

Table des matières

Avant-propos

Introduction 1

I Structure électronique 9

1 Symétrie et fonctions d'onde 11

1.1 Les atomes des semi-conducteurs 12

1.2 Fonctions de cristal périodique 13

1.2.1 Fonctions de Bloch 13

1.2.2 Largeur de la zone de Brillouin 14

1.2.3 Normalisation des fonctions de Bloch 14

1.2.4 Développement de $U_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ en fonction des $U_{n0}(\mathbf{r})$. . . 16

1.2.5 Fonctions de Luttinger-Kohn 17

1.3 Bande interdite et masse effective 18

1.4 Une description simpliste ou pourquoi le silicium est un semi-conducteur 22

1.5 Structure cristalline et zone de Brillouin 26

1.6 Combinaison linéaire d'orbitales atomiques 31

1.6.1 Idée directrice 31

1.6.2 Les liaisons fortes 31

1.6.3 Équation séculaire 33

1.6.4 Structure de bande 37

1.6.5 Caractère s et p des fonctions d'onde 38

1.7 Symétrie des fonctions d'onde et éléments de matrice 43

1.7.1 Fonctions d'onde orbitales 43

1.7.2 Fonctions d'onde mélangées de spin 51

1.8 Fonctions d'onde du centre de zone 52

1.8.1 Les fonctions "sphériques" 52

1.8.2 Les fonctions "cubiques" 53

1.8.3 Utilité des notations de Luttinger-Kohn et Kane 55

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.8.4 | Fonction d'onde de trou | 56 |
| 1.9 | Lexique de théorie des groupes | 57 |
| 1.9.1 | Groupe simple (sans spin) | 57 |
| 1.9.2 | Groupe double (avec spin) | 58 |
| 1.10 | Semi-conducteur | 60 |
| 1.10.1 | Définition | 60 |
| 1.10.2 | Semi-conducteur à bande interdite "directe" | 61 |
| 1.10.3 | Semi-conducteur à bande interdite "indirecte" | 61 |
| 1.10.4 | Semi-conducteur à bande interdite nulle | 62 |
| 1.10.5 | Présentation générale des semi-conducteurs | 64 |
| 1.11 | Semi-métal | 71 |
| 1.11.1 | Semi-métal strictement compensé | 71 |
| 1.11.2 | Semi-métal usuel | 72 |
| 1.A | Appendice : Fonctions et théorème de Bloch | 73 |
| 1.A.1 | Propriétés | 73 |
| 1.A.2 | Zone de Brillouin | 75 |
| 1.A.3 | Doublement de maille | 76 |
| 1.B | Appendice : Renversement du temps et "Parité" de $E_n(\mathbf{k})$ | 78 |
| 1.B.1 | Conjugaison de Kramers | 78 |
| 1.B.2 | Dégénérescence de spin et dégénérescence de Kramers | 79 |
| 1.B.3 | Pente de $E_n(\mathbf{k})$ | 81 |
| 1.C | Appendice : Couplage spin-orbite dans les solides | 81 |
| 1.C.1 | Idée générale | 81 |
| 1.C.2 | Description précise | 82 |
| 2 | Principe de la théorie $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ | 85 |
| 2.1 | Théorie des perturbations | 86 |
| 2.1.1 | Hamiltonien de départ | 87 |
| 2.1.2 | Cas d'un niveau non dégénéré | 87 |
| 2.1.3 | Cas d'un niveau dégénéré : renormalisation de Löwdin | 88 |
| 2.1.4 | Cas de niveaux quasi-dégénérés : renormalisation de Luttinger-Kohn | 89 |
| 2.2 | L'hamiltonien $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ | 92 |
| 2.2.1 | Point de départ | 92 |
| 2.2.2 | Principe | 92 |
| 2.2.3 | Premier cas : un seul état est important | 94 |
| 2.2.4 | Deuxième cas : deux états sont importants | 95 |
| 2.A | Appendice : Théorie des perturbations de Luttinger-Kohn | 106 |
| 2.A.1 | Rappel de la théorie usuelle des perturbations | 106 |
| 2.A.2 | Objet de l'étude | 107 |
| 2.A.3 | Démonstration | 107 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Structure de bande : I | 125 |
| 3.1 | Schémas de principe | 127 |
| 3.2 | Hamiltonien sans couplage spin-orbite | 128 |
| 3.2.1 | Ce qui est supposé connu | 128 |
| 3.2.2 | Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_1 ; \Gamma_5\}$ | 132 |
| 3.2.3 | Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{5C} ; \Gamma_5\}$ | 136 |
| 3.2.4 | Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{5C} ; \Gamma_1 ; \Gamma_5\}$ | 137 |
| 3.2.5 | Hamiltonien projeté sur Γ_5 : l'hamiltonien de Dresselhaus-Kip-Kittel | 143 |
| 3.3 | Hamiltonien avec couplage spin-orbite | 148 |
| 3.3.1 | Ce qui est supposé connu | 148 |
| 3.3.2 | L'hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ ou hamiltonien de Kane | 151 |
| 3.3.3 | Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{8C} ; \Gamma_{7C} ; \Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ | 154 |
| 3.3.4 | L'hamiltonien projeté sur $\{\Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$: l'hamiltonien H_8 de Pidgeon-Brown | 162 |
| 3.3.5 | L'hamiltonien projeté sur Γ_8 : l'hamiltonien H_4 de Luttinger-Kohn | 174 |
| 3.3.6 | L'hamiltonien projeté sur $\{\Gamma_8 ; \Gamma_7\}$: l'hamiltonien 6×6 de Luttinger-Kohn ou hamiltonien H_6 | 178 |
| 3.A | Appendice : Les coefficients F, G, H_1, H_2 de Dresselhaus-Kip-Kittel | 183 |
| 3.B | Appendice : Relations entre les paramètres de Luttinger et de Dresselhaus-Kip-Kittel | 188 |
| 3.C | Appendice : Relations entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Pidgeon-Brown | 190 |
| 3.D | Appendice : Couplage spin-orbite dans les semi-conducteurs | 190 |
| 3.D.1 | En théorie des groupes | 190 |
| 3.D.2 | Calcul des éléments de matrice | 191 |
| 3.E | Appendice : L'hamiltonien de Kane à grand $ \mathbf{k} $ | 193 |
| 3.F | Appendice : Passage d'une matrice sans spin à une matrice avec spin | 193 |
| 4 | Structure de bande : II | 197 |
| 4.1 | Bande de valence et effet Zeeman (l'article de Luttinger) | 198 |
| 4.1.1 | Hamiltonien relatif au niveau Γ_5 dit " L " = 1 | 198 |
| 4.1.2 | Hamiltonien relatif au niveau Γ_8 dit " J " = 3/2 | 199 |
| 4.2 | Décomposition de l'hamiltonien de Luttinger | 203 |
| 4.2.1 | Idée générale | 203 |
| 4.2.2 | Matrices utiles | 206 |
| 4.2.3 | Liens entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Dresselhaus-Kip-Kittel : l'approximation sphérique | 207 |
| 4.3 | Fonctions d'onde de l'hamiltonien de Luttinger-Kohn | 207 |
| 4.4 | Influence de l'absence de centre d'inversion | 211 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.1 | L'hamiltonien de Kane | 211 |
| 4.4.2 | Perturbations venant des autres bandes | 214 |
| 4.5 | Les semi-conducteurs à bande interdite nulle | 220 |
| 4.6 | Hamiltonien de contrainte | 222 |
| 4.6.1 | Nomenclature | 222 |
| 4.6.2 | Généralités | 222 |
| 4.6.3 | Notations | 224 |
| 4.6.4 | L'hamiltonien de Bir-Pikus | 227 |
| 4.6.5 | L'hamiltonien de Bir-Pikus-Pidgeon-Brown | 229 |
| 4.6.6 | Cas des ellipsoïdes | 232 |
| 4.6.7 | Influence d'une contrainte uniaxiale sur les dispersions en énergie en Γ_8 | 232 |
| 4.6.8 | Cas où $\mathbf{k} = (0, 0, k_z)$ | 234 |
| 4.6.9 | Influence d'une contrainte biaxiale sur les dispersions en énergie en Γ_8 | 235 |
| 4.7 | Description en masse effective d'un donneur | 237 |
| 4.7.1 | Bande interdite directe | 237 |
| 4.7.2 | Bande interdite indirecte | 243 |
| 4.8 | Description en masse effective d'un accepteur | 244 |
| 4.9 | Hamiltonien effectif | 245 |
| 4.10 | La wurtzite (GaN, CdS, CdSe) | 251 |
| 4.10.1 | Description quasi-cubique | 251 |
| 4.10.2 | La wurtzite (Groupe C_{6v}) | 254 |
| 4.11 | Onde évanescente | 259 |
| 4.11.1 | "Hamiltonien" $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ non hermitique | 259 |
| 4.11.2 | Une description simple | 260 |
| 4.11.3 | Utilisation de la matrice Pidgeon-Brown | 261 |
| 4.A | Appendice : Termes impairs en k | 263 |
| 4.A.1 | Notations liées au couplage spin-orbite | 263 |
| 4.A.2 | Termes linéaires en k dans la bande de valence Γ_8 | 264 |
| 4.A.3 | Absence de termes linéaires en k dans la bande de conduction Γ_6 de la blende de zinc | 265 |
| 4.A.4 | Termes en k^3 | 266 |
| 4.B | Appendice : La matrice 14×14 ou hamiltonien H_{14} | 269 |
| 4.C | Appendice : Remarque sur la fonction enveloppe | 276 |
| 4.D | Appendice : Théorie $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ au point L du germanium | 276 |
| 4.E | Appendice : Transformation de Broido-Sham | 279 |
| 5 | Landé et Landau | 283 |
| 5.1 | Effet Zeeman et facteur de Landé | 284 |
| 5.1.1 | Hamiltonien de conduction en présence d'un champ magnétique | 284 |
| 5.1.2 | Facteur de Landé des électrons de conduction | 286 |
| 5.1.3 | Effet Zeeman de la bande de valence : un aperçu | 287 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | Niveaux de Landau | 288 |
| 5.2.1 | Niveaux de Landau d'une particule de charge $\pm e$ et de masse m | 289 |
| 5.2.2 | Bande de conduction | 290 |
| 5.2.3 | Bande de valence | 291 |
| 6 | Hétérostructures | 299 |
| 6.1 | La problématique Harrison-BenDaniel-Duke | 301 |
| 6.1.1 | L'article de Harrison | 301 |
| 6.1.2 | L'article BenDaniel-Duke | 302 |
| 6.2 | Puits carré | 303 |
| 6.2.1 | Définition | 303 |
| 6.2.2 | Puits fini à masse constante | 303 |
| 6.3 | L'approximation clef | 305 |
| 6.4 | Bande de conduction | 305 |
| 6.4.1 | Cas du puits infini | 305 |
| 6.4.2 | Cas du puits fini | 307 |
| 6.4.3 | Cas où la masse est anisotrope | 309 |
| 6.5 | Bande de valence | 310 |
| 6.5.1 | Cas du puits infini | 310 |
| 6.5.2 | Cas du puits fini | 316 |
| 6.6 | Densité d'états | 318 |
| 6.A | Appendice : L'hamiltonien de Burt-Foreman | 320 |
| 6.A.1 | Rappel | 320 |
| 6.A.2 | Point de départ | 321 |
| 6.A.3 | Hamiltonien sans couplage spin-orbite | 323 |
| 6.A.4 | Hamiltonien tenant compte du couplage spin-orbite | 327 |
| 6.B | Appendice : Bande de valence dans un puits infini | 332 |
| 6.B.1 | Calculs préliminaires | 332 |
| 6.B.2 | Calcul des masses planaires | 334 |
| 6.C | Appendice : Au delà de la masse effective et du puits infini | 335 |
| 6.C.1 | Un puits fini peut-il être considéré comme infini ? | 335 |
| 6.C.2 | Variation de l'énergie en fonction de la largeur du puits | 336 |
| 6.C.3 | Remarque sur la fonction d'onde dans un puits infini | 336 |

II Optique et excitons 337

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Quelques propriétés optiques des solides | 339 |
| 7.1 | Système d'unités | 340 |
| 7.2 | Origine de l'indice optique | 340 |
| 7.2.1 | Cas d'une fréquence de couplage | 342 |
| 7.2.2 | Cas de plusieurs fréquences de couplage | 349 |
| 7.2.3 | Influence du champ local | 353 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.2.4 | Courbe de dispersion des phonons | 356 |
| 7.2.5 | Loi de Snell-Descartes | 359 |
| 7.3 | Constante diélectrique et indice complexes | 359 |
| 7.4 | Absorption, dispersion et réflectivité | 363 |
| 7.A | Appendice : Relations de Kramers-Kronig | 370 |
| 8 | Molécule d'hydrogène & énergie d'échange électron-électron | 373 |
| 8.1 | L'atome d'hydrogène | 374 |
| 8.2 | Autres atomes | 378 |
| 8.2.1 | Les fonctions d'onde | 378 |
| 8.2.2 | Transitions optiques | 381 |
| 8.3 | La molécule d'hydrogène ionisée H_2^+ | 387 |
| 8.3.1 | Hamiltonien | 387 |
| 8.3.2 | Approximation des combinaisons linéaires d'orbitales atomiques ou approximation CLOA | 388 |
| 8.3.3 | Approximation des liaisons fortes | 389 |
| 8.3.4 | L'énergie | 389 |
| 8.3.5 | Fonction d'onde et probabilité de présence | 392 |
| 8.4 | La molécule d'hydrogène H_2 | 394 |
| 8.4.1 | L'approximation des combinaisons linéaires d'orbitales atomiques | 394 |
| 8.4.2 | Orbitales atomiques et moléculaires dans l'approximation de Hartree | 396 |
| 8.4.3 | Notations | 397 |
| 8.4.4 | Énergie directe et énergie d'échange | 398 |
| 8.4.5 | Approximation de Heitler-London : orbitales atomiques avec échange | 399 |
| 8.4.6 | Approximation de Hund-Milliken : orbitales moléculaires avec échange | 402 |
| 8.4.7 | Critiques et améliorations | 402 |
| 8.5 | Extension aux autres molécules | 403 |
| 8.A | Appendice : Hamiltonien d'Heisenberg | 405 |
| 9 | Exciton | 407 |
| 9.1 | Correspondance trou-électron | 408 |
| 9.1.1 | Définition | 408 |
| 9.1.2 | Énergie du trou | 409 |
| 9.1.3 | Vecteur d'onde du trou | 410 |
| 9.2 | L'exciton dans un modèle simple | 412 |
| 9.2.1 | États liés | 414 |
| 9.2.2 | États non liés | 419 |
| 9.3 | L'exciton dans les semi-conducteurs réels | 419 |
| 9.4 | Exciton à deux dimensions | 421 |
| 9.A | Appendice : Exciton piégé | 422 |

| | |
|--|------------|
| 10 Absorption | 425 |
| 10.1 Généralités | 425 |
| 10.1.1 Optique | 425 |
| 10.1.2 Hamiltonien | 426 |
| 10.1.3 Probabilité de transition | 427 |
| 10.1.4 Définition du coefficient d'absorption | 428 |
| 10.2 Semi-conducteur massif : absorption bande à bande | 429 |
| 10.2.1 Élément de matrice | 429 |
| 10.2.2 Coefficient d'absorption | 430 |
| 10.2.3 Transition directe interdite | 438 |
| 10.2.4 Transition indirecte | 439 |
| 10.2.5 Transition pseudo-directe | 442 |
| 10.3 Semi-conducteur massif : absorption des excitons | 442 |
| 10.3.1 Description des excitons | 442 |
| 10.3.2 Élément de matrice | 443 |
| 10.3.3 Cas des excitons libres | 445 |
| 10.3.4 Cas des excitons piégés | 448 |
| 10.4 Semi-conducteur à deux dimensions (plan quantique) | 449 |
| 10.4.1 Description du plan quantique | 449 |
| 10.4.2 Absorption | 450 |
| 10.5 Forces d'oscillateur | 451 |
| 11 Énergie d'échange électron-trou et polariton excitonique | 455 |
| 11.1 L'origine de l'interaction d'échange électron-trou | 457 |
| 11.2 Énergie d'échange dans les excitons de Wannier | 461 |
| 11.2.1 Énergie d'échange d'exciton et énergie d'échange atomique | 461 |
| 11.2.2 Cas où il n'y pas de couplage spin-orbite | 463 |
| 11.2.3 Cas où le couplage spin-orbite joue un rôle | 463 |
| 11.3 Complément sur les fonctions d'onde des excitons libres | 467 |
| 11.4 La séparation longitudinal-transverse des excitons | 468 |
| 11.4.1 Sommes dipolaires | 468 |
| 11.4.2 Aperçu sur la théorie d'Hopfield | 471 |
| 11.5 Forces d'oscillateur | 472 |
| 11.5.1 Exemples | 472 |
| 11.5.2 Semi-conducteur sous contrainte | 473 |
| 11.5.3 Polariton avec une seule masse de trou | 476 |
| 11.5.4 Polaritons lourds et légers | 481 |

III Transport **485**

| | |
|--|------------|
| 12 La "Loi de Newton" des solides cristallins | 487 |
| 12.1 Ondes planes et fonctions de Bloch | 487 |
| 12.2 Moment cristallin | 488 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 12.3 | Vitesse | 488 |
| 12.4 | Accélération : "loi de Newton" | 489 |
| 12.5 | Bande pleine et trou | 491 |
| 12.6 | Masses effectives | 493 |
| 12.6.1 | Masse effective de densité d'états | 493 |
| 12.6.2 | Masse effective de mobilité | 496 |
| 13 | Influence d'un champ magnétique | 503 |
| 13.1 | Effet Hall | 504 |
| 13.1.1 | Principe de l'effet Hall | 504 |
| 13.1.2 | Effet Hall à deux types de porteurs | 507 |
| 13.1.3 | Rôle du temps de relaxation de la quantité de mouvement et magnéto-résistance | 509 |
| 13.1.4 | Tenseur de conductivité | 512 |
| 13.2 | Résonance cyclotron | 513 |
| 13.2.1 | Principe | 513 |
| 13.2.2 | Cas d'une masse anisotrope | 513 |
| 13.2.3 | Rôle du temps de collision | 519 |
| 13.A | Appendice : Masse cyclotron de la bande de valence | 522 |
| 14 | Équation de Boltzmann | 525 |
| 14.1 | Préliminaire : section efficace, temps de relaxation, libre parcours moyen | 525 |
| 14.2 | Équation de Boltzmann monobande | 528 |
| 14.2.1 | Présentation générale | 528 |
| 14.2.2 | Calcul du temps de relaxation dans le cas élastique | 536 |
| 14.2.3 | Exemple : ensemble de potentiels décorrélés d'impuretés ionisées | 537 |
| 14.3 | Équation de Boltzmann multibande (Théorie de Siggia-Kwok) | 540 |
| 14.3.1 | Exemple : cas de 2 bandes | 544 |
| 14.3.2 | Mobilité des électrons de conduction | 544 |
| 14.3.3 | Mobilité des trous de la bande de valence Γ_8 | 545 |
| 14.A | Appendice : Résultats utiles | 547 |
| 14.A.1 | Quelques résultats mathématiques | 547 |
| 14.A.2 | Quelques valeurs numériques | 548 |
| 15 | Interaction électron-phonon | 549 |
| 15.1 | Préliminaires | 549 |
| 15.1.1 | L'oscillateur harmonique | 549 |
| 15.1.2 | Sommes | 550 |
| 15.2 | Hamiltonien des phonons acoustiques | 551 |
| 15.3 | Potentiel de déformation | 557 |
| 15.4 | Temps de relaxation | 559 |
| 15.4.1 | Semi-conducteur massif (à trois dimensions) | 559 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 15.4.2 | Semi-conducteur à deux dimensions | 560 |
| 15.5 | Semi-conducteur polaire | 562 |
| 16 | Transport dans les semi-conducteurs à deux dimensions | 565 |
| 16.1 | Préliminaire | 565 |
| 16.1.1 | Notations | 565 |
| 16.1.2 | Transformées à deux dimensions | 565 |
| 16.1.3 | Une autre écriture de la fonction de Fermi-Dirac | 566 |
| 16.1.4 | Densité d'électrons en fonction de la température | 567 |
| 16.1.5 | Coefficients de transmission | 568 |
| 16.2 | Écrantage et constante diélectrique | 571 |
| 16.2.1 | Semi-conducteur à trois dimensions | 571 |
| 16.2.2 | Semi-conducteur à deux dimensions | 572 |
| 16.2.3 | Constante diélectrique à température finie | 575 |
| 16.3 | Transport "horizontal" : diffusion par des impuretés ionisées | 576 |
| 16.4 | Transport "vertical" : courant tunnel | 578 |
| 16.4.1 | Courant à travers une barrière | 578 |
| 16.4.2 | Courant "à trois dimensions" | 582 |
| 16.4.3 | Transport à travers une double barrière | 583 |
| IV | Annexes | 587 |
| A | Notations et relations utiles | 589 |
| A.1 | Notations générales | 589 |
| A.2 | Atome d'hydrogène | 591 |
| A.3 | Hamiltoniens dans les semi-conducteurs | 591 |
| A.4 | Représentations irréductibles | 592 |
| A.5 | Fonctions de base | 592 |
| A.6 | Éléments de matrice | 593 |
| A.7 | Hamiltonien sans spin | 593 |
| A.8 | Hamiltonien avec spin | 594 |
| A.9 | Relations entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Pidgeon-Brown | 595 |
| A.10 | Liens entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Dresselhaus-Kip-Kittel | 596 |
| A.11 | Relations liées au spin | 598 |
| A.12 | L'interaction d'échange électron-trou | 599 |
| A.13 | Conjuguée de Kramers | 600 |
| A.14 | Optique | 601 |

| | | |
|----------|---|------------|
| B | Seconde quantification | 603 |
| B.1 | Notations | 604 |
| B.2 | Cas des fermions | 606 |
| B.2.1 | Définitions | 606 |
| B.2.2 | Opérateur à une particule | 607 |
| B.2.3 | Opérateurs de destruction et de création | 608 |
| B.2.4 | Opérateurs à deux particules | 611 |
| B.2.5 | Hamiltonien en seconde quantification | 612 |
| B.2.6 | Opérateurs de champ | 612 |
| B.3 | Cas des bosons | 614 |
| B.3.1 | Définitions | 614 |
| B.3.2 | Opérateurs de destruction et de création | 615 |
| B.3.3 | Opérateurs de champ | 616 |
| B.4 | En bref | 616 |
| B.5 | Exemples | 617 |
| B.5.1 | Opérateur nombre de particules | 617 |
| B.5.2 | Opérateur densité de particules | 617 |
| B.5.3 | Potentiel de Coulomb | 617 |
| B.5.4 | Opérateur courant | 618 |
| B.5.5 | Évolution du nombre d'occupation et du moment total | 620 |
| C | Transformée de Fourier en physique du solide | 625 |
| C.1 | Nomenclature | 625 |
| C.2 | Cas général | 625 |
| C.3 | En physique du solide | 626 |
| C.4 | Cas particuliers | 628 |
| C.5 | Transfourrée temporelle | 628 |
| D | Constante diélectrique de Thomas-Fermi et Debye-Hückel | 629 |
| E | Relaxation de spin | 633 |
| E.1 | Généralités sur la relaxation de spin | 634 |
| E.1.1 | Les deux types de collision | 634 |
| E.1.2 | Les différents types d'interaction | 635 |
| E.2 | Processus de relaxation | 636 |
| E.2.1 | Relaxation due à la collision | 636 |
| E.2.2 | Relaxation entre les collisions | 639 |
| E.2.3 | Relaxation dans la bande de valence | 640 |
| F | Résistance tunnel | 641 |
| F.1 | Définition de la résistance tunnel | 641 |
| F.2 | Temps tunnel | 643 |
| F.2.1 | Introduction | 643 |
| F.2.2 | Fonction d'onde d'un puits quantique | 644 |

| | | |
|----------|--|------------|
| F.2.3 | Calcul de δE | 646 |
| F.2.4 | Temps tunnel | 647 |
| F.3 | Résistance tunnel | 648 |
| F.3.1 | Densité d'états à une dimension | 648 |
| F.3.2 | Lien entre le temps tunnel et la différence de potentiel | 648 |
| F.3.3 | Transmission quantique | 650 |
| F.3.4 | Explicitation du temps tunnel | 650 |
| F.3.5 | Calcul de la résistance tunnel | 651 |
| G | Fonction d'autocorrélation et approximation de Born | 653 |
| G.1 | Défauts de surface | 654 |
| G.2 | Fonction d'autocorrélation et approximation de Born | 654 |
| G.2.1 | Fonction d'autocorrélation | 654 |
| G.2.2 | Relation avec l'approximation de Born | 655 |
| G.3 | Surface rugueuse | 656 |
| G.3.1 | Description de la surface | 656 |
| G.3.2 | Temps de relaxation de la quantité de mouvement | 657 |
| H | Courant de probabilité et masse effective | 661 |
| H.1 | Fonction de conduction sans spin | 662 |
| H.1.1 | Masse effective et fonction d'onde | 662 |
| H.1.2 | Courant de probabilité | 662 |
| H.2 | Fonction de conduction avec spin | 663 |
| H.2.1 | Masse effective et fonction d'onde | 663 |
| H.2.2 | Courant de probabilité | 664 |
| H.3 | Conclusion | 665 |
| I | La matrice 30×30 | 667 |
| I.1 | Fonctions de base | 667 |
| I.2 | Éléments de matrice et notations | 668 |
| I.3 | La matrice 30×30 | 668 |
| J | Quelques coefficients de Clebsch-Gordan | 681 |
| J.1 | Table de compatibilité | 682 |
| J.2 | Table de multiplication | 684 |
| J.3 | Mode d'emploi | 685 |
| J.4 | Tables de coefficients de Clebsch-Gordan | 686 |
| K | Constantes | 693 |
| K.1 | Origine | 693 |
| K.2 | Constantes de base | 693 |
| K.3 | Constantes utiles dans les semi-conducteurs | 694 |
| K.4 | Equations aux dimensions | 695 |
| | Bibliographie | 697 |