

Formations & Techniques

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX POUR L'ELECTRONIQUE

Cours et exercices corrigés

Olivier Vanbésien





2-621-824-1



PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES MATÉRIAUX POUR L'ÉLECTRONIQUE

Cours et exercices corrigés

Olivier Vanbésien



Table des matières

Première partie : Eléments de physique statistique	15
Chapitre 1 : Physique statistique classique	17
I. Définitions	17
1. Etat microscopique d'un système	17
2. Entropie statistique	19
3. De l'espace des phases au domaine des énergies	20
II. La fonction de distribution de Boltzmann	21
1. Système isolé	21
2. Système fermé	22
3. Système ouvert	23
4. Interprétation physique	24
III. Distribution des vitesses de Maxwell	25
1. Distribution de Maxwell	25
2. Principe d'équipartition	26
IV. Exercices	27
<i>Exercice 1 : Espace des phases</i>	27
<i>Exercice 2 : Gaz parfait – Distribution de Maxwell</i>	28
<i>Exercice 3 : Gaz parfait – Energie potentielle</i>	28
V. Corrections	29
Chapitre 2 : Les statistiques quantiques	37
I. Définitions	37
1. Le passage classique-quantique	37
2. Les grands principes	38
II. Les lois de distribution quantique	41
1. Loi de Bose-Einstein	42
2. Loi de Fermi-Dirac	43
3. Signification des multiplicateurs de Lagrange	44
4. Retour à Boltzmann	44
III. Exercices	45

<i>Exercice 1 : Notions de base</i>	45
<i>Exercice 2 : Etude d'un gaz d'électrons</i>	46
IV. Corrections	48
Deuxième Partie : Applications à des systèmes gazeux	55
<i>Chapitre 3 : Le rayonnement thermique</i>	57
I. Introduction	57
II. Calcul de l'énergie des ondes électromagnétiques	58
1. Calcul de la luminance énergétique spectrale	58
2. Evolutions qualitatives	60
<i>Chapitre 4 : Gaz d'électrons dans un semi-conducteur</i>	63
I. Introduction	63
II. Modèle à deux bandes	63
1. Les cristaux covalents	63
2. Structures de bandes dans un semi-conducteur	64
3. Concept de masse effective	66
4. Concept de trou – Peuplement des bandes d'énergie	68
III. Calcul des densités d'états	69
IV. Le semi-conducteur intrinsèque	71
1. Calcul des concentrations de porteurs libres	71
2. Concentration intrinsèque de porteurs libres	74
3. Calcul du niveau de Fermi	74
4. Approche quantitative	75
V. Le semi-conducteur extrinsèque	75
1. Choix des impuretés	75
2. Etude qualitative du dopage : équations de base	77
3. Cas limites	79
VI. Exercices	80
<i>Exercice 1 : Masse effective</i>	80
<i>Exercice 2 : Modèle à deux niveaux</i>	80
<i>Exercice 3 : Densité d'états bidimensionnelle</i>	81
<i>Exercice 4 : Le fil quantique – densité d'états</i>	81
<i>Exercice 5 : Densité d'états et non-parabolicité</i>	82
<i>Exercice 6 : Approximations de Boltzmann</i>	83
<i>Exercice 7 : Conductivité électrique</i>	84

<i>Exercice 8 : Résistivité</i>	84
<i>Exercice 9 : Compensation d'un matériau semi-conducteur</i>	85
<i>Exercice 10 : Statistique du semi-conducteur</i>	86
<i>Exercice 11 : Synthèse</i>	86
VII. Corrections	90
Chapitre 5 : Gaz d'électrons hors-équilibre	103
I. Introduction	103
II. Equation de transport de Boltzmann	103
1. La fonction de distribution	104
2. Equation de transport de Boltzmann	105
3. Interactions – Mobilité – Diffusion	106
III. Equations des courants : modèle de dérive-diffusion	108
1. Approche classique ; courant de conduction	108
2. Approche particulière	111
3. Equations de conservation de la charge	114
4. Synthèse	115
IV. Exercices	116
<i>Exercice 1 : La photoconductivité</i>	116
<i>Exercice 2 : Approche intuitive de la jonction p-n</i>	118
<i>Exercice 3 : Photo-détecteur – Distribution des photo-porteurs</i>	119
<i>Exercice 4 : Diffusion de porteurs minoritaires</i>	121
<i>Exercice 5 : Diffusion – Expérience de Shockley-Haines</i>	122
<i>Exercice 6 : La jonction n-i-n</i>	123
V. Corrections	127
Troisième partie : Propriétés thermiques, diélectriques, magnétiques et supraconductrices des solides	141
Chapitre 6 : Vibrations et chaleur spécifique	143
I. Introduction	143
II. Théorie de Dulong et Petit (classique)	143
III. Théorie d'Einstein	145
IV. Théorie de Debye	146
V. Interaction électron-phonon	148
VI. Exercices	149
<i>Exercice 1 : Energie de vibration dans un système bidimensionnel</i>	149

<i>Exercice 2 : Gaz de phonons bi- et uni-dimensionnel</i>	150
VII. Corrections	150
Chapitre 7 : Propriétés diélectriques des matériaux	155
I. Mise en évidence	155
II. Le vecteur polarisation	155
1. Actions du champ électrique	155
2. Potentiel créé par un dipôle électrique	157
3. Le vecteur polarisation	157
III. Champ électrique créé par un matériau polarisé	158
1. Calcul du potentiel et du champ électrique	158
2. Exemple de charges fictives de polarisation	159
IV. Le vecteur induction	160
V. Diélectriques linéaires homogènes et isotropes	162
VI. Une approche microscopique de la permittivité	164
1. Le champ local	164
2. Polarisation induite	165
3. Polarisation d'orientation	165
4. Calcul de $\langle \cos \theta \rangle$	166
VII. Exercices	168
<i>Exercice 1 : Le condensateur plan</i>	168
<i>Exercice 2 : Un diélectrique feuilleté</i>	168
VIII. Corrections	169
Chapitre 8 : Propriétés magnétiques des matériaux	177
I. Faits fondamentaux	177
II. Courants moléculaires d'Ampère, vecteur aimantation	178
III. Potentiel vecteur créé par un matériau aimanté	180
IV. Propriétés fondamentales du champ magnétique	182
V. Le vecteur excitation magnétique	182
VI. Matériaux magnétiques linéaires homogènes et isotropes	182
VII. Diamagnétisme et Paramagnétisme	183
VIII. Approche microscopique	183
1. Moments magnétiques élémentaires	183
2. Rappels sur les équations du mouvement	184
3. Calcul de l'énergie	184
4. La diamagnétisme	185

5. Le paramagnétisme	185
IX. Exercice	188
<i>Exercice 1 : Calcul d'aimantation</i>	188
X. Correction	189
Chapitre 9 : La supraconductivité (brève introduction)	193
I. Introduction	193
1. Définitions	193
2. Un peu d'histoire	194
II. Propriétés fondamentales	195
1. La résistivité	195
2. Diamagnétisme parfait : Effet Meissner	196
3. Notion de champ critique / courant critique	197
III. Aspects théoriques	197
1. D'une théorie phénoménologique vers une théorie microscopique	197
2. Les supraconducteurs à haute température	198
IV. Applications	199
1. En électronique : la jonction SIS – Effet Josephson	199
2. En électrotechnique : câble supraconducteur	200
Quatrième partie : Physique des dispositifs électroniques à semi-conducteurs	201
Chapitre 10 : Les jonctions (I) – Principes et Homo-jonctions	203
I. Introduction	203
1. Le contexte	203
2. Description des matériaux	203
3. Les différentes jonctions	205
4. Méthodologie d'analyse des jonctions à l'équilibre thermodynamique	205
II. La jonction p-n	206
1. Approche à l'équilibre thermodynamique	206
2. La jonction p-n hors équilibre	212
3. Applications	217
III. Exercices	218
<i>Exercice 1 : La jonction p-n graduelle</i>	218

<i>Exercice 2 : Conductance et capacité de diffusion d'une jonction p-n</i>	219
<i>Exercice 3 : La diode photovoltaïque</i>	222
IV. Corrections	224
Chapitre 11 : Les jonctions (II) – Les hétérojonctions métallo-diélectriques	231
I. Introduction	231
II. La jonction métal/semi-conducteur	231
1. Approche qualitative : physique de la jonction	231
2. Approche quantitative de la jonction Schottky : structure de bandes	234
3. La jonction Schottky hors équilibre	235
4. Applications	240
III. La jonction métal/isolant/semi-conducteur	241
1. Principe	241
2. Effet de champ pour un semi-conducteur extrinsèque	242
IV. Exercices	252
<i>Exercice 1 : Contact Métal/Semi-conducteur</i>	253
<i>Exercice 2 : Capacité d'une jonction Schottky</i>	253
<i>Exercice 3 : La diode Schottky</i>	253
<i>Exercice 4 : Jonction MIS – semi-conducteur intrinsèque</i>	255
V. Corrections	256
Chapitre 12 : Les jonctions (III) – Les hétérojonctions semi-conductrices	263
I. Introduction	263
II. Formation des hétérojonctions semi-conductrices	263
1. Aspects cristallins	263
2. Schéma d'étude	265
3. Exemple 1 : $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (dopé N_D) / GaAs (nid)	267
4. Exemple 2 : Hétérojonction multiple	268
III. De l'introduction des effets ondulatoires	269
1. Une équation de propagation pour l'électron	269
2. La quantification de l'énergie : le puits de potentiel infini	271
3. L'effet tunnel : la marche de potentiel	273
4. Structure ouverte : estimation du courant	275

IV. Exercices	278
<i>Exercice 1 : Hauteurs de barrière</i>	278
<i>Exercice 2 : Hétéro-structure à dopage modulé</i>	279
<i>Exercice 3 : Un puits semi-infini</i>	280
<i>Exercice 4 : Transmission d'une marche de potentiel</i>	281
<i>Exercice 5 : Energies de résonance</i>	282
V. Corrections	283
Chapitre 13 : Composants nanométriques et Architectures alternatives	291
I. Introduction	291
II. Composants à hétérojonctions semi-conductrices	291
1. La diode simple barrière à hétéro-structure	291
2. La diode à effet tunnel résonnant	294
III. Structuration multidimensionnelle	298
1. Puits, fils et boîtes quantiques	298
2. La quantification de conductance	302
IV. Nouvelles architectures	303
1. Les guides d'ondes électroniques	303
2. Les automates quantiques cellulaires	304
3. L'ordinateur quantique	305
V. Exercices	307
<i>Exercice 1 : Transmission au travers d'une barrière de potentiel</i>	307
<i>Exercice 2 : Structure simple barrière</i>	308
<i>Exercice 3 : Structure double barrière – simple puits</i>	310
<i>Exercice 4 : Structure double barrière – simple puits (suite)</i>	311
<i>Exercice 5 : Conduction dans les diodes à effet tunnel résonnant</i>	313
<i>Exercice 6 : Le fil quantique</i>	314
<i>Exercice 7 : Guides d'ondes électroniques</i>	315
<i>Exercice 8 : Les automates quantiques cellulaires</i>	316
VI. Corrections	318
Conclusion – Bibliographie	329
Index	331

Formations & Techniques

La collection *Formations & Techniques* propose des ouvrages de référence dans tous les domaines pour les futurs techniciens et ingénieurs, ou encore pour les professionnels confirmés dans le cadre de leur formation continue.

Cet ouvrage de physique appliquée combine les approches de la physique statistique, de la physique du solide et de la physique quantique (mécanique ondulatoire) pour proposer des modèles analytiques permettant d'exploiter les différents matériaux disponibles pour mettre en perspective à la fois les fonctionnalités les plus classiques de l'électronique mais aussi les approches reliées aux avancées de la nanoélectronique. Une large importance est accordée aux matériaux semi-conducteurs et à l'étude détaillée des jonctions réalisées à base de ces derniers. Chaque thème est abordé sous forme d'un cours auquel sont généralement associés des exercices et leurs corrigés détaillés. L'approche est progressive et ce livre est conçu pour accompagner les étudiants à partir de la deuxième année de licence (sciences exactes et sciences pour l'ingénieur) jusqu'au master (dans les domaines de l'EEA).

Olivier Vanbésien est Professeur des Universités au sein de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lille et Chercheur à l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN – UMR CNRS 8520) de Villeneuve-d'Ascq.