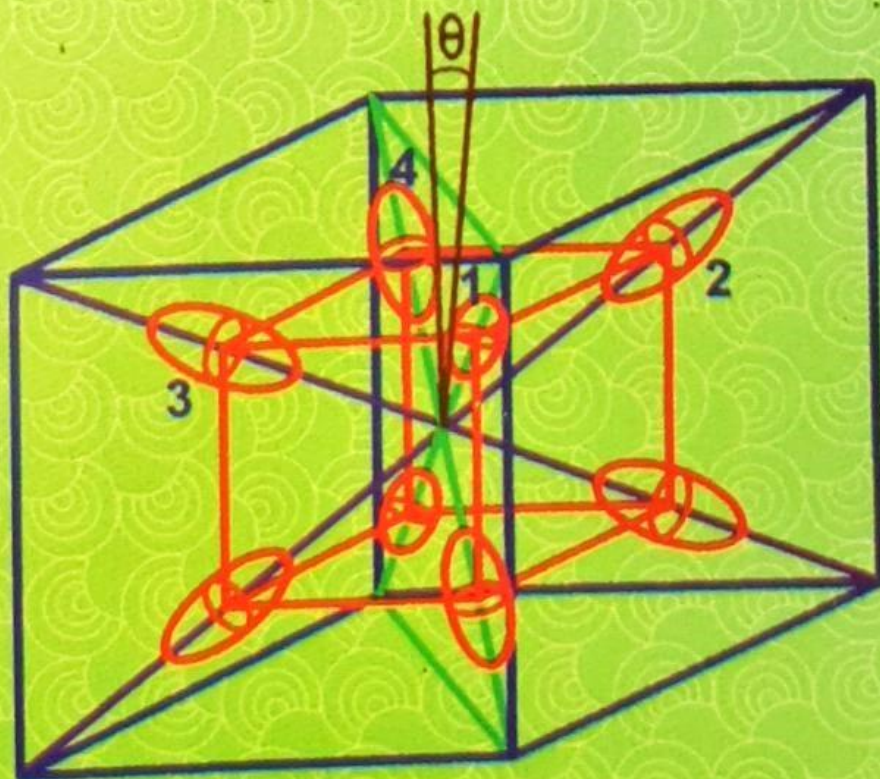


PHÙNG HỒ, PHAN QUỐC PHỒ

GIÁO TRÌNH VẬT LIỆU BÁN DẪN

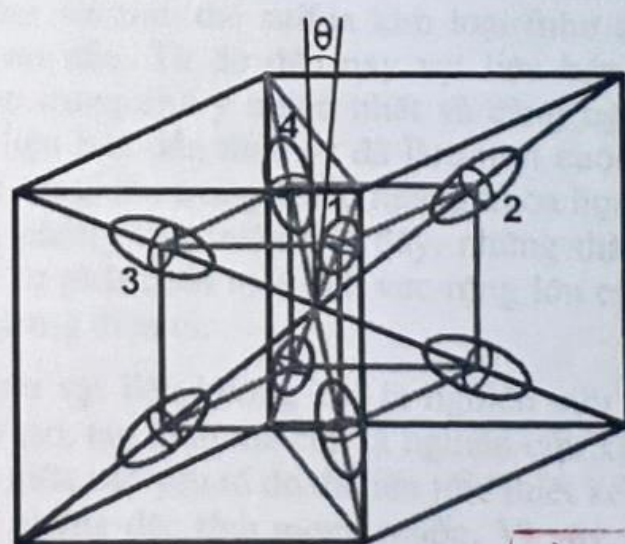


NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

PHÙNG HỒ & PHAN QUỐC PHỒ

LỜI NÓI ĐẦU

GIÁO TRÌNH VẬT LIỆU BÁN DẪN



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Hà Nội

LỜI NÓI ĐẦU

Vật liệu ở thể rắn chia ra làm ba loại: điện môi, bán dẫn và vật dẫn (kim loại). Muốn định nghĩa chính xác ba loại vật liệu này nói chung và vật liệu bán dẫn nói riêng phải dựa trên cấu trúc vùng năng lượng của điện tử trong các vật liệu đó.

Tạm thời chúng ta đưa ra một định nghĩa đối với vật liệu bán dẫn dưới dạng những đặc điểm chính của vật liệu này: bán dẫn có điện trở suất nằm giữa điện trở suất của kim loại (cỡ $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$) và điện trở suất của điện môi (cỡ $10^9\Omega\cdot\text{cm}$). Bán dẫn tinh khiết có hệ số nhiệt điện trở âm, nghĩa là khi nhiệt độ tăng điện trở suất của bán dẫn tinh khiết giảm. Điện trở suất của bán dẫn phụ thuộc rất mạnh vào nồng độ tạp chất, nhiệt độ cũng như những tác động bên ngoài như chiếu sáng, điện trường, từ trường... Vật liệu bán dẫn được biết đến từ rất lâu, năm 1874 Braun đã phát hiện ra tính chỉnh lưu dòng điện của tiếp xúc kim loại với tinh thể sulfua kim loại (như quặng pyrit đồng), một loại tinh thể bán dẫn. Từ đó đến nay vật liệu bán dẫn là đối tượng nghiên cứu được tập trung chú ý nhiều nhất và càng ngày càng được ứng dụng rộng rãi. Vật liệu bán dẫn thực sự đã làm một cuộc cách mạng trong công nghiệp điện tử cũng như trong nhiều ngành khoa học, kỹ thuật và công nghiệp khác. Trong những thập niên gần đây, những thành tựu về vật liệu bán dẫn đã dẫn đến sự phát triển một lĩnh vực rộng lớn của những linh kiện điện tử, vi điện tử, quang điện tử.

Ngày nay nghiên cứu vật liệu không chỉ là nghiên cứu cấu trúc, các tính chất, công nghệ chế tạo, tạo hình mà còn là nghiên cứu xác định những quy luật và mối quan hệ giữa các yếu tố đó để tiến tới “thiết kế” chế tạo ra những vật liệu bán dẫn có những đặc tính mong muốn. Vì vậy những cán bộ, làm việc trong các lĩnh vực vật liệu bán dẫn cũng như ứng dụng chúng cần phải có những hiểu biết tương đối toàn diện, cơ bản về vật liệu bán dẫn.

Để phục vụ công tác đào tạo kỹ sư vật lý chuyên ngành vật liệu điện tử, chuyên ngành khoa học vật liệu và các chuyên ngành khác liên quan cũng như để làm tài liệu giảng dạy cao học, tài liệu tham khảo cho nghiên cứu sinh, cho giảng viên các chuyên ngành liên quan đến vật liệu bán dẫn chúng tôi biên soạn giáo trình vật liệu bán dẫn này.

Nội dung giáo trình được trình bày trong 12 chương, tương ứng 4 đơn vị học trình với thời lượng 60 tiết. Chương 1 trình bày những khái niệm cơ bản về “cấu trúc tinh thể”. Chương 2 trình bày sơ lược “những khái niệm, tính chất,

đặc trưng cơ bản của vật liệu bán dẫn”. Người đọc có thể tìm hiểu những vấn đề được trình bày trong chương này một cách hệ thống và đầy đủ hơn trong “Giáo trình vật lý bán dẫn” [2] của chúng tôi. Chương 3 giới thiệu tổng quan “phân loại vật liệu bán dẫn”. Ở đây giới thiệu tất cả các loại bán dẫn, chúng được phân loại theo các tiêu chí khác nhau, trong đó những loại bán dẫn sẽ không được trình bày chi tiết trong những chương sau này, được trình bày kỹ hơn, chi tiết hơn ở chương 3. Chương 4 giới thiệu tổng quan về “công nghệ nuôi đơn tinh thể”. Chương 5 trình bày “các phương pháp xác định thông số của chất bán dẫn”. Phần còn lại của giáo trình dành để trình bày các loại vật liệu bán dẫn quan trọng. Nội dung của các chương này gồm các vấn đề: công nghệ chế tạo, cấu trúc tinh thể, cấu trúc vùng năng lượng, những thông số, đặc điểm và ứng dụng của vật liệu bán dẫn. Chương 6 giới thiệu “các bán dẫn nguyên tố”, chương 7 giới thiệu nhóm “bán dẫn hợp chất $A^{III}B^V$ ”. Chương 8 giới thiệu nhóm “bán dẫn hợp chất $A^{II}B^{VI}$ ”. Chương 9 giới thiệu các nhóm “bán dẫn hợp chất vô cơ khác” ngoài hai nhóm $A^{III}B^V$ và $A^{II}B^{VI}$. Ở đây chú ý đến nhóm bán dẫn hợp chất hai nguyên $A^{IV}B^{VI}$ và các nhóm bán dẫn hợp chất ba nguyên quan trọng. Chương 10 giới thiệu “bán dẫn hợp chất hữu cơ”. Chương 11 giới thiệu tổng quan về “bán dẫn vô định hình”. Vì đây là loại vật liệu bán dẫn chưa được nghiên cứu một cách đầy đủ về mặt lý thuyết cho nên trong chương này chúng tôi trình bày tổng quan về cấu trúc vô định hình, cấu trúc vùng năng lượng, tính chất điện, tính chất quang của một số bán dẫn vô định hình, những ứng dụng quan trọng của chúng, đặc biệt nhấn mạnh những ứng dụng của silic vô định hình trong lĩnh vực “điện tử tấm lớn”. Chương 12, chương cuối cùng dành để giới thiệu một loại bán dẫn đặc biệt được phân loại không theo tiêu chí thành phần hoá học hay cấu trúc tinh thể mà theo kích thước của cấu trúc thành phần, đó là “bán dẫn thấp chiều”.

Đây có lẽ là “giáo trình vật liệu bán dẫn” đầu tiên bằng tiếng Việt, các tác giả đã gặp không ít những khó khăn về kiến thức, kinh nghiệm cũng như tài liệu tham khảo. Vì vậy chắc chắn giáo trình còn có nhiều sai sót. Chúng tôi rất mong nhận được sự thông cảm, lượng thứ và đặc biệt là sự chỉ giáo của các vị bậc thầy, các bậc đàn anh, các bạn đồng nghiệp và các bạn đọc giả.

Các tác giả xin chân thành cảm ơn GS Đàm Trung Đôn đã đọc bản thảo cuối cùng và đóng góp nhiều ý kiến quý báu cho nội dung của giáo trình này.

Các tác giả

MỤC LỤC

Lời nói đầu	3
Mục lục	5
CHƯƠNG 1. CẤU TRÚC TINH THỂ	13
1.1. Đối xứng tinh thể	13
1.1.1. Mạng tinh thể	13
1.1.2. Nhóm điểm tinh thể	15
1.1.3. Nhóm không gian (Fedorov)	17
1.1.4. Chỉ số Miller	22
1.1.5. Định luật nhiễu xạ Vuff-Bragg	24
1.1.6. Mạng đảo và vùng Brillouin	27
1.2. Liên kết trong tinh thể	31
1.2.1. Liên kết ion	31
1.2.2. Liên kết đồng hoá trị	33
1.2.3. Liên kết kim loại	36
1.2.4. Liên kết Van Der Waals	38
1.3. Sai hỏng trong tinh thể	41
1.3.1. Sai hỏng điểm	42
1.3.2. Sai hỏng đường	43
1.3.3. Sai hỏng khối	45
Bài tập chương 1	45
CHƯƠNG 2. NHỮNG KHÁI NIỆM, TÍNH CHẤT, ĐẶC TRUNG CƠ BẢN CỦA VẬT LIỆU BÁN DẪN	48
2.1. Cấu trúc vùng năng lượng	48
2.2. Nồng độ hạt dẫn cân bằng	55
2.2.1. Bán dẫn tinh khiết (bán dẫn riêng)	57
2.2.2. Bán dẫn một loại tạp donor	58
2.2.3. Bán dẫn một loại tạp acceptor	59
2.2.4. Bán dẫn chứa hai loại tạp chất, bán dẫn bù trừ	60
2.2.5. Bán dẫn suy biến	61
2.3. Các tính chất động	62
2.3.1. Độ dẫn điện	62
2.3.2. Độ dẫn nhiệt và các hiệu ứng nhiệt điện	68
2.3.3. Các hiệu ứng Ganvanic – từ	72
2.4. Bán dẫn không cân bằng	78

2.5. Những cấu trúc cơ bản trong linh kiện bán dẫn.....	83
2.5.1. Tiếp xúc kim loại - bán dẫn	84
2.5.2. Chuyển tiếp P - N đồng chất.....	87
2.5.3. Chuyển tiếp P - N dị chất.....	91
2.5.4. Cấu trúc kim loại - điện môi - bán dẫn (MOS).....	95
2.6. Tính chất quang	100
2.6.1. Các đặc trưng quang của vật liệu bán dẫn	100
2.6.2. Hấp thụ ánh sáng trong bán dẫn	102
2.6.3. Quá trình tái hợp.....	119
2.6.4. Hiệu ứng quang dẫn	125
Bài tập chương 2.....	129
CHƯƠNG 3. PHÂN LOẠI VẬT LIỆU BÁN DẪN.....	133
3.1. Phân loại vật liệu bán dẫn theo thành phần hoá học.....	133
3.1.1. Bán dẫn nguyên tố.....	133
3.1.2. Bán dẫn hợp chất $A^{III}B^V$	134
3.1.3. Bán dẫn hợp chất $A^{II}B^{VI}$	134
3.1.4. Nhóm các hợp chất vô cơ khác.....	135
3.1.5. Các bán dẫn hợp chất hữu cơ.....	137
2.2. Phân loại theo thông số, tính chất vật liệu	137
3.2.1. Phân loại theo cấu trúc của vật liệu	137
3.2.2. Phân loại theo tính chất và bề rộng vùng cấm.....	138
2.3. Phân loại bán dẫn theo lĩnh vực ứng dụng.....	141
CHƯƠNG 4. CÔNG NGHỆ NUÔI ĐƠN TINH THỂ.....	143
4.1. Tổng quan về công nghệ chế tạo đơn tinh thể	143
4.2. Phương pháp kéo đơn tinh thể Czochralski.....	144
4.3. Phương pháp kết tinh định hướng Bridgman.....	146
4.4. Phương pháp nóng chảy vùng.....	148
4.5. Phương pháp nuôi đơn tinh thể từ pha hơi	149
4.6. Hiện tượng phân tách tạp chất.....	149
4.7. Sự phân bố tạp chất trong tinh thể.....	151
4.8. Công nghệ epitaxy	156
4.8.1. Phương pháp epitaxy từ pha hơi.....	157
4.8.2. Epitaxy silic	158
4.8.3. Epitaxy GaAs.....	159
4.8.4. Phương pháp lắng đọng hoá học pha hơi kim loại hữu cơ.....	160
4.8.5. Phương pháp epitaxy pha lỏng.....	160

4.8.6. Epitaxy bằng chùm phân tử.....	162
4.8.7. Cấu trúc màng epitaxy	164
Bài tập chương 4.....	166
CHƯƠNG 5. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ CỦA CHẤT BÁN DẪN	168
5.1. Phân loại các thông số.....	168
5.1.1. Nhóm thông số cơ bản.....	168
5.1.2. Nhóm thông số đặc trưng	168
5.1.3. Nhóm thông số hoá lý	169
5.2. Các phương pháp xác định độ dẫn điện.....	170
5.2.1. Phương pháp hai mũi dò	170
5.2.2. Phương pháp mũi dò di động.....	171
5.2.3. Phương pháp bốn mũi dò	171
5.2.4. Phương pháp Van Der Paul.....	173
5.2.5. Các phương pháp không tiếp xúc.....	174
5.3. Các phương pháp xác định nồng độ hạt dẫn và tạp chất	176
5.3.1. Phương pháp C-V	176
5.3.2. Phương pháp hiệu ứng Hall	180
5.3.3. Các phương pháp quang	185
5.4. Các phương pháp xác định độ linh động của hạt dẫn	190
5.4.1. Xác định độ linh động theo độ dẫn.....	191
5.4.2. Độ linh động Hall	191
5.4.3. Phương pháp thời gian bay đo độ linh động cuốn	193
5.5. Các phương pháp đo thời gian sống của hạt dẫn	195
5.5.1. Khái niệm thời gian sống của hạt dẫn	195
5.5.2. Phương pháp biến điệu độ dẫn bằng tiếp xúc điểm	199
5.5.3. Phương pháp đo thời gian sống theo sự suy giảm của quang dẫn	200
5.5.4. Đo thời gian sống bằng phương pháp so pha.....	201
5.5.5. Phương pháp mũi dò sáng di động	201
Bài tập chương 5.....	203
CHƯƠNG 6. CÁC BÁN DẪN NGUYÊN TỐ.....	206
6.1. Silic	206
6.1.1. Nguyên tố silic.....	206
6.1.2. Công nghệ chế tạo silic đơn tinh thể	206
6.1.3. Cấu trúc tinh thể của silic	212
6.1.4. Cấu trúc vùng năng lượng của silic	215

6.1.5. Những thông số chính của silic	221
6.1.6. Những đặc điểm, ứng dụng silic	223
6.2. Germani	224
6.1.1. Nguyên tố germani	224
6.2.2. Chế tạo germani đơn tinh thể.....	224
6.2.3. Cấu trúc vùng năng lượng của germani	226
6.2.4. Những thông số chính của germani	228
6.2.5. Những đặc điểm ứng dụng germani	230
6.3. Selen.....	230
6.3.1. Nguyên tố selen	230
6.3.2. Cấu trúc tinh thể selen	231
6.3.3. Cấu trúc vùng năng lượng.....	232
6.3.4. Các thông số chính của selen.....	232
6.4. Telua	233
6.4.1. Nguyên tố và cấu trúc tinh thể telua	233
6.4.2. Cấu trúc năng lượng của telua	234
6.4.3. Những thông số chính của telua	236
CHƯƠNG 7. BÁN DẪN HỢP CHẤT A^{III}B^V	237
7.1. Chế tạo và làm sạch các đơn chất	239
7.1.1. Chế tạo và làm sạch B.....	239
7.1.2. Làm sạch Al.....	240
7.1.3. Làm sạch Ga	240
7.1.4. Làm sạch In	241
7.1.5. Làm sạch P	241
7.1.6. Làm sạch As	241
7.1.7. Làm sạch Sb.....	242
7.2. Chế tạo các hợp chất A^{III}B^V	242
7.2.1. Công nghệ chế tạo BP.....	243
7.2.2. Công nghệ chế tạo AlP	243
7.2.3. Công nghệ chế tạo GaP.....	244
7.2.4. Công nghệ chế tạo InP.....	245
7.2.5. Công nghệ chế tạo AlAs	247
7.2.6. Công nghệ chế tạo GaAs	248
7.2.7. Công nghệ chế tạo InAs	248
7.2.8. Công nghệ chế tạo AlSb	249
7.2.9. Công nghệ chế tạo GaSb.....	249
7.2.10. Công nghệ chế tạo InSb	249
7.2.11. Công nghệ epitaxy hợp chất A ^{III} B ^V	250

7.3. Cấu trúc tinh thể của hợp chất $A^{III}B^V$	250
7.4. Liên kết hoá học trong bán dẫn hợp chất $A^{III}B^V$	254
7.5. Cấu trúc vùng năng lượng của hợp chất $A^{III}B^V$	257
7.6. Dung dịch rắn của các hợp chất $A^{III}B^V$	266
7.6.1. Các hệ dung dịch rắn dạng $A^{III}_{1-x}C^{III}_x B^V$	267
7.6.2. Các hệ dung dịch rắn dạng $A^{III}B^V_{1-x}D^V_x$	267
7.6.3. Các hệ dung dịch rắn bốn nguyên hệ $A^{III}_x B^V_y C^{III}_{1-x} D^V_x$	270
7.7. Các tính chất, đặc trưng, ứng dụng của hợp chất $A^{III}B^V$	272
7.7.1. Tính chất động của hợp chất $A^{III}B^V$	272
7.7.2. Tính chất quang của hợp chất $A^{III}B^V$	273
7.7.3. Những ứng dụng của vật liệu $A^{III}B^V$	273
CHƯƠNG 8. BÁN DẪN HỢP CHẤT $A^{II}B^{VI}$	275
8.1. Các nguyên tố nhóm IIB và nhóm VIB	275
8.1.1. Kẽm (Zn)	275
8.1.2. Cadmi (Cd)	278
8.1.3. Thủy ngân (Hg)	278
8.1.4. Lưu huỳnh (S)	278
8.1.5. Selen (Se)	279
8.1.6. Telua (Te)	279
8.2. Những đặc điểm về cấu trúc tinh thể của $A^{II}B^{VI}$	280
8.2.1. Giảm độ trật thái các hệ hai nguyên $A^{II}B^{VI}$	280
8.2.2. Cấu trúc tinh thể các hợp chất $A^{II}B^{VI}$	281
8.2.3. Liên kết hoá học trong hợp chất $A^{II}B^{VI}$	283
8.3. Cấu trúc vùng năng lượng của hợp chất $A^{II}B^{VI}$	283
8.4. Những tính chất, đặc điểm, ứng dụng của hợp chất $A^{II}B^{VI}$	285
CHƯƠNG 9. CÁC BÁN DẪN HỢP CHẤT VÔ CƠ KHÁC	287
9.1. Các bán dẫn hợp chất $A^{IV}B^{VI}$	287
9.2. Các bán dẫn hợp chất hai nguyên khác	290
9.3. Các bán dẫn hợp chất ba nguyên	292
CHƯƠNG 10. BÁN DẪN HỢP CHẤT HỮU CƠ	299
10.1. Cấu trúc tinh thể của bán dẫn hữu cơ	299
10.2. Điện tử σ định xứ và điện tử π không định xứ	302
10.3. Mô hình vùng năng lượng	303

10.4. Độ linh động của hạt dẫn.....	306
10.4.1. Sự phụ thuộc vào nhiệt độ của độ linh động.....	306
10.4.2. Sự phụ thuộc vào áp suất của độ linh động.....	306
10.4.3. Độ linh động trong transistor hiệu ứng trường.....	307
10.5. Hiệu ứng Hall.....	308
10.6. Các cơ chế dẫn điện.....	309
10.6.1. Mô hình lý thuyết vùng.....	309
10.6.2. Mô hình chuyển tiếp đường ngầm.....	309
10.6.3. Mô hình “nhảy cóc”.....	310
10.7. Độ dẫn điện của tinh thể bán dẫn hữu cơ.....	310
10.8. Tính quang dẫn của bán dẫn hữu cơ.....	311
10.9. Quá trình phun điện tích trong polyme liên hợp - Quá trình pha tạp chất.....	313
10.10. Điện huỳnh quang, diode phát quang polyme.....	316
10.11. Những ứng dụng của bán dẫn hữu cơ.....	318
10.11.1. Ứng dụng những tính chất điện.....	318
10.11.2. Ứng dụng những tính chất quang và quang điện.....	318
10.11.3. Bán dẫn hữu cơ được sử dụng như một vật liệu tích cực của laser.....	319
CHƯƠNG 11. BÁN DẪN VÔ ĐỊNH HÌNH.....	320
11.1. Cấu trúc vô định hình.....	320
11.2. Cấu trúc vùng năng lượng điện tử trong chất rắn vô định hình.....	322
11.2.1. Lý thuyết cấu trúc vùng năng lượng điện tử trong chuẩn tinh thể... ..	322
11.2.2. Mẫu Anderson – Mott.....	325
11.3. Cấu trúc vùng năng lượng của bán dẫn vô định hình.....	328
11.3.1. Mẫu Mott-CFO.....	328
11.3.2. Mẫu Davis-Mott.....	329
11.3.3. Mẫu Marshall-Owen.....	329
11.4. Độ dẫn điện của bán dẫn vô định hình.....	330
11.4.1. Cơ chế dẫn điện.....	330
11.4.2. Độ dẫn gần điểm nóng chảy.....	333
11.4.3. Độ linh động cuốn.....	335
11.4.4. Độ dẫn trong trường biến thiên của bán dẫn vô định hình.....	338
11.4.5. Hiệu ứng đảo và hiệu ứng nhớ trong màng mỏng bán dẫn vô định hình.....	339
11.5. Tính chất quang của bán dẫn vô định hình.....	340
11.5.1. Độ quang dẫn và hiệu suất lượng tử.....	341
11.5.2. Dạng phổ hấp thụ ở gần bờ hấp thụ cơ bản.....	343

11.6. Một số bán dẫn vô định hình thông dụng	343
11.6.1. Silic vô định hình.....	343
11.6.2. Các thủy tinh chalcogenua.....	346
11.6.3. Selen vô định hình	348
11.6.4. Bán dẫn vô định hình sử dụng trong kỹ thuật chụp ảnh tĩnh điện .	350
11.7. Những ứng dụng quan trọng của bán dẫn vô định hình.....	352
11.7.1. Pin mặt trời silic vô định hình a-Si:H	352
11.7.2. Hiện thị bản phẳng dùng linh kiện bán dẫn vô định hình.....	355
11.7.3. Diode phát quang vô định hình và vi tinh thể carbua silic.....	358
 CHƯƠNG 12. BÁN DẪN THẤP CHIỀU	362
12.1. Bài toán điện tử trong giếng thế năng một chiều với vách cao vô cực	362
12.2. Những khái niệm, tính chất, đặc trưng của vật liệu bán dẫn thấp chiều	367
12.3. Tổng quan về các cấu trúc bán dẫn hai chiều	370
12.3.1. Cấu trúc MOS.....	370
12.3.2. Cấu trúc chuyển tiếp dị chất	371
12.3.3. Cấu trúc chuyển tiếp dị chất kép	372
12.3.4. Cấu trúc giếng lượng tử liên kết	373
12.3.5. Siêu mạng với cấu trúc chuyển tiếp dị chất	373
12.3.6. Các lớp delta và siêu mạng nipi	375
12.3.7. Siêu mạng các lớp co giãn	377
12.3.8. Siêu mạng bán dẫn vô định hình.....	377
12.4. Những đặc điểm, ứng dụng cấu trúc bán dẫn hai chiều	378
12.4.1. Laser giếng lượng tử hay laser chuyển tiếp dị chất kép.....	379
12.4.2. Điều biến quang dạng giếng lượng tử với cấu trúc chuyển tiếp dị chất kép.....	379
12.4.3. Photodetector có cấu trúc nipi	380
12.4.4. Transistor hiệu ứng trường pha tạp điều biến	381
12.4.5. Transistor đường ngầm cộng hưởng	383
12.5. Chấm lượng tử và triển vọng ứng dụng.....	384
Tài liệu tham khảo	390