



Electronique et photo-électronique des matériaux et composants 1

électronique des matériaux

André Moliton

hermes

Lavoisier



TABLE DES MATIÈRES

Préface	15
François-Noël FAVENNEC	
Avant-propos	17
Chapitre 1. Introduction : distribution des électrons	
et signification physique du niveau de Fermi	19
1.1. Rappels : les différentes fonctions de distribution des corpuscules . . .	19
1.1.1. Distributions classiques	19
1.1.2. Distributions de particules indiscernables (de même nature) . . .	22
1.2. Niveau de Fermi d'un système à l'équilibre thermodynamique	
et signification physique	24
1.2.1. Forme de l'entropie d'un système : rappel	24
1.2.2. Rappels de quelques propriétés de la statistique de Fermi-Dirac . . .	25
1.2.3. Calcul de la variation d'entropie suite à l'introduction	
d'un électron.	25
1.2.4. Signification physique de E_F	27
1.3. Conclusion : propriétés de E_F	28
1.3.1. Système électronique contenant plusieurs phases à l'équilibre	
thermodynamique (sans application de potentiel)	28
1.3.2. Energie de Fermi et potentiel électrochimique	29
1.3.3. Energie de Fermi à l'équilibre d'un système électronique	
contenant plusieurs phases k portées à un potentiel électrique V_k	29
1.4. Exercice	29
1.4.1. Energie cinétique moyenne par molécule	29

Chapitre 2. Métaux et semi-conducteurs à l'équilibre thermodynamique (isolés : pas de perturbation extérieure)

2.1. Introduction et rappels : distinction entre isolant, semi-conducteur, métal	33
2.1.1. Remplissage des bandes d'énergie selon la position du niveau de Fermi	33
2.1.2. Distinction entre isolant, semi-conducteur, métal ; semi-conducteurs intrinsèques, extrinsèques, dégénérés	37
2.2. Energie cinétique de Fermi ; position du niveau de Fermi et travail de sortie dans les métaux	39
2.2.1. Energie cinétique de Fermi	39
2.2.2. Cas d'un métal homogène	40
2.2.3. Travail de sortie	42
2.2.4. Cas des systèmes métalliques inhomogènes ; ddp interne (de Galvani)	42
2.3. Etude des semi-conducteurs intrinsèques	45
2.3.1. Densités des porteurs dans les bandes permises	45
2.3.2. Propriétés des semi-conducteurs intrinsèques	48
2.4. Etude des semi-conducteurs extrinsèques	50
2.4.1. Règle du produit pn : loi d'action de masse	50
2.4.2. Formation des semi-conducteurs extrinsèques	50
2.4.3. Concentrations des porteurs et position du niveau de Fermi dans les semi-conducteurs extrinsèques	52
2.4.4. Expressions des densités de porteurs en fonction de n_i , E_i et E_f	54
2.4.5. Equation de neutralité électrique (SC homogène)	55
2.4.6. Porteurs majoritaires et porteurs minoritaires	56
2.4.7. Variation des concentrations en fonction de la température	57
2.4.8. Diagramme de bandes plates dans les semi-conducteurs homogènes à l'équilibre thermodynamique (donc non soumis à un champ électrique extérieur)	58
2.5. Etude des semi-conducteurs (et des systèmes) inhomogènes	60
2.5.1. Potentiel interne d'un cristal	60
2.5.2. Relation de Boltzmann pour un semi-conducteur inhomogène à l'équilibre	62
2.5.3. Schéma de bandes d'un semi-conducteur inhomogène : courbure des bandes	63
2.6. Exercices	66
2.6.1. Exercice 1 : expressions de la position du niveau de Fermi en fonction de T dans un semi-conducteur	66
2.6.2. Exercice 2 : expression de l'énergie cinétique moyenne des électrons d'un métal	73
2.6.3. Exercice 3 : population électronique d'un métal susceptible d'acquérir de l'énergie thermique ($\approx kT$)	73

Chapitre 3. Métaux et semi-conducteurs hors équilibre soumis à une faible perturbation électrique : I. Théories classiques

3.1. Introduction	77
3.2. Cas des métaux : loi d'Ohm classique et ses limites (raisonnement dans l'espace géométrique direct)	78
3.2.1. Le modèle (Drude)	78
3.2.2. Définition de la mobilité et détermination de la conductivité σ	79
3.2.3. Ordres de grandeur dans le cas du cuivre	81
3.2.4. Forme macroscopique de la loi d'Ohm	81
3.2.5. Relaxation d'un conducteur	82
3.2.6. Limites de validité de la loi d'Ohm et des hypothèses de Drude	83
3.2.7. Approximation de la masse effective et nécessité de préciser la forme du temps de relaxation	85
3.3. Courants électriques dans un semi-conducteur : raisonnement dans l'espace géométrique (direct)	87
3.3.1. Extension aux semi-conducteurs de la loi d'Ohm classique (obtenue selon les hypothèses de Drude)	87
3.3.2. Effet d'un champ électrique sur un semi-conducteur homogène	88
3.3.3. Effet d'un gradient de concentration, courant de diffusion	92
3.3.4. Cas d'un semi-conducteur inhomogène : champ interne, relation d'Einstein, effet d'une perturbation électrique	94
3.3.5. Remarque sur l'expression des densités de courant	97
3.3.6. Cas particulier des semi-conducteurs dont la bande de conduction présente deux minimums : émissions micro-ondes appelées effet Gunn	97
3.4. Etude du transport électronique dans le réseau réciproque : étude qualitative pour un métal	104
3.4.1. Expression générale d'une force dans le réseau réciproque	104
3.4.2. Effet d'une force sur le déplacement électronique dans le cas d'un métal ; rôle des collisions	105
3.4.3. Loi d'Ohm et charges impliquées dans le transport	107
3.5. Nature des collisions et forme des mobilités dans les métaux	109
3.5.1. Origine de la faible diffusion des électrons	109
3.5.2. Forme de la mobilité dans les systèmes métalliques	110
3.6. Exercices	111
3.6.1. Exercice 1 : ordres de grandeurs de σ , μ ... dans un métal, dans un SC intrinsèque et dans un SC extrinsèque	111
3.6.2. Exercice 2 : temps de relaxation et probabilité de collision : établissement plus rigoureux de la loi d'Ohm	114
3.6.3. Exercice 3 : conductivité alternative	117
3.6.4. Exercice 4 : loi d'Ohm dans le réseau réciproque	119
3.6.5. Exercice 5 : récapitulatif	120

Chapitre 4. Métaux et semi-conducteurs hors équilibre sous l'effet d'une faible perturbation électrique : II. Théorie semi-classique (équation de transport de Boltzmann)	123
4.1. Introduction : les limites de la loi d'Ohm établie selon le modèle de Drude ou par le calcul dans l'espace réciproque	123
4.2. L'équation de transport de Boltzmann	124
4.2.1. Les hypothèses de l'équation de transport de Boltzmann	124
4.2.2. Etablissement de l'équation de transport de Boltzmann	124
4.3. Flux de porteurs et densité de courant dans l'espace réciproque	127
4.3.1. Expression du flux de porteurs	127
4.3.2. Expression de la densité de courant dans l'espace réciproque	127
4.4. Les différentes expressions de la densité de courant et du temps de relaxation	129
4.4.1. Expression habituelle de la densité de courant dans l'espace des énergies	129
4.4.2. Cas où τ est constant	130
4.4.3. Cas d'un matériau dégénéré (métal ou semi-conducteur dégénéré)	130
4.4.4. Cas d'un semi-conducteur non dégénéré	132
4.5. Expression de Kubo-Greenwood pour la conductivité	133
4.5.1. Cas général	133
4.5.2. Cas de diffusions isotropes et de l'approximation de la masse effective $\left(v_x^2 = \frac{v^2}{3} = \frac{2E}{3m^*} \right)$	134
4.6. Les mobilités : les expressions et l'évolution en fonction de la température pour les différents types de matériaux	134
4.6.1. Les expressions de la mobilité pour les différents types de matériaux	134
4.6.2. Lois générales d'évolution des mobilités avec la température	135
4.7. Exercices	137
4.7.1. Exercice 1 : section efficace et probabilité de collision	137
4.7.2. Exercice 2 : présentation, sous la forme d'un problème, de l'étude théorique de la conductivité dans les bandes d'états localisés ; vérification que la formule de Kubo-Greenwood peut être généralisée à ce mécanisme de transport. Conséquence : forme de la mobilité thermiquement activée	139
Chapitre 5. Perturbation par un champ magnétique : effet Hall et magnéto-résistance	149
5.1. Effet Hall	149
5.1.1. Etude phénoménologique : champ de Hall	149
5.1.2. Constante de Hall	150
5.2. Magnéto-résistance et magnétoconductance	152

5.2.1. Définitions	152
5.2.2. Vitesse des porteurs (exemple de calcul pour un type de porteur)	153
5.2.3. Les équations avec deux types de porteurs	154
5.2.4. Expression de la magnétoconductance et de la magnéto-résistance	155
5.2.5. Remarques : cas limites	156
5.3. Correction apportée par l'équation de transport de Boltzmann	159
5.3.1. Les hypothèses	159
5.3.2. Calculs approchés	160
5.3.3. Calcul rigoureux	161
5.4. L'intérêt actuel pour les magnéto-résistances géantes	162
5.5. Exercices	164
5.5.1. Exercice 1 : constante et tension de Hall	164
5.5.2. Exercice 2 : conductivité avec deux types de porteurs en présence d'un champ magnétique	167
5.5.3. Exercice 3 : méthode de détermination de la masse effective par application de champs électrique et magnétique	168
5.5.4. Exercice 4 : densité de courant en présence d'un champ électrique et d'un champ magnétique : étude à partir l'équation de transport de Boltzmann	178
Chapitre 6. Perturbation par un gradient de température : effets thermoélectriques	185
6.1. Phénomènes physiques accompagnant un gradient de température : effets Seebeck, Thomson, Peltier	185
6.1.1. Modification de la distribution énergétique des porteurs	185
6.1.2. Conductivité thermique	187
6.1.3. Effet Seebeck	188
6.1.4. Effet Thomson	194
6.1.5. Effet Peltier	196
6.1.6. Remarques	200
6.2. Relations entre les différents coefficients, relations de Kelvin	203
6.2.1. Première relation de Kelvin	203
6.2.2. Deuxième relation de Kelvin	205
6.2.3. Application	207
6.3. Thermocouples	208
6.3.1. Principe	208
6.3.2. Cas où l'on fait intervenir les ddp de contact entre m_1 et m_2	209
6.3.3. Thermocouple simplifié	213
6.3.4. Mesure simplifiée de l'effet Seebeck	214
6.4. Calcul du coefficient Seebeck à partir de l'équation de transport de Boltzmann	214

6.4.1. Equation de Boltzmann pour un cristal soumis à un gradient de température	214
6.4.2. Densité de courant	216
6.4.3. Coefficient thermoélectrique (coefficient Seebeck)	217
6.5. Intérêt de la thermoélectricité et exemples pratiques	218
6.5.1. La place de la thermoélectricité et quelques données économiques	218
6.5.2. Figure de mérite et matériaux thermoélectriques	219
6.5.3. Les modules à effet Peltier : intérêt, schéma et performances	220
6.6. Exercices	221
6.6.1. Exercice 1 : coefficient Seebeck dans un semi-conducteur	221
6.6.2. Exercice 2 : forme de S pour un métal (densité n des électrons de conduction)	227
6.6.3. Exercice 3 : effet Seebeck dans une jonction	232
Chapitre 7. Mesures électriques : I. Mesure de résistivités, de résistances carrées et de contact	235
7.1. Introduction	235
7.2. Mesure de la résistivité des semi-conducteurs	236
7.2.1. Principe de la mesure	236
7.2.2. Détermination de la résistivité d'un semi-conducteur en plaque extrêmement (infiniment) épaisse et de surface pratiquement infinie	238
7.2.3. Détermination de la résistivité d'un semi-conducteur en plaque extrêmement (infiniment) mince et de surface pratiquement infinie	240
7.2.4. Echantillons de dimension finie : facteurs correctifs de Valdes	242
7.3. Résistance carrée et résistance de contact	248
7.3.1. Résistance par carré (ou simplement résistance carrée) : R_{\square}	248
7.3.2. Résistance de contact	251
7.4. Exercices	253
7.4.1. Exercice 1 : conductivité d'un semi-conducteur très épais de surface semi-infinie, avec limite conductrice	253
7.4.2. Exercice 2 : conductivité d'un film mince d'épaisseur w	257
7.4.3. Exercice 3 : résistance de contact avec un matériau plutôt isolant (polymère) lors de mesures en alternatif	261
Chapitre 8. Mesures électriques : II. Méthode de Van der Pauw ; mesures magnétoélectriques, des mobilités, du pouvoir thermoélectrique	265
8.1. Introduction	265
8.2. Méthode de Van der Pauw : application à la mesure de la résistivité	265
8.2.1. Méthode générale	265
8.2.2. Fonctions de la variable complexe et transformations conformes	266
8.2.3. Détermination de la résistivité par la méthode de Van der Pauw	269

8.3. Détermination de la magnéto-résistance transversale par la méthode de Van der Pauw	274
8.4. Détermination de la constante de Hall et mesure des mobilités	274
8.4.1. Effet Hall selon la méthode de Van der Pauw	275
8.4.2. Mobilité de Hall (couplage des mesures de résistivité et de Hall)	277
8.4.3. Mesure de la mobilité par couplage des mesures de résistivité et de pouvoir thermoélectrique	277
8.4.4. Mesure de la mobilité par mesure de temps de vol	278
8.5. Mesure du pouvoir thermoélectrique	281
8.5.1. Introduction	281
8.5.2. Méthode intégrale	282
8.5.3. Méthode différentielle	282
8.5.4. La méthode sans mesure directe de ΔT	285
8.6. Exercice	286

Bibliographie	289
--------------------------------	------------

Index	291
------------------------	------------

Sommaire du volume 2	295
---------------------------------------	------------

Electronique et photo-électronique des matériaux et composants propose, à travers des cours et des exercices corrigés, un enseignement pédagogique permettant d'appréhender et d'appliquer les bases des propriétés électroniques des matériaux et du fonctionnement physique des composants.

Ce premier volume rappelle les fondements physiques nécessaires à la détermination des niveaux d'énergie dans les matériaux et les structures électroniques. Le transport électronique y est étudié en détail en fonction des différents types de perturbations (électrique, magnétique, magnétoélectrique, thermoélectrique). Enrichi de nombreux exemples, l'ouvrage permet une approche concrète de ces notions essentielles appliquées notamment au domaine des magnétorésistances, à l'effet Hall, aux effets thermoélectroniques (Seebeck, Peltier). Les méthodes de mesure des principaux paramètres de caractérisations sont également présentées à la fois d'un point de vue théorique et pratique.

Le deuxième volume est consacré à l'application des propriétés électroniques au domaine des composants, notamment photo-électroniques.

L'auteur

André Moliton est professeur à l'Institut Carnot XLim où il a développé le Laboratoire d'optoélectronique plastique. Il est l'auteur d'une centaine de publications dans des revues internationales, ainsi que d'une dizaine de livres dans le domaine de l'électromagnétisme, de l'optoélectronique et de la physique des matériaux.

Ce livre appartient à la Collection Technique et Scientifique des Télécommunications (CTST), publiée sous l'égide de l'Institut TELECOM, avec le soutien de Orange Labs. La CTST rend compte des derniers développements dans l'ensemble des domaines des sciences et technologies de l'information et de la communication.

Hermès
Science
— publications —
www.hermes-science.com

978-2-7462-2109-3

