

Sous la direction de

Marcel
Lahmani

Claire
Dupas

Philippe
Houdy

ÉCHELLES

Collection

Les nanosciences

1. Nanotechnologies et nanophysique

NOUVELLE ÉDITION

Belin

TABLE DES MATIÈRES

Préface	15
Remerciements	16
Introduction NANOPHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES	17
 PARTIE I : LES OUTILS À L'ÉCHELLE DU NANOMÈTRE	
Chapitre 1 LES PROCÉDÉS DE LITHOGRAPHIE ET DE GRAVURE	26
1 Définitions et généralités	26
2 Résines.....	26
2.1 Exemple de procédé sur une résine polymère	27
2.2 Sensibilité et contraste.....	28
2.3 Exemple d'une résine positive	30
2.4 Étape de transfert.....	31
3 Transfert soustractif.....	32
3.1 La gravure humide	32
3.2 La gravure sèche	34
3.3 Gravure ionique réactive	36
4 Transfert additif.....	37
4.1 Le lift-off.....	38
4.2 La croissance électrolytique	39
5 Les lithographies	41
5.1 Panorama des méthodes de lithographie	41
5.2 Photolithographies en proximité et en contact	42
5.3 Photolithographie par projection.....	44
5.4 Photolithographie par rayon X.....	47
5.5 Lithographie UV extrême.....	49
5.6 Lithographie électronique de projection.....	49
5.7 Lithographie ionique de projection.....	51
5.8 Lithographie par faisceaux d'électrons	51
5.9 La lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIB)	56
5.10 Conclusions	59
 Chapitre 2 CROISSANCE DE NANO-OBJETS ORGANISÉS SUR DES SURFACES PRÉ-STRUCTURÉES	61
1 Introduction.....	61
2 Phénomènes physiques à l'origine d'une pré-structuration du substrat et de la croissance périodique des adsorbats	62
2.1 Cristallographie des surfaces : énergie de surface et contrainte de surface	63
2.2 Surfaces auto-organisées : discontinuité de la contrainte de surface	67

2.3	Croissance tridimensionnelle : critère énergétique et compétition entre énergie élastique de volume et énergie de surface	68
2.4	Le rôle du potentiel chimique comme moteur pour guider la croissance des adsorbats : effet de courbure et contraintes élastiques	71
3	Méthode d'élaboration des nano-objets : les techniques physiques ou chimiques	72
4	Croissance de nano-objets sur une surface naturellement pré-structurée via ses propriétés intrinsèques	74
4.1	Croissance sur les surfaces auto-organisées	74
4.2	Intérêt de la croissance sur surfaces vicinales	76
5	Croissance de boîtes quantiques sur une surface pré-structurée par imposition d'un motif artificiel contrôlé	77
6	Croissance de nano-objets sur une surface vicinale pré-structurée par couplage d'une structuration naturelle et artificielle	79
6.1	Pré-structuration de la surface Si(111) vicinale	80
6.2	Croissance de nano-objets d'or sur Si(111) pré-structuré	81
Chapitre 3 MICROSCOPE À EFFET TUNNEL		86
1	Introduction	86
1.1	Concept général	86
1.2	Schéma fonctionnel	87
1.3	Préparation des pointes	88
2	Le courant tunnel	89
2.1	L'effet tunnel entre une pointe et une surface	89
2.2	Le courant tunnel : théorie de Tersoff et Hamann [2]	89
2.3	Extension de la théorie de Tersoff et Hamann	90
2.4	Résolution	91
2.5	Le contraste	92
2.6	Mesure de la hauteur de barrière	92
2.7	Quelques illustrations	94
3	La spectroscopie STM	96
3.1	Courant élastique	96
3.2	Mesure de la bande interdite de semi-conducteurs 3-5	98
3.3	Spectroscopie de boîtes quantiques individuelles	99
3.4	Courant tunnel inélastique	100
4	Interaction pointe-surface	100
4.1	Les différents modes	100
4.2	Chimie locale	102
5	Conclusion	103
Chapitre 4 LES MICROSCOPIES À CHAMPS DE FORCE		105
1	Introduction	105
2	L'instrument	105
3	Les différents modes d'imagerie	107
4	La résolution des images	109
5	Contact : imagerie de topographie, d'élasticité et d'adhérence	111
5.1	Le mode frottement	113

6	Les modes résonnants	114
6.1	Principe général.....	114
6.2	Le mode résonnant linéaire	115
6.3	Le mode tapping ou résonnant non-linéaire	116
7	Mesures de force	119
7.1	Mesures hors contact.....	119
7.2	Mesures d'élasticité et d'adhésion d'une molécule	120
8	Mesures magnétiques et électriques	120
8.1	Mesures magnétiques	121
8.2	Mesures électriques	121
9	Mesure de propriétés mécaniques.....	123
9.1	Nano-indentation.....	123
9.2	Mesure de raideur de contact.....	124
9.3	Fréquence de résonance au contact	125
9.4	Forces de frottement	125
10	Applications pour les nanotechnologies.....	126
11	Conclusion	128
Chapitre 5 CHAMP PROCHE OPTIQUE : DE L'EXPÉRIENCE À LA THÉORIE		131
1	Bases et position du problème	131
1.1	Résolution, champ lointain et champ proche : quelques exemples simples.....	131
1.2	Bref rappel « historique » aux méthodes de champ proche	132
1.3	La microscopie à champ proche optique : pour quoi faire?	133
2	Le microscope à effet tunnel optique (PSTM)	133
2.1	Introduction : la frustration des champs évanescents	134
2.2	La Sonde PSTM dans le champ évanescent : un modèle « diffusif »	134
2.3	Applications du PSTM.....	135
3	Le Microscope à champ proche « sans ouverture ».....	136
3.1	Une nano-antenne qui rayonne vers le champ lointain	136
3.2	L'origine du contraste : le modèle de la sphère diffusante	136
3.3	Le pouvoir des pointes : résolution et efficacité.....	137
3.4	Exaltation du champ au voisinage d'une pointe métallique	138
3.5	SNOM sans ouverture : un exemple typique de montage SNOM ...	140
4	Le Microscope en champ proche optique (SNOM) « à ouverture »	142
4.1	La fibre métallisée	143
4.2	Transmission de l'énergie dans une fibre métallisée taillée en pointe.....	143
4.3	Applications du montage SNOM à ouverture	144
5	Développement en ondes planes. Limite de diffraction	145
5.1	Propagation d'un faisceau dans le vide.....	146
5.2	Relations d'incertitude et diffraction	147
5.3	Limite de diffraction	148
6	Au-delà de la limite de diffraction : champ proche et ondes évanescents	149
6.1	Ondes évanescents. Echelles de longueur.....	149
6.2	Retour aux relations d'incertitude.....	150
7	Rayonnement électromagnétique. Champ proche et champ lointain ...	151
7.1	Rayonnement d'une source élémentaire (dipôle électrique)	151

7.2	Rayonnement en champ lointain. Retour sur la limite de diffraction.....	151
7.3	Rayonnement en champ proche. Limite quasi-statique.....	152
7.4	Vers la modélisation.....	153
8	Emission dipolaire au voisinage d'une nanostructure.....	153
8.1	Amortissement de l'émission dipolaire par rayonnement.....	154
8.2	Emission dipolaire en espace libre.....	155
8.3	Emission dipolaire au voisinage d'un objet.....	155
8.4	Lien avec l'approche quantique.....	157
8.5	Exemple simple : émission dipolaire devant un miroir plan.....	158
8.6	Emission dipolaire au voisinage d'une nanoparticule. Couplage radiatif et non radiatif.....	159
Chapitre 6 NANOLITHOGRAPHIES ÉMERGENTES.....		163
1	Introduction.....	163
2	Lithographie par nano-impression.....	164
3	Le champ d'application de la nano-impression.....	167
3.1	Microélectronique.....	168
3.2	Nanomagnétisme.....	168
3.3	Nano-optique.....	169
3.4	Chimie et biologie.....	169
4	Lithographie par nano-impression sous irradiation.....	170
5	Nanocompression.....	172
6	Lithographie molle.....	174
7	Lithographie en champ proche.....	177
8	Conclusion.....	178
PARTIE II : LES NANO-OBJETS		
Chapitre 7 AGRÉGATS ET COLLOÏDES.....		182
1	Introduction.....	182
2	Forme d'équilibre.....	183
2.1	Modèle de la goutte.....	183
2.2	Polyèdre de Wulff.....	185
2.3	Au-delà du polyèdre de Wulff.....	186
2.4	La liaison van der Waals.....	191
2.5	La liaison covalente.....	192
2.6	La liaison ionique.....	193
3	Grandeur caractéristique : le rayon.....	194
3.1	Grandeurs thermodynamiques : la température de fusion.....	194
3.2	Grandeurs électroniques.....	197
4	Grandeur caractéristique : les fluctuations.....	200
4.1	Température de fusion.....	200
4.2	Modèle de Kubo.....	202
5	Effets quantiques spécifiques dans les systèmes nanométriques et excitations collectives.....	205
5.1	Structure en couches électroniques.....	206
5.2	Supercouches électroniques.....	215
5.3	Propriétés optiques. Excitations collectives.....	222

6	Méthodes de préparation	235
6.1	Méthodes physiques en phase gazeuse	235
6.2	Méthodes chimiques en phase liquide – Colloïdes métalliques	240
7	Assemblées d'agrégats ou colloïdes	244
7.1	Assemblages d'agrégats métalliques	245
7.2	Techniques de dépôts d'agrégats ou colloïdes	247
7.3	Mécanismes caractéristiques de formation de nanostructures par assemblages d'agrégats	248
7.4	Quelques exemples de systèmes nanostructurés nouveaux préparés par dépôts d'agrégats	251
8	Conclusion et perspectives	257
Chapitre 8 FULLERÈNES ET NANOTUBES DE CARBONE		267
1	Introduction	267
2	Les nanotubes et les différentes formes cristallines du carbone	268
2.1	Rappels sur le diamant et le graphite	268
2.2	Découvertes des fullerènes	269
2.3	Découvertes des nanotubes de carbone	269
3	Les fullerènes	270
3.1	Structure des fullerènes	270
3.2	Production des fullerènes	271
3.3	Propriétés Physicochimiques du Buckminsterfullerène	272
4	Les nanotubes de carbone	276
4.1	Structure cristalline des nanotubes	276
4.2	Structure électronique des nanotubes de carbone	278
4.3	Auto-organisation des nanotubes	286
4.4	Variétés chimiques de nanotubes	286
4.5	Synthèse des nanotubes	287
4.6	Mécanismes de croissance des nanotubes de carbone	290
4.7	Observation des nanotubes	292
4.8	Propriétés des nanotubes	296
4.9	De la science aux applications	298
5	Pour en savoir plus	302
Chapitre 9 LES NANOFILS		307
1	Introduction	307
2	Les techniques d'élaboration	308
3	L'approche « top-down »	309
3.1	« Soft » lithographies	309
3.2	Lithographies par microscopie en champ proche	310
4	L'approche « bottom-up »	313
4.1	L'auto-assemblage en surface	313
4.2	Synthèse VLS	315
4.3	Utilisation de matrices poreuses	316
5	Conduction électrique dans les nanofils	317
5.1	Les contacts électriques	317
5.2	Transport incohérent	322
5.3	Cas des chaînes atomiques et des molécules	322
6	Conclusion	323

Chapitre 10 LES NANO-OBJETS	328
1 Introduction	328
2 Les dendrimères	329
2.1 Synthèse divergente	329
2.2 Synthèse convergente	331
3 Les supramolécules	332
3.1 Auto-assemblage par effet de matrice tridimensionnel induit par un cation métallique	333
3.2 Auto-assemblage par liaisons hydrogène	338
3.3 Auto-assemblage par interactions hydrophobes, interactions π et de transfert de charges	342
3.4 Machines moléculaires	344
4 Assemblages polymoléculaires	346
4.1 Auto-assemblage en volume	346
4.2 Auto-assemblage sur des surfaces	350

PARTIE III : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS

Chapitre 11 ÉLECTRONIQUE ULTIME	358
1 Introduction	358
2 La technologie CMOS	361
3 Mise à l'échelle des MOSFET	366
3.1 Principes	366
3.2 Effets de canal court	366
3.3 Règles de dimensionnement	367
3.4 Bilan : <i>roadmap</i> ITRS	369
3.5 Les interconnexions	371
4 Les NanoMOS	373
4.1 Problèmes spécifiques	373
4.2 Architectures alternatives au MOSFET conventionnel	380
5 Conclusion	384
Chapitre 12 ÉLECTRONIQUE ALTERNATIVE	387
1 Introduction	387
1.1 Les longueurs caractéristiques des composants nanoscopiques	388
2 Transistor à un électron (SED)	389
2.1 Principes de base	389
2.2 Transport par blocage de Coulomb	390
2.3 Double jonction tunnel	394
2.4 Transistor à un électron	396
3 Interférences quantiques dans les nanostructures	397
3.1 Introduction	397
3.2 Conductance et transmission : la formule de Landauer	398
3.3 Calcul de la correction	401
3.4 Effet du champ magnétique	401
3.5 Les fluctuations universelles de conductance	403
3.6 Les coupures	404

4	Un exemple d'interférence : l'effet Aharonov-Bohm	404
5	Nanoélectronique supraconductrice : la logique RSFQ	406
5.1	Introduction	406
5.2	Composants logiques supraconducteurs	407
5.3	Structure et performances des composants RSFQ	409
Chapitre 13 L'ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE		413
1	Les briques de base : choix, richesse, complexité	414
2	Un peu d'histoire	415
3	Composants moléculaires	416
3.1	Électrodes et contacts	416
3.2	Relation structure moléculaire – propriétés	421
3.3	Fonctions	432
4	Composants à base de nanotubes	440
4.1	Transistors à effet de champ	440
4.2	SET	446
5	Du composant au circuit	449
5.1	Techniques de fabrication	449
5.2	Quelle architecture de circuit ?	456
6	Conclusion	458
Chapitre 14 NANOMAGNÉTISME ET ÉLECTRONIQUE DE SPIN		463
1	Le Nanomagnétisme	464
1.1	Rappels de magnétostatique dans le vide	464
1.2	Le magnétisme dans la matière : relations fondamentales	465
1.3	Le magnétisme dans la matière : l'approximation du milieu continu	471
1.4	Effets magnétiques nouveaux à l'échelle du nanomètre	483
1.5	Dynamique de l'aimantation dans les nanostructures magnétiques	495
2	Électronique de Spin	505
2.1	Description	505
2.2	Retour sur les mécanismes et origines de l'électronique de spin ..	512
2.3	Magnétorésistance des jonctions tunnel	519
Chapitre 15 LE STOCKAGE DE L'INFORMATION : UNE TECHNOLOGIE DE MASSE AUX PORTES DU NANOMONDE		533
1	Introduction	533
2	Les mémoires de masse	534
2.1	Mémoires de masse : le disque dur	535
2.2	Au delà du disque dur, les techniques de sondes locales	543
3	Les mémoires matricielles	544
3.1	Principes généraux du stockage matriciel	545
3.2	Difficultés liées à la réduction des cellules mémoires à des dimensions nanométriques	548
3.3	Matrices Mémoires : technologies répandues	549
3.4	Concepts mémoire en développement	554
4	Discussion	561

Chapitre 16 OPTRONIQUE	566
1 Plasmons de surface et optique à l'échelle nanométrique	566
1.1 Introduction	566
1.2 Qu'est-ce qu'un plasmon ?	567
1.3 Relations de dispersion, couplage avec la lumière et applications	570
1.4 Transmission optique à travers des ouvertures sub-longueur d'onde	574
1.5 Nanoparticules métalliques	576
1.6 Mais jusqu'où iront les plasmons ?	580
2 Boîtes quantiques semi-conductrices	580
2.1 Les lasers à semi-conducteurs : du puits aux boîtes quantiques	580
2.2 Une boîte quantique unique	586
3 Cristaux photoniques et microcavités	591
3.1 Introduction	591
3.2 Les structures périodiques	592
3.3 Les structures sans défauts : exploitation des bandes permises du cristal photonique	597
3.4 Les structures avec défauts	600
3.5 Conclusion et perspectives	604
Chapitre 17 INTRODUCTION À LA NANOPHOTONIQUE POUR LA BIOLOGIE	609
1 Introduction	609
2 Introduction aux processus d'absorption et d'émission de lumière par des systèmes moléculaires en régime linéaire et non-linéaire	620
3 Molécules, assemblages supra-moléculaires et nanoparticules	629
3.1 Couplage de nanoparticules et de biomolécules	629
3.2 Nanostructures luminescentes à base de semi-conducteurs et de métaux	637
3.3 Ingénierie moléculaire pour la biophotonique	639
4 Instrumentation nano-photonique pour la biologie	648
4.1 La détection optique de molécules uniques par fluorescence	648
4.2 Microscopie multi-photonique et microscopie non-linéaire	671
4.3 Propriétés mécaniques de bio-molécules uniques	676
5 Conclusion	680
Chapitre 18 LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	687
1 Introduction	687
2 Les propriétés structurales	688
2.1 Potentiels et forces interatomiques	688
2.2 La surface d'énergie potentielle	690
2.3 La dynamique moléculaire classique [1]	691
2.4 Les méthodes Monte-Carlo	693
3 Les propriétés électroniques	694
3.1 Rappels de mécanique quantique	695
3.2 Approches semi-empiriques de la structure électronique	696
3.3 Les calculs <i>ab initio</i>	702
3.4 Les forces inter-atomiques en <i>ab initio</i>	707
3.5 Utilisation des fonctions d'ondes et valeurs propres électroniques	708
4 Conclusions	708

Chapitre 19 ARCHITECTURES DE CALCUL ET NANOTECHNOLOGIES : VERS	
LE NANO-ORDINATEUR.....	712
1 Introduction.....	712
2 Architecture du calculateur et fonctions de base.....	714
2.1 Architecture typique d'un calculateur.....	714
2.2 La mémoire.....	715
2.3 Les interconnexions.....	716
2.4 Les opérateurs.....	717
2.5 Considérations technologiques.....	718
2.6 Nanomémoires, nano-opérateurs, nanoconnexions.....	720
3 Quelques pistes architecturales.....	721
3.1 Calculer en utilisant seulement de la mémoire.....	721
3.2 Architectures de calcul reconfigurables.....	722
3.3 Automates cellulaires.....	723
3.4 Réseaux de neurones.....	725
4 Environnement du calculateur.....	728
4.1 Codage de l'information.....	728
4.2 Tolérance aux défauts.....	728
5 Perspectives.....	731
Index.....	734