

SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

2^e et 3^e cycles • Écoles d'ingénieurs

OPTOÉLECTRONIQUE

2^e édition

Emmanuel Rosencher
Borge Vinter

DUNOD

Table des matières

AVANT-PROPOS

xiii

CHAPITRE 1 • MÉCANIQUE QUANTIQUE DE L'ÉLECTRON

1.1	Introduction	1
1.2	Postulats de la mécanique quantique	1
1.3	Équation de Schrödinger indépendante du temps	5
1.4	Le puits quantique	7
1.5	Perturbations indépendantes du temps	13
1.6	Perturbations dépendantes du temps et probabilités de transition	15
1.7	La matrice densité	20

Compléments du chapitre 1

1.A	Problèmes posés par les continnum : boîte fictive et densité d'états	25
1.B	Perturbation sur un état dégénéré	28
1.C	Effets Stark dans les puits quantiques	32
1.D	L'oscillateur harmonique	35
1.E	Probabilité de transition et oscillation de Rabi	42

CHAPITRE 2 • MÉCANIQUE QUANTIQUE DU PHOTON

2.1	Introduction	47
2.2	Les équations de Maxwell dans l'espace réciproque	47

2.3	Propriétés de la transformation de Fourier	49
2.4	Quantification des ondes électromagnétiques	51
2.5	Le photon	54
2.6	L'état cohérent	57
2.7	Le spectre du corps noir	60
Compléments du chapitre 2		64
2.A	Champ rayonné par une charge oscillante. Jauge de Lorentz	64
2.B	Éléments de thermographie	71
CHAPITRE 3 • MÉCANIQUE QUANTIQUE DE L'INTERACTION ÉLECTRON-PHOTON		77
3.1	Introduction	77
3.2	Hamiltonien dipolaire d'interaction électron-photon	77
3.3	Susceptibilité linéaire optique par la matrice densité	79
3.4	Susceptibilité linéaire optique, absorption et gain optique	82
3.5	Équations de bilan	84
3.6	Émission spontanée et durée de vie radiative	88
3.7	Transitions polychromatiques : les équations d'Einstein	93
3.8	Les équations de bilan revisitées	94
Compléments du chapitre 3		98
3.A	Élargissement homogène et inhomogène. Cohérence de la lumière	98
3.B	Perturbations dépendantes du temps du second ordre	104
3.C	Coefficients d'Einstein	110
3.D	Équivalence des hamiltoniens A, p et D, E	112
CHAPITRE 4 • OSCILLATIONS LASERS		117
4.1	Introduction	117
4.2	Inversion de population et amplification optique	117
4.3	Systèmes à trois et quatre niveaux	121
4.4	Résonateurs optiques. Seuil d'oscillation laser	124
4.5	Caractéristiques du laser	127
4.6	Équations de bilan d'une cavité. Comportement dynamique des lasers	133

Compléments du chapitre 4	142
4.A Effet de l'émission spontanée. Condensation photonique	142
4.B Saturation dans les amplificateurs lasers	145
4.C Équations électrodynamiques du laser.	151
4.D Largeur de raie de Schawlow-Townes. Force de Langevin	157
4.E Une étude de cas : le laser pompé par diodes	163
CHAPITRE 5 • STRUCTURES DE BANDES DES SEMICONDUCTEURS	169
5.1 Introduction	169
5.2 Structures cristallines, ondes de Bloch et zone de Brillouin	169
5.3 Bandes d'énergie	174
5.4 Masses effectives et densité d'états	176
5.5 Interprétation dynamique des masses effectives et notion de trous	179
5.6 Statistiques de porteurs dans les semiconducteurs	183
Compléments du chapitre 5	194
5.A Modèle de l'électron quasi libre	194
5.B Combinaisons linéaires d'orbitales atomiques. Liaisons fortes	197
5.C Théorie k,p de Kane	200
5.D Défauts profonds dans les semiconducteurs	206
CHAPITRE 6 • PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES DES SEMICONDUCTEURS	209
6.1 Introduction	209
6.2 L'équation de Boltzmann	209
6.3 Mécanismes de diffusion (scattering)	215
6.4 Électrons chauds (<i>hot electrons</i>)	219
6.5 Recombinaison	224
6.6 Les équations de transport dans un semiconducteur	227
Compléments du chapitre 6	232
6.A Effet Hall	232
6.B Phonons optiques et interaction de Fröhlich	234
6.C Avalanche	243
6.D Recombinaison Auger	246

CHAPITRE 7 • PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES SEMICONDUCTEURS	253
7.1 Éléments dipolaires dans les semiconducteurs à gap direct	253
7.2 Susceptibilité optique d'un semiconducteur	257
7.3 Absorption et émission spontanée	261
7.4 Coefficient de recombinaison bimoléculaire	268
7.5 Conditions d'amplification optique dans les semiconducteurs	271
Compléments du chapitre 7	276
7.A Électromodulateur à effet Franz-Keldysh	276
7.B Indice optique des semiconducteurs	282
7.C Absorption par porteurs libres	286
CHAPITRE 8 • HÉTÉROSTRUCTURES SEMICONDUCTRICES ET PUIITS QUANTIQUES	295
8.1 Le formalisme de la fonction enveloppe	297
8.2 Puits quantique	302
8.3 Densité d'états et statistique dans un puits quantique	306
8.4 Transitions optiques interbande dans un puits quantique	309
8.5 Transitions optiques intersousbande dans un puits quantique	316
8.6 Absorption optique et angle d'incidence	319
Compléments du chapitre 8	326
8.A Fils et boîtes quantiques	326
8.B Les excitons	328
8.C Effet Stark confiné. L'électromodulateur SEED	334
8.D Sousbandes de valence	337
CHAPITRE 9 • GUIDES D'ONDE	341
9.1 Introduction	341
9.2 Approche géométrique des guides d'onde	342
9.3 Approche ondulatoire des guides d'onde	344
9.4 Confinement optique	352
9.5 Couplage entre modes guidés. Théorie des modes couplés	354

Compléments du chapitre 9	358
9.A Couplage optique entre guides. Commutateurs électro-optiques	358
9.B Guide de Bragg	363
9.C Conversion de fréquence dans les guides non linéaires	368
9.D Cavity Fabry-Pérot. Miroirs de Bragg	374
CHAPITRE 10 • QUELQUES CONCEPTS DES COMPOSANTS À SEMICONDUCTEURS	385
10.1 Les phénomènes de surface	386
10.2 La jonction Schottky	389
10.3 La jonction p-n	393
Compléments du chapitre 10	403
10.A Quelques variantes de diodes	403
10.B Courants de fuite dans les diodes	407
CHAPITRE 11 • PHOTODÉTECTEURS À SEMICONDUCTEURS	411
11.1 Distribution de porteurs dans un semiconducteur photoexcité	412
11.2 Photoconducteurs	417
11.3 Détecteur photovoltaïque	422
11.4 Photodétecteur à émission interne	431
11.5 Photodétecteur à puits quantiques	434
11.6 Photodétecteur à avalanche	441
Compléments du chapitre 11	445
11.A Bruit dans les détecteurs	445
11.B Détektivité limite. Performance limitée par le fond (BLIP)	459
CHAPITRE 12 • CONVERSION DE FRÉQUENCES OPTIQUES	465
12.1 Description mécanique de la génération de seconde harmonique	466
12.2 Description électromagnétique de l'interaction optique non linéaire quadratique	470
12.3 Génération de seconde harmonique optique	473
12.4 Relations de Manley-Rowe	475
12.5 L'amplification paramétrique	478
12.6 Oscillateurs Paramétriques Optiques (OPO)	479
12.7 Somme de fréquences, différence de fréquences et oscillation paramétrique	484

Compléments du chapitre 12	489
12.A Modèle quantique de susceptibilité non linéaire quadratique	489
12.B Scénarii d'accord de phase dans les semiconducteurs	495
12.C Déplétion de la pompe dans l'interaction paramétrique	503
12.D Caractéristiques spectrales et temporelles des oscillateurs paramétriques optiques	507
12.E Interactions paramétriques en cavité laser	515
12.F Puissances de sortie des oscillateurs paramétriques optiques en régime continu	519
CHAPITRE 13 • DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES ET DIODES LASER	527
13.1 Introduction	527
13.2 Injection électrique et densités de porteurs hors d'équilibre	528
13.3 Diodes électroluminescentes	531
13.4 Amplification optique dans des diodes à hétérojonctions	537
13.5 Diodes laser à double hétérojonction	541
13.6 Diodes laser à puits quantiques	548
13.7 Comportement temporel des diodes laser	561
13.8 Quelques caractéristiques du rayonnement des diodes laser	564
Compléments du chapitre 13	568
13.A Laser à contre-réaction répartie	568
13.B Lasers à puits quantiques contraints	572
13.C Lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)	576
13.D Aspects thermiques des diodes laser. Diodes laser de puissance	581
13.E Émission spontanée dans les lasers à semiconducteurs	586
13.F Effet de saturation du gain. Facteur K	591
13.G Bruit et largeur de raie d'une diode laser	598
13.H Lasers unipolaires à cascade quantique	604
13.I Compétition de modes. Transmodulateur à saturation de gain croisé	607
ANNEXE	611
INDEX	613