

PHÙNG HỒ

GIÁO TRÌNH

VẬT
LÝ
ĐIỆN
TỬ



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI

GS PHÙNG HỒ

GIÁO TRÌNH

VẬT LÝ ĐIỆN TỬ

(In lần thứ 2)



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT
HÀ NỘI 2007

Mục lục

| | |
|---|-----------|
| Chương 1 Chuyển động của hạt tích điện trong chân không. | 9 |
| 1.1 Phương trình chuyển động trong điện trường và từ trường | 9 |
| 1.2 Chuyển động của hạt tích điện trong điện trường đều | 11 |
| 1.3 Chuyển động của hạt tích điện trong từ trường đều | 14 |
| 1.3.1 Trường hợp vận tốc ban đầu vuông góc với từ trường. . . | 15 |
| 1.3.2 Trường hợp tổng quát. | 17 |
| 1.4 Chuyển động dưới tác dụng đồng thời của điện và từ trường . . | 19 |
| 1.4.1 Điện trường và từ trường song song. | 19 |
| 1.4.2 Điện trường và từ trường vuông góc. | 20 |
| 1.5 Sự tương tự quang cơ | 23 |
| 1.6 Chuyển động trong trường tĩnh điện không đều, thấu kính tĩnh điện | 28 |
| 1.7 Chuyển động trong từ trường tĩnh không đều, thấu kính từ . . . | 34 |
| 1.8 Chuyển động với vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng | 36 |
| Chương 2 Một số vấn đề vật lý lượng tử. | 43 |
| 2.1 Lượng tính sóng hạt của các hệ vi mô | 43 |
| 2.1.1 Lượng tính sóng-hạt của bức xạ điện từ. | 44 |
| 2.1.2 Lượng tính sóng-hạt của vật chất. | 48 |
| 2.2 Các tính chất của sóng De Broglie | 51 |
| 2.2.1 Hàm sóng phẳng De Broglie. | 51 |
| 2.2.2 Ý nghĩa xác suất của sóng De Broglie | 53 |
| 2.2.3 Nhóm sóng. Sự lan truyền của sóng De Broglie. | 54 |
| 2.3 Nguyên lý bất định Heisenberg | 58 |
| 2.3.1 Hệ thức bất định về tọa độ và xung lượng của hạt. | 58 |
| 2.3.2 Hệ thức bất định về năng lượng và thời gian. | 59 |
| 2.3.3 Nguyên lý bổ sung. | 60 |
| 2.4 Phương trình cơ bản của cơ học lượng tử | 60 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.4.1 | Hạt tự do. | 61 |
| 2.4.2 | Hạt trong một trường lực. | 62 |
| 2.5 | Toán tử trong cơ học lượng tử. | 63 |
| 2.5.1 | Khái niệm toán tử. | 63 |
| 2.5.2 | Toán tử và các đại lượng vật lý. | 66 |
| 2.6 | Một số bài toán đơn giản của cơ học lượng tử. | 70 |
| 2.6.1 | Chuyển động của hạt tự do. | 70 |
| 2.6.2 | Hạt trong hố thế năng. | 71 |
| 2.6.3 | Hiệu ứng đường ngầm (tunnel). | 76 |
| 2.6.4 | Dao động tử điều hoà (oscillator). | 78 |
| 2.6.5 | Quay tử rắn. | 80 |
| Chương 3 Phổ năng lượng của các hệ hạt lượng tử. | | 85 |
| 3.1 | Bài toán về nguyên tử hydro và các ion đồng dạng. | 86 |
| 3.2 | Hệ nhiều điện tử, nguyên lý loại trừ Pauli. | 95 |
| 3.2.1 | Hệ nhiều điện tử. | 95 |
| 3.2.2 | Spin của điện tử. | 97 |
| 3.2.3 | Nguyên lý không thể phân biệt các hạt cùng loại. Nguyên lý loại trừ Pauli. | 100 |
| 3.2.4 | Cấu hình điện tử của nguyên tử. | 102 |
| 3.3 | Trạng thái điện tử của nguyên tử. | 105 |
| 3.3.1 | Trạng thái điện tử của nguyên tử hydro. | 108 |
| 3.3.2 | Phổ năng lượng của nguyên tử He, para-He và orto-He. | 108 |
| 3.3.3 | Phổ năng lượng của các nguyên tố nhóm II. | 111 |
| 3.3.4 | Trạng thái điện tử của nguyên tử carbon. | 114 |
| 3.3.5 | Một số quy luật trong phổ năng lượng các nguyên tử. | 114 |
| 3.3.6 | Quy tắc Hund. | 115 |
| 3.3.7 | Chuyển mức năng lượng, quy tắc chọn lọc. | 116 |
| 3.4 | Phổ năng lượng của phân tử. | 117 |
| 3.4.1 | Trạng thái năng lượng dao động. | 120 |
| 3.4.2 | Trạng thái năng lượng quay. | 121 |
| 3.4.3 | Quang phổ của phân tử. | 121 |
| 3.5 | Phổ năng lượng của điện tử trong tinh thể chất rắn. | 123 |
| 3.5.1 | Hàm sóng điện tử trong trường tuần hoàn. | 125 |
| 3.5.2 | Phương trình Schrödinger của tinh thể. | 126 |
| 3.5.3 | Phương pháp gần đúng liên kết yếu. | 129 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3.5.4 | Phương pháp gần đúng liên kết mạnh. | 130 |
| 3.5.5 | Điều kiện biên tuần hoàn của hàm sóng. | 132 |
| 3.5.6 | Phổ năng lượng điện tử khi có từ trường ngoài tác dụng. Các hiện tượng cộng hưởng từ. | 134 |
| 3.6 | Nguyên lý hoạt động của laser | 140 |
| 3.6.1 | Mô hình hai mức năng lượng. | 140 |
| 3.6.2 | Nguyên lý hoạt động của laser. | 146 |
| Chương 4 Một số vấn đề vật lý bán dẫn. | | 157 |
| 4.1 | Điện tử trong tinh thể bán dẫn | 157 |
| 4.1.1 | Sự thay đổi mức năng lượng trong điện trường ngoài. . . | 157 |
| 4.1.2 | Chuyển động của điện tử trong tinh thể bán dẫn. | 160 |
| 4.2 | Cấu trúc vùng năng lượng của chất bán dẫn | 163 |
| 4.3 | Nồng độ điện tử và lỗ trống trong điều kiện cân bằng | 165 |
| 4.3.1 | Bán dẫn riêng (bán dẫn tinh khiết). | 167 |
| 4.3.2 | Bán dẫn chứa một loại tạp chất dono. | 168 |
| 4.3.3 | Bán dẫn chứa một loại tạp chất axepto. | 171 |
| 4.3.4 | Bán dẫn bù trừ, chứa hai loại tạp chất. | 172 |
| 4.3.5 | Bán dẫn suy biến. | 173 |
| 4.4 | Nồng độ hạt dẫn không cân bằng | 173 |
| 4.5 | Độ dẫn điện của chất bán dẫn | 176 |
| 4.6 | Các hiện tượng phát xạ điện tử | 179 |
| 4.7 | Các hiệu ứng tiếp xúc | 183 |
| 4.7.1 | Hiệu thế tiếp xúc ngoài. | 183 |
| 4.7.2 | Hiệu thế tiếp xúc trong giữa hai kim loại. | 184 |
| 4.7.3 | Hiệu ứng trường. Sự uốn cong vùng năng lượng của bán dẫn trong điện trường. | 184 |
| 4.7.4 | Tiếp xúc kim loại-bán dẫn loại n | 188 |
| 4.7.5 | Tiếp xúc kim loại-bán dẫn loại p | 190 |
| 4.7.6 | Đặc tuyến V-A của các tiếp xúc đồng kim loại-bán dẫn. . | 193 |
| 4.8 | Bán dẫn không đồng nhất, chuyển tiếp $p-n$ | 194 |
| 4.8.1 | Lớp chuyển tiếp $p-n$ | 195 |
| 4.8.2 | Sự phân bố điện tích trong chuyển tiếp $p-n$ đột biến . . . | 195 |
| 4.8.3 | Điện trường trong lớp chuyển tiếp $p-n$ | 196 |
| 4.8.4 | Sơ đồ vùng năng lượng trong chuyển tiếp $p-n$ | 198 |
| 4.8.5 | Phân bố nồng độ hạt dẫn trong lớp chuyển tiếp $p-n$ | 199 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| 4.8.6 | Tính chỉnh lưu của chuyển tiếp $p-n$ | 200 |
| 4.8.7 | Bề dày lớp chuyển tiếp $p-n$ | 204 |
| 4.8.8 | Chuyển tiếp dị chất. | 206 |
| Chương 5 | Xử lý tín hiệu quang. | 211 |
| 5.1 | Sóng điện từ | 211 |
| 5.1.1 | Hệ phương trình Maxwell. | 211 |
| 5.1.2 | Phương trình sóng đối với trường điện từ. | 213 |
| 5.1.3 | Sóng điện từ phẳng. | 215 |
| 5.2 | Sự lan truyền của ánh sáng trong linh kiện dẫn sóng quang | 218 |
| 5.2.1 | Hệ sợi quang - mạch quang tích hợp và những đặc điểm. | 218 |
| 5.2.2 | Kiểu truyền sóng (mode) trong linh kiện dẫn sóng quang. | 220 |
| 5.2.3 | Phương thức truyền sóng trong linh kiện dẫn sóng quang theo mô hình quang học tia (ray-optics). | 224 |
| 5.2.4 | Cấu trúc linh kiện dẫn sóng quang trong mạch quang tích hợp. | 229 |
| 5.3 | Sợi quang | 232 |
| 5.3.1 | Tính chất, phân loại và công nghệ chế tạo. | 232 |
| 5.3.2 | Các mode dẫn truyền trong sợi quang giạt cấp. | 236 |
| 5.3.3 | Sự hạn chế độ rộng dải thông do tán sắc giữa các mode trong sợi quang giạt cấp đa mode. | 240 |
| 5.3.4 | Sợi quang liên tục đa mode. | 242 |
| 5.3.5 | Sợi quang giạt cấp đơn mode. | 243 |
| 5.3.6 | Tổn hao trong sợi quang. | 245 |
| 5.4 | Nguyên lý điều biến quang | 246 |
| 5.4.1 | Nguyên lý điều biến điện quang. | 248 |
| 5.4.2 | Nguyên lý điều biến cơ-quang. | 251 |
| 5.5 | Những nguyên lý cơ bản của các linh kiện phát quang bán dẫn | 253 |
| 5.5.1 | Đặc điểm cấu trúc vùng năng lượng của chất bán dẫn. | 253 |
| 5.5.2 | Chuyển mức năng lượng, quá trình hấp thụ. | 255 |
| 5.5.3 | Tái hợp bức xạ tự phát. Điốt phát quang (LED). | 258 |
| 5.5.4 | Tái hợp bức xạ kích thích. Laser bán dẫn. | 263 |
| 5.6 | Những nguyên lý cơ bản của linh kiện thu quang (photodetector) | 272 |
| 5.6.1 | Linh kiện quang dẫn hay quang trở. | 273 |
| 5.6.2 | Photodiốt. | 275 |

Lời nói đầu

Từ lâu vật lý đã là cơ sở khoa học của nhiều ngành kỹ thuật, đặc biệt là ngành kỹ thuật điện tử, viễn thông. Ngày càng nhiều những thành tựu khoa học vật lý được nhanh chóng ứng dụng vào kỹ thuật điện tử, viễn thông.

Kỹ sư điện tử, hơn ai hết, cần có những hiểu biết sâu sắc về vật lý hiện đại. Vì vậy ngoài giáo trình "Vật lý đại cương" chung cho tất cả các ngành kỹ thuật, trong chương trình đào tạo kỹ sư điện tử được bổ sung thêm giáo trình "Vật lý điện tử".

Giáo trình "Vật lý điện tử" nhằm mục đích cung cấp thêm cho sinh viên những hiểu biết về vật lý hiện đại liên quan trực tiếp đến ngành kỹ thuật điện tử, viễn thông. Năm 1981, Phó giáo sư Nguyễn Minh Hiến, với mục đích trên, đã biên soạn tập "Các bài giảng về vật lý điện tử".

Gần đây do yêu cầu hiện đại hóa nội dung chương trình giảng dạy, khoa Điện tử - Viễn thông trường Đại học Bách khoa Hà nội đã xây dựng một đề cương mới cho môn học "Vật lý điện tử". "Giáo trình Vật lý điện tử" này được biên soạn dựa theo đề cương đó. Tuy nhiên, để cho giáo trình được mạch lạc, sự sắp xếp các chương mục trong giáo trình có ít nhiều thay đổi so với đề cương môn học.

Giáo trình được chia làm năm chương, gồm ba đơn vị học trình với thời lượng 45 tiết. Chương thứ nhất trình bày "Chuyển động của các hạt tích điện trong chân không dưới tác dụng của điện trường và từ trường". Chương thứ hai giới thiệu "Một số vấn đề vật lý lượng tử", cung cấp những hiểu biết cơ bản để tiếp tục nghiên cứu những chương sau. Chương thứ ba trình bày "Phổ năng lượng của các hệ hạt lượng tử", từ nguyên tử hydro đơn giản, nguyên tử có nhiều điện tử, phân tử và cuối cùng đến tinh thể chất rắn. Chương thứ tư đề cập "Một số vấn đề Vật lý bán dẫn", giới thiệu những khái niệm cần thiết nhất để nghiên cứu vật lý linh kiện điện tử, linh kiện quang điện tử. Chương thứ năm giới thiệu "những cơ sở vật lý của quá trình truyền và xử lý tín hiệu quang", đề cập những cơ sở vật lý của các linh kiện quang điện tử như linh

kiện dẫn sóng quang, sợi quang, điều biến tín hiệu quang, nguồn phát quang, thu tín hiệu quang, tách sóng quang. Cuối mỗi chương có bài tập kèm theo đáp số.

Giáo trình Vật lý điện tử này đã được lưu hành nội bộ từ năm 1976 và được tác giả cùng một số đồng nghiệp sử dụng để giảng dạy cho sinh viên hệ chính quy và hệ tại chức ngành điện tử-viễn thông trường Đại học Bách khoa Hà nội cũng như cho sinh viên ngành điện tử-viễn thông ở một vài trường đại học khác trong nước. Do yêu cầu cấp bách về tài liệu giảng dạy và học tập, nghiên cứu chúng tôi xuất bản rộng rãi "Giáo trình Vật lý điện tử" nhằm phục vụ kịp thời đông đảo bạn đọc. Chúng tôi rất mong được sự góp ý của các bạn đọc về những sai sót chắc chắn khó tránh khỏi trong sách.

Tác giả.

Chương 1

CHUYỂN ĐỘNG CỦA CÁC HẠT TÍCH ĐIỆN TRONG CHÂN KHÔNG DƯỚI TÁC DỤNG CỦA ĐIỆN TRƯỜNG VÀ TỪ TRƯỜNG

Ngày nay rất nhiều những dụng cụ điện tử chân không (thường gọi là đèn điện tử) đã lỗi thời và không được sử dụng. Tuy nhiên vẫn còn nhiều dụng cụ điện tử quan trọng ứng dụng sự chuyển động của các hạt tích điện dưới tác dụng của điện và từ trường như: ống tia điện tử của máy dao động ký điện tử, ống hình của máy thu hình, kính hiển vi điện tử, máy gia tốc, khối phổ kế... Vì vậy những kiến thức về sự chuyển động của điện tử trong chân không dưới tác dụng của điện và từ trường vẫn rất cần thiết cho những chuyên gia của ngành điện tử.

1.1 Phương trình chuyển động của hạt tích điện trong điện trường và từ trường không đổi

Giả sử trong không gian tồn tại một điện trường tĩnh với vec-tơ cường độ điện trường \vec{E} và một từ trường tĩnh với vec-tơ cảm ứng từ \vec{B} . Một hạt có khối lượng m , có điện tích q sẽ chịu một lực tác dụng là

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1.1)$$

Trong hệ SI, \vec{F} đo bằng N, q đo bằng C, \vec{E} đo bằng V/m, \vec{v} đo bằng m/s và \vec{B} đo bằng T. Phương trình chuyển động của hạt sẽ là:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1.2)$$