

15.5.2.1. Cảm biến từ động

Các thiết bị có bán trên thị trường khác nhau ở phương pháp đo lực do từ trường tác động. Trên hình 15.9 biểu diễn sơ đồ nguyên lý cấu tạo của cảm biến từ động.

Trong một buồng làm bằng thép có chất khí phân tích thổi qua, các điện cực có tiết diện hình tam giác tạo nên một từ trường không đồng dạng. Một cấu trúc kiểu quả tạ cầm tay gồm hai hình cầu rỗng đường kính 2 mm bằng thạch anh điển đầy khí nitơ được nối cứng với nhau và treo bằng một sợi dây silic trên có gắn một chiếc gương nhỏ. Vị trí của mỗi quả cầu tương đương với một đầu vào của nam châm.



Hình 15.9: Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của cảm biến từ động.

Nếu trong hỗn hợp khí có chứa O_2 , oxy sẽ bị hút về phía từ trường mạnh hơn làm cho các quả cầu quay xung quanh sợi dây treo chúng cho đến khi lực tác động của từ trường cân bằng với ngẫu lực xoắn của sợi dây. Tia sáng phản chiếu từ chiếc gương nhỏ sẽ phản ánh vị trí góc của bộ phận quay. Thang đo, nơi vệt sáng chuyển động theo góc quay của gương, được chia độ theo hàm lượng oxy. Như vậy, bằng cách đọc trực tiếp vị trí của vệt sáng trên thước đo có thể biết được hàm lượng oxy trong hỗn hợp khí.

Độ nhạy của cảm biến có thể được cải thiện bằng phương pháp “số không”: các quả cầu được đưa trở lại vị trí cân bằng của chúng bằng cách tác động một điện trường giữa hai điện cực. Đo hiệu điện thế giữa hai điện cực này sẽ xác định được hàm lượng oxy. Thiết bị được chuẩn với khí nitơ và một chất khí có hàm lượng biết trước, thường là không khí khô.

Để tránh ảnh hưởng của sự phụ thuộc nhiệt độ của χ , các phép đo được tiến hành ở nhiệt độ 50 °C.

Ưu điểm của thiết bị:

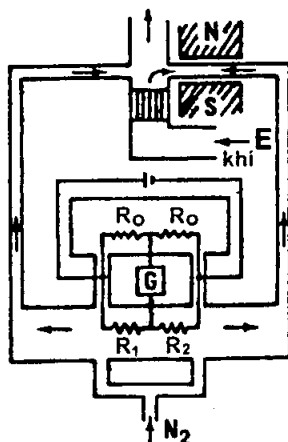
- Hoạt động ở mọi vị trí;

- Có thể sử dụng thiết bị dạng xách tay;
- Độ ổn định của điểm không và của thang nồng độ rất tốt;
- Không cần dùng đến sợi dây nóng.

Các nhược điểm chính là:

- Thời gian đáp ứng lớn (từ 10 s đến 1 phút);
- Độ nhạy thấp (nồng độ khí phải lớn hơn 100 vpm).

Một loại thiết bị từ động khác dựa trên hiệu ứng Quinke cũng đã được chế tạo: trong từ trường oxy có xu hướng tập trung lại, trong khi đó các chất khí nghịch từ hoàn toàn không chịu tác động nào. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị dựa trên hiệu ứng này biểu diễn trên hình 15.10.



Hình 15.10: Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của cảm biến dùng hiệu ứng Quinke.

Hai luồng khí nitơ đối xứng chạy trong một cấu trúc trong đó có hai sợi đốt có điện trở R_1 và R_2 tạo thành mạch cầu Wheatstone. Trên một nhánh nitơ của cấu trúc có tác động từ trường của một nam châm vĩnh cửu. Khi đưa chất khí có chứa oxy vào đầu E của cấu trúc, oxy bị hút về nhánh nơi có tác động của từ trường (NS) và “áp suất từ” gây nên do hiệu ứng Quinke sẽ tỷ lệ với hàm lượng oxy trong khí phân tích. Áp suất này làm mất đối xứng giữa hai luồng khí nitơ và do đó làm cho cầu mất cân bằng.

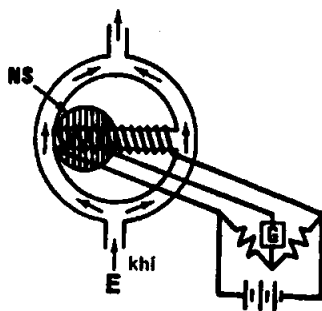
Các ưu điểm chính của cảm biến dùng hiệu ứng Quinke là thời gian đáp ứng không lớn (~ 15 s) và không có sợi đốt ở nhiệt độ cao tiếp xúc với chất khí phân tích. Nhược điểm của cảm biến này là chỉ số của tín hiệu đo rất phụ

thuộc vào vị trí không gian của thiết bị, ngoài ra cần phải sử dụng một lượng khí trợ khí vận hành.

15.5.2.2. Cảm biến đối lưu từ-nhiệt

Trong một thời gian dài đây là loại cảm biến duy nhất tồn tại trên thị trường. Nó dựa trên nguyên lý như sau: khi chất khí phân tích, thí dụ oxy, bị nung nóng trong một từ trường, oxy nóng trở nên kém từ tính hơn và sẽ bị bắt bởi dòng oxy lạnh để rồi đến lượt dòng này lại tiếp tục bị nung nóng dẫn đến sự xuất hiện của “luồng gió từ”.

Trong các thiết bị đo, chất khí cần phân tích lưu chuyển từ dưới lên trên trong một ống hình xuyên đặt thẳng đứng (h. 15.11). Một đoạn ống ở vị trí nằm ngang (tuyệt đối) nối thông hai nhánh của hình xuyên. Đoạn ống nằm ngang được cuốn xung quanh bằng hai sợi đốt platin tạo thành một phần của cầu Wheatstone. Một trong hai điện trở này được đặt giữa hai cực của một nam châm vĩnh cửu (NS).



Hình 15.11: Sơ đồ nguyên lý của cảm biến đối lưu từ-nhiệt.

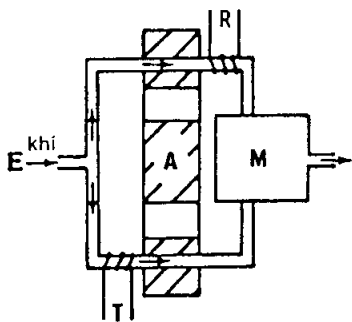
Trước khi phân tích, cho dòng khí trợ thổi qua ống hình xuyên để cân bằng cầu Wheatston. Nếu trong thành phần khí có chứa oxy, các phân tử của nó bị hút vào đường ống nằm ngang, ở đó do bị nung nóng cho nên độ tự cảm của oxy giảm đi và do vậy nó lại bị thay thế bởi luồng oxy lạnh hơn, kết quả là hình thành “luồng gió từ”. Sự giảm nhiệt của hai sợi đốt dưới tác dụng của dòng khí trong đoạn ống nằm ngang sẽ khác nhau làm cho cầu bị mất cân bằng. Sự mất cân bằng này là hàm của hàm lượng oxy cần phân tích.

Cảm biến thành phần khí dựa trên nguyên lý đối lưu từ-nhiệt có ưu điểm là giá thành thấp và khả năng loại bỏ sự rối loạn có thể xảy ra do các chất khí

ngược từ gây nên (bằng cách áp dụng kết hợp từ trường và nung nóng chất khí). Tuy thế cảm biến loại này vẫn không tránh khỏi những nhược điểm chính liệt kê sau đây:

- Cần phải đặt ống hình xuyên một cách hợp lý và chính xác để tránh đối lưu nhiệt trong đoạn ống nằm ngang.
- Sự có mặt của các thành phần có hệ số dẫn nhiệt rất khác với oxy (như H_2 , He, CO_2) sẽ gây nên sai số lớn trong phép đo.
- Điểm không phụ thuộc vào việc chuẩn cấu đo, tức là phụ thuộc vào sự ổn định của các điện trở và của lưu lượng khí.

Một số thiết bị phân tích khác có trang bị cảm biến phát hiện chất khí dựa trên nguyên lý “áp suất từ”. Chất khí phân tích lưu thông trong hai ống đồng dạng đặt ở đầu vào của một nam châm điện (A) cung cấp từ trường biến điệu (h: 15.12). Một phần của hai ống được nung nóng (tại R và T). Theo hiệu



Hình 15.12: Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của cảm biến khí dùng áp suất từ.

ứng từ-nhiệt, giữa hai ống sẽ có sự khác nhau về áp suất, nó biến điệu cùng tần số với từ trường nhưng có biên độ là hàm của hàm lượng oxy trong chất khí phân tích. Màn M có tác dụng để đo biến điệu này. Ưu điểm của thiết bị là có thời gian đáp ứng nhỏ hơn nhiều so với loại đối lưu từ-nhiệt.

15.6. Máy phân tích quang

15.6.1. Nguyên lý hoạt động

Sự hấp thụ bức xạ điện từ của một phân tử khí xảy ra không những do sự kích thích điện tử mà còn do biến thiên năng lượng dao động (dao động tương đối của các nguyên tử trong các liên kết hóa học). Những biến thiên của năng lượng này đều lượng tử hóa. Chỉ có một số giá trị đặc biệt của

mômen góc quay hoặc của năng lượng dao động là có thể, đó là các mức năng lượng dao động và năng lượng quay. Ảnh hưởng của ánh sáng có bước sóng khác nhau đối với các đại lượng này cũng sẽ khác nhau. Sự hấp thụ bức xạ ánh sáng trông thấy, tia cực tím và tia X gây nên sự biến thiên năng lượng điện tử của phân tử. Hấp thụ tia hồng ngoại gây nên sự thay đổi các trạng thái dao động và quay của phân tử.

Phổ hấp thụ của mỗi chất khí là đặc trưng riêng của chất khí đó. Bởi vậy, phương pháp phổ hấp thụ được sử dụng để xác định bản chất của chất khí nghiên cứu. Việc đo cường độ bức xạ điện từ bị hấp thụ bởi một hỗn hợp khí sẽ cho phép xác định nồng độ của chất khí trong hỗn hợp. Theo định luật Lambert-Beer, tỷ lệ I/I_0 của cường độ bức xạ bị hấp thụ trong một thể tích chứa hỗn hợp chất khí phụ thuộc vào tích số của kích thước thể tích khí (kích thước theo phương chiều), của nồng độ chất khí cần phân tích trong hỗn hợp khí và hệ số hấp thụ theo hàm expônen, nghĩa là:

$$\log \frac{I}{I_0} = a.l.c \quad (15.9)$$

trong đó:

- l là kích thước của khối chất khí theo phương chiều sáng;
- c là nồng độ của chất khí trong hỗn hợp;
- a là hệ số hấp thụ.

Trên thực tế, khi áp dụng định luật Lambert-Beer cần tính đến một số điểm sau đây:

- Định luật Lambert-Beer chỉ đúng khi bức xạ là đơn sắc;
- Hệ số hấp thụ a thay đổi theo bề rộng của dải bước sóng sử dụng;
- Một sự thay đổi nhỏ của nhiệt độ cũng sẽ làm dịch chuyển dải hấp thụ;
- Định luật này không tính đến ảnh hưởng của chất khí không hấp thụ có mặt trong hỗn hợp và áp suất tổng cộng của hỗn hợp.

Các nguyên nhân vừa nêu dẫn đến sai số trong phép đo phổ hấp thụ của các chất khí.

15.6.2. Cấu tạo

Danh sách các chất khí phân tích trong lĩnh vực công nghiệp dựa trên các kỹ thuật phổ hấp thụ sử dụng bức xạ có bước sóng khác nhau trình bày trong bảng 15.3.

Bảng 15.3

Bức xạ		Tia X	Tia cực tím	Ánh sáng trông thấy	Tia hồng ngoại
Bước sóng, nm		$10^{-2} - 10$	$10 - 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2 - 10^6$
Các chất khí phân tích		H ₂ S, khí axit	O ₂ , O ₃ , SO ₂ , NH ₃ , Hg	Cl ₂ , ClO ₂ , NO _x , H ₂ O	H ₂ O, CO, CO ₂ , NO, N ₂ O, NH ₃ , SO ₂ , SO ₃ , alcane, alxen
Vùng	Vết	-	NH ₃ , SO ₂ , O ₃ , Hg	+	+
nồng độ	Nồng độ cao	+	SO ₂ , O ₃	+	+

15.6.2.1. Phân tích bằng bức xạ ánh sáng trông thấy và tia cực tím

Trong phương pháp này, tia sáng phát ra từ đèn hơi thủy ngân được lọc đơn sắc bằng các tấm lọc thích hợp. Trong một số thiết bị, bức xạ đơn sắc được chia thành hai tia, một tia đi qua thùng chứa được quét qua lại bằng hỗn hợp khí phân tích, tia thứ hai đi qua thùng chứa khí so sánh. Cường độ bức xạ ở đầu ra được so sánh với nhau bằng các tế bào quang điện.

Trong một loại thiết bị khác, chỉ có một tia sáng đơn sắc quét qua lại hỗn hợp khí phân tích. Ở đầu ra ánh sáng được chia thành hai tia đi qua hai tấm lọc, một tấm cho bức xạ đã bị hấp thụ bởi chất khí phân tích, một tấm cho bức xạ không bị hấp thụ bởi chất khí. Hai bức xạ sau khi lọc này được so sánh với nhau nhờ các tế bào quang điện.

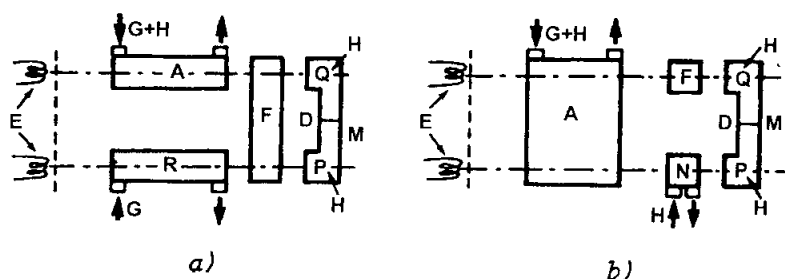
15.6.2.2. Phân tích bằng bức xạ tia hồng ngoại

Trong công nghiệp thường sử dụng các bức xạ không tán sắc (hay không tách phổ) để phân tích thành phần khí. Vì thế tính lựa chọn kém hơn nhưng lại có nhiều ưu điểm thích hợp cho sử dụng công nghiệp (tính đơn giản, độ nhạy tốt, độ tin cậy và đòi hỏi công bảo dưỡng ít hơn).

Trong các thiết bị một chùm tia này, tia bức xạ từ nguồn phát đi qua thùng có chứa khí phân tích sau đó lần lượt đi qua hai tấm lọc (quay tròn) để có thể so sánh (nhờ vào một đầu thu) sự hấp thụ đối với hai bước sóng, một bước sóng tương ứng với một cực đại hấp thụ của chất khí phân tích và một bước sóng tương ứng với hấp thụ nhỏ nhất dùng để so sánh.

Các thiết bị phân tích hai tia được sử dụng rộng rãi hơn. Người ta phân biệt hai loại thiết bị hai chùm tia (h. 15.13).

Máy phân tích dùng tẩm lọc dương (h. 15.12a) gồm một thùng hấp thụ A được quét qua lại bằng hỗn hợp khí phân tích H+G (chất khí H hấp thụ tia



Hình 15.13: Sơ đồ nguyên lý của phổ kế hồng ngoại không tách phổ hai tia:

a) lọc dương; b) lọc âm.

H: khí phân tích hấp thụ tia hồng ngoại.

G: khí không hấp thụ tia hồng ngoại.

hồng ngoại và chất khí G không hấp thụ tia hồng ngoại) và một thùng R để so sánh chứa chất khí G. Các thùng này được làm bằng đồng hoặc bằng thủy tinh có mạ vàng hoặc bạc ở thành phía bên trong và được đậy kín bằng một cửa sổ trong suốt đối với tia bức xạ (LiF, thạch anh, mica, CaF₂). Bộ thu vi sai D gồm hai buồng P và Q được điền đầy bằng chất khí H và ngăn cách với nhau bởi màng M. Trong khi chất khí H chứa trong buồng P loại trừ mọi bức xạ của nguồn có thể hấp thụ bởi khí H thì ở buồng Q cũng chất H này hấp thụ càng ít hơn nếu hỗn hợp khí quét qua lại khối A chứa một tỷ lệ của H nhiều hơn. Sự nóng lên khác nhau và (do vậy) sự khác nhau về áp suất H giữa buồng P và Q của bộ thu càng lớn nếu hàm lượng H chứa trong hỗn hợp khí càng cao (lọc dương). Nếu hỗn hợp khí chứa các chất khí có dải hấp thụ chồng lên dải hấp thụ của chất khí cần phân tích, người ta điền đầy chúng vào một thùng bù trừ F bị hai bức xạ đi qua để sao cho những biến thiên hàm lượng (có thể xảy ra) của các khí này sẽ không ảnh hưởng đến phép đo.

Trong các máy phân tích dùng bộ lọc âm (h. 15.12.b), các tia bức xạ từ nguồn phát đi qua thùng chứa A được quét qua lại bằng hỗn hợp khí (G+H) sau đó đồng thời đi qua thùng N có chất khí H lưu thông bên trong và thùng bù trừ F chứa chất khí có thể có dải hấp thụ chồng lên dải hấp thụ của khí phân tích, cuối cùng đến bộ thu vi sai có cấu tạo tương tự như đã giới thiệu. Trong thiết bị này, sự khác nhau về áp suất giữa hai buồng P và Q của bộ thu càng nhỏ nếu hàm lượng của chất khí H chứa trong hỗn hợp khí càng lớn (trường hợp lọc âm).

15.6.3. Ứng dụng

Hiện nay, trong các loại phổ kế, chỉ có phổ kế hồng ngoại được chú trọng hơn cả. Khoảng 80% trong số các thiết bị này được dùng để đánh giá hàm lượng CO và CO₂ trong công nghiệp và bảo vệ môi trường.

Việc sử dụng laze làm nguồn bức xạ đơn sắc được ứng dụng nhiều trong các máy có độ nhạy cao và để phân tích từ xa (xác định các chất gây nhiễm bẩn).

Các máy phân tích sử dụng bức xạ tia cực tím và ánh sáng trông thấy ít được sử dụng trong công nghiệp. Chúng thường chỉ được dùng trong các trường hợp đặc biệt khi không có các phương pháp phân tích đơn giản hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Considine D.M., Ross S.D., Handbook of applied instrumentation, New-York, McGraw Hill, 1964.
2. Ferreti M., Mesures et contrôles industriels, Paris, Entreprise Moderne d'Édition, 1977.
3. Hartel V., Optoelectronics: theory and practice, McGraw Hill-Texas Instruments Electronics Series, New York, 1978.
4. Sheingold D.H., Transducer interfacing handbook, Analog Devices Inc. Norwood USA, 1980.
5. Morrison R. Grounding and shielding techniques in instrumentation, John Wiley & Sons Inc., New York, 1977.
6. Hewlett Packard Optoelectronics Division, Optoelectronics, applications manual, McGraw Hill, New York, 1977.
7. Orszag A., Hepner G., Les lasers et leur applications, Masson, Paris, 1980. A.S.T.M. (American Society for Testing and materials), Manual on the use of thermocouples in temperature measurements, Philadelphie, A.S.T.M., 1974.
8. Dean Baker H., Ryder E.A., Baker N.H., Temperature measurements in engineering, Stamford, Omega Press, 1975.
9. Eckert R.G., Goldstein R.J. Measurements in heat transfer, New York, McGraw Hill, 1976.
10. Miller R.W., Servomechanismes: devices and fundamentals, Reston Publish. Comp., Reston Virginia, 1977.
12. Vaughan J., Strain measurements, Brüel & Kjaer, Copenhagen, 1975.
13. Lines M.E. and Glass A.M. Principels and applications of ferroelectrics and related materials, Oxford University Press, 1977.
14. Bouche R., Calibration of chock and vibration meassuring transducers, Washinton, Naval Reseach laboratory, Shock and Vibration Information Center, SVIC, 1979.
15. Phùng Hồ, Giáo trình chân không, Hà nội, 1974.
16. Hebrard P., Liousse F., Calvet P., Méthodes et moyens de mesure de débit de gaz, Monographie du BNM, Paris, Edition Chiron, 1979.
17. Broch J.T., Mechanical and shock measurements, Brüel & Kjaer, 1980.
18. Henry R.P., Cours de science et technique du vide, tomes I & II, Paris Société Française des Ingénieurs et Techniciens du vide, 1968.

19. Combe M., La mesure des fluctuations de pression: capteurs à faible temps de réponse et leur étalonnage, Techniques de mesure dans écoulements, Paris, Eyrolles, 1974.
20. Fisher C., Les radioéléments et leurs utilisations, Paris, Eyrolles, 1980.
21. Bergveld P., The operation of an ISFET as an electronics device, Sensors and actuators, 1, tr. 17, 1981.
22. Charlot G. Les méthodes de la chimie analytique, Paris, Masson, 1961.
23. Friser H., Ion selective electrodes in analytical chemistry, New York, Plenum Press, 1978.
24. Asch G. Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod, 1987.
25. Miller E.S. and Mullin J.B., Electronics Materials from silicon to organic, New York and London, 1991.
26. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., Wiley, New York, 1981.
27. P.W. Atkins, Physical Chemistry, 3rd ed., Oxford University Press, 1986.
28. N. Ichinose & T. Kobayash, Guide pratique des capteurs, Masson, Paris, 1990.
29. A.A. Yaremchenko, V./V. Kharton, E.N. Naumovich, V.V. Samokhval, Solid State Ionic, 111, 1998, 227-231.
30. F. Krock, I. Abrahams, D. Bangobango, W. Bogusz, J.A.G. Nelstrop, Solid State Ionic, 111, 1998, 37-42.
31. A.Kezionis, W. Bogusz, F.Krok, J. Dygas, A. Orliukas, I. Abrahams, W. Gebicki, Solid State Ionics 119, 1999, 145-149.
32. Zhang Yong, Liu Junhua, Li Xin, Tang Xiaojun, Zhu Changchun, Sensors and Actuators A, 125, 2005, 15-24.
33. Zhang Yong, Liu Junhua, Li Xin, Zhu Changchun, Sensors and Actuators A, 128, 2006, 278-289.
34. A. Talbi, F. Sarry, M. Elhakiki, L. Le Brizoual, O. Elmazri, P. Nicolay, P. Alnot, Sensors and Actuators A, 128, 2006, 78-83.
35. P. Valdastrì, S. Roccella, L. Beccai, E. Cattin, A. Menciassi, M.C. Carrozza, P. Dario, Sensors and Actuators A, 123-124, 2005, 249-257.
36. Cheng-Liang Suna, K.H. Lam, J. Wanga, H.L.W. Chan, X.-Z. Zhao, C.L. Choy, Sensors and Actuators A, 128, 2006, 290-295.
37. Juhyun Yoo, Jaeil Hong, Hyunseok Lee, Yeongho Jeong, Byungyool Lee, Hyunseon Song, Junsik Kwon, Sensors and Actuators A, 126, 2006, 41-47.

PHAN QUỐC PHỒ VÀ NGUYỄN ĐỨC CHIẾN

GIÁO TRÌNH CẢM BIẾN

Chịu trách nhiệm xuất bản : PGS. PTS TÔ ĐĂNG HẢI
Biên tập : ĐẶNG VĂN SỬ
Trình bày bìa : HƯƠNG LAN

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT
70 Trần Hưng Đạo Hà Nội

In 800 cuốn khổ 16x24 cm tại Công ty in Hàng không.
Theo quyết định số 136-2006/CXB/290-06/KHKT.
In xong và nộp lưu chiểu tháng 5/2006.