

Sous la direction de

Marcel
Lahmani

Claire
Dupas

Philippe
Houdy

ÉCHELLES

Collection



Les nanosciences

1. Nanotechnologies et nanophysique

3^e ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE

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 <i>lift-off</i>	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.....	48
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	80
6.1	Pré-structuration de la surface Si(111) vicinale	80
6.2	Croissance de nano-objets d'or sur Si(111) pré-structuré	82
6.3	Croissance de réseaux de nanoplots à l'aide d'une membrane poreuse	83
Chapitre 3 MICROSCOPE À EFFET TUNNEL		88
1	Introduction	88
1.1	Concept général	88
1.2	Schéma fonctionnel	89
1.3	Préparation des pointes	90
2	Le courant tunnel	91
2.1	L'effet tunnel entre une pointe et une surface	91
2.2	Le courant tunnel : théorie de Tersoff et Hamann [2]	91
2.3	Extension de la théorie de Tersoff et Hamann	92
2.4	Résolution	93
2.5	Le contraste	94
2.6	Mesure de la hauteur de barrière	94
2.7	Quelques illustrations	96
3	La spectroscopie STM	98
3.1	Courant élastique	98
3.2	Mesure de la bande interdite de semi-conducteurs 3-5	100
3.3	Spectroscopie de boîtes quantiques individuelles	101
3.4	Courant tunnel inélastique	102
4	Interaction pointe-surface	102
4.1	Les différents modes	102
4.2	Chimie locale	104
5	Conclusion	105
Chapitre 4 LES MICROSCOPIES À CHAMPS DE FORCE		108
1	Introduction	108
2	L'instrument	108
3	Les différents modes d'imagerie	110
4	La résolution des images	112

5	Contact : imagerie de topographie, d'élasticité et d'adhérence	114
5.1	Le mode frottement	116
6	Les modes résonnants	117
6.1	Principe général	117
6.2	Le mode résonnant linéaire	118
6.3	Le mode tapping ou résonnant non-linéaire	119
7	Mesures de force	122
7.1	Mesures hors contact	122
7.2	Mesures d'élasticité et d'adhésion d'une molécule	123
8	Mesures magnétiques et électriques	123
8.1	Mesures magnétiques	124
8.2	Mesures électriques	124
9	Mesure de propriétés mécaniques	126
9.1	Nano-indentation	126
9.2	Mesure de raideur de contact	127
9.3	Fréquence de résonance au contact	128
9.4	Forces de frottement	128
10	Applications pour les nanotechnologies	129
11	Conclusion	131
Chapitre 5 CHAMP PROCHE OPTIQUE : DE L'EXPÉRIENCE À LA THÉORIE		134
1	Bases et position du problème	134
1.1	Résolution, champ lointain et champ proche : quelques exemples simples	134
1.2	Bref rappel « historique » aux méthodes de champ proche	135
1.3	La microscopie à champ proche optique : pour quoi faire ?	136
2	Le microscope à effet tunnel optique (PSTM)	136
2.1	Introduction : la frustration des champs évanescents	137
2.2	La Sonde PSTM dans le champ évanescent : un modèle « diffusif »	137
2.3	Applications du PSTM	138
3	Le Microscope à champ proche « sans ouverture »	139
3.1	Une nano-antenne qui rayonne vers le champ lointain	139
3.2	L'origine du contraste : le modèle de la sphère diffusante	139
3.3	Le pouvoir des pointes : résolution et efficacité	140
3.4	Exaltation du champ au voisinage d'une pointe métallique	141
3.5	SNOM sans ouverture : un exemple typique de montage SNOM ...	143
4	Le Microscope en champ proche optique (SNOM) « à ouverture »	145
4.1	La fibre métallisée	146
4.2	Transmission de l'énergie dans une fibre métallisée taillée en pointe	146
4.3	Applications du montage SNOM à ouverture	147
5	Développement en ondes planes. Limite de diffraction	148
5.1	Propagation d'un faisceau dans le vide	149
5.2	Relations d'incertitude et diffraction	150
5.3	Limite de diffraction	151
6	Au-delà de la limite de diffraction : champ proche et ondes évanescentes	152
6.1	Ondes évanescentes. Echelles de longueur	152
6.2	Retour aux relations d'incertitude	153

7	Rayonnement électromagnétique. Champ proche et champ lointain ...	154
7.1	Rayonnement d'une source élémentaire (dipôle électrique)	154
7.2	Rayonnement en champ lointain. Retour sur la limite de diffraction.....	154
7.3	Rayonnement en champ proche. Limite quasi-statique.....	155
7.4	Vers la modélisation.....	156
8	Emission dipolaire au voisinage d'une nanostructure	156
8.1	Amortissement de l'émission dipolaire par rayonnement	157
8.2	Emission dipolaire en espace libre.....	158
8.3	Emission dipolaire au voisinage d'un objet.....	158
8.4	Lien avec l'approche quantique.....	160
8.5	Exemple simple : émission dipolaire devant un miroir plan	161
8.6	Emission dipolaire au voisinage d'une nanoparticule. Couplage radiatif et non radiatif.....	162
Chapitre 6 NANOLITHOGRAPHIES ÉMERGENTES		166
1	Introduction.....	166
2	Lithographie par nano-impression	167
2.1	Nano-impression thermique	167
2.2	Nano-impression assistée par U.V.	171
2.3	Nanoimpression souple assistée par UV.....	172
2.4	Procédé hybride ou <i>mix and match</i>	173
2.5	Champ d'applications	174
3	Nanomoulage.....	175
3.1	Nanomoulage par compression.....	175
3.2	Lithographie molle.....	177
3.3	Encreage moléculaire	180
4	Lithographie en champ proche	181
5	Conclusion	182
 PARTIE II : LES NANO-OBJETS		
Chapitre 7 AGRÉGATS ET COLLOÏDES		186
1	Introduction.....	186
2	Forme d'équilibre.....	187
2.1	Modèle de la goutte	187
2.2	Polyèdre de Wulff.....	189
2.3	Au-delà du polyèdre de Wulff	190
2.4	La liaison van der Waals	195
2.5	La liaison covalente	196
2.6	La liaison ionique	197
3	Grandeur caractéristique : le rayon	198
3.1	Grandeurs thermodynamiques : la température de fusion.....	198
3.2	Grandeurs électroniques	201
4	Grandeur caractéristique : les fluctuations.....	204
4.1	Température de fusion	204
4.2	Modèle de Kubo	206

5	Effets quantiques spécifiques dans les systèmes nanométriques et excitations collectives	209
5.1	Structure en couches électroniques	210
5.2	Supercouches électroniques	219
5.3	Propriétés optiques. Excitations collectives	226
6	Méthodes de préparation	239
6.1	Méthodes physiques en phase gazeuse	239
6.2	Méthodes chimiques en phase liquide – Colloïdes métalliques	244
7	Assemblées d'agrégats ou colloïdes	248
7.1	Assemblages d'agrégats métalliques	249
7.2	Techniques de dépôts d'agrégats ou colloïdes	251
7.3	Mécanismes caractéristiques de formation de nanostructures par assemblages d'agrégats	252
7.4	Quelques exemples de systèmes nanostructurés nouveaux préparés par dépôts d'agrégats	255
8	Conclusion et perspectives	261
Chapitre 8 FULLERÈNES ET NANOTUBES DE CARBONE		271
1	Introduction	271
2	Les nanotubes et les différentes formes cristallines du carbone	272
2.1	Rappels sur le diamant et le graphite	272
2.2	Découvertes des fullerènes	273
2.3	Découvertes des nanotubes de carbone	273
3	Les fullerènes	274
3.1	Structure des fullerènes	274
3.2	Production des fullerènes	275
3.3	Propriétés Physicochimiques du Buckminsterfullerène	276
4	Les nanotubes de carbone	280
4.1	Structure cristalline des nanotubes	280
4.2	Structure électronique des nanotubes de carbone	282
4.3	Auto-organisation des nanotubes	290
4.4	Variétés chimiques de nanotubes	290
4.5	Synthèse des nanotubes	291
4.6	Mécanismes de croissance des nanotubes de carbone	294
4.7	Observation des nanotubes	296
4.8	Propriétés des nanotubes	300
4.9	De la science aux applications	302
5	Pour en savoir plus	308
Chapitre 9 LES NANOFILS		311
1	Introduction	311
2	Les techniques d'élaboration	312
3	L'approche « <i>top-down</i> »	313
3.1	« <i>Soft</i> » lithographies	313
3.2	Lithographies par microscopie en champ proche	314
4	L'approche « <i>bottom-up</i> »	317
4.1	L'auto-assemblage en surface	317
4.2	Synthèse VLS	319
4.3	Utilisation de matrices poreuses	320

5	Conduction électrique dans les nanofils.....	321
5.1	Les contacts électriques.....	321
5.2	Transport incohérent.....	326
5.3	Cas des chaînes atomiques et des molécules.....	326
6	Conclusion.....	327
Chapitre 10 LES NANO-OBJETS.....		332
1	Introduction.....	332
2	Les dendrimères.....	333
2.1	Synthèse divergente.....	333
2.2	Synthèse convergente.....	335
3	Les supramolécules.....	336
3.1	Auto-assemblage par effet de matrice tridimensionnel induit par un cation métallique.....	337
3.2	Auto-assemblage par liaisons hydrogène.....	342
3.3	Auto-assemblage par interactions hydrophobes, interactions π et de transfert de charges.....	346
3.4	Machines moléculaires.....	348
4	Assemblages polymoléculaires.....	350
4.1	Auto-assemblage en volume.....	350
4.2	Auto-assemblage sur des surfaces.....	355
 PARTIE III : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS		
Chapitre 11 ÉLECTRONIQUE ULTIME.....		364
1	Introduction.....	364
2	La technologie CMOS.....	367
3	Mise à l'échelle des MOSFET.....	372
3.1	Principes.....	372
3.2	Effets de canal court.....	372
3.3	Règles de dimensionnement.....	373
3.4	Bilan : <i>roadmap</i> ITRS.....	375
3.5	Les interconnexions.....	377
4	Les NanoMOS.....	379
4.1	Problèmes spécifiques.....	379
4.2	Architectures alternatives au MOSFET conventionnel.....	386
5	Conclusion.....	390
Chapitre 12 ÉLECTRONIQUE ALTERNATIVE.....		394
1	Introduction.....	394
1.1	Les longueurs caractéristiques des composants nanoscopiques ...	395
2	Transistor à un électron (SED).....	396
2.1	Principes de base.....	396
2.2	Transport par blocage de Coulomb.....	397
2.3	Double jonction tunnel.....	401
2.4	Transistor à un électron.....	403

3	Interférences quantiques dans les nanostructures.....	404
3.1	Introduction	404
3.2	Conductance et transmission : la formule de Landauer	405
3.3	Calcul de la correction	408
3.4	Effet du champ magnétique	408
3.5	Les fluctuations universelles de conductance.....	410
3.6	Les coupures.....	411
4	Un exemple d'interférence : l'effet Aharonov-Bohm	411
5	Nanoélectronique supraconductrice : la logique RSFQ.....	413
5.1	Introduction	413
5.2	Composants logiques supraconducteurs.....	414
5.3	Structure et performances des composants RSFQ	416
Chapitre 13 L'ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE		420
1	Les briques de base : choix, richesse, complexité.....	421
2	Un peu d'histoire	422
3	Composants moléculaires	423
3.1	Électrodes et contacts.....	423
3.2	Relation structure moléculaire – propriétés	429
3.3	Fonctions	439
4	Composants à base de nanotubes	447
4.1	Transistors à effet de champ.....	448
4.2	SET	453
5	Du composant au circuit	456
5.1	Techniques de fabrication	456
5.2	Quelle architecture de circuit ?.....	463
6	Conclusion	465
Chapitre 14 NANOMAGNÉTISME ET ÉLECTRONIQUE DE SPIN		470
1	Le Nanomagnétisme.....	471
1.1	Rappels de magnétostatique dans le vide	471
1.2	Le magnétisme dans la matière : relations fondamentales	472
1.3	Le magnétisme dans la matière : l'approximation du milieu continu	478
1.4	Effets magnétiques nouveaux à l'échelle du nanomètre	490
1.5	Dynamique de l'aimantation dans les nanostructures magnétiques	502
2	Électronique de Spin	512
2.1	Description	512
2.2	Retour sur les mécanismes et origines de l'électronique de spin ..	519
2.3	Magnétorésistance des jonctions tunnel	526
Chapitre 15 LE STOCKAGE DE L'INFORMATION : UNE TECHNOLOGIE DE MASSE AUX PORTES DU NANOMONDE		540
1	Introduction.....	540
2	Les mémoires de masse.....	541
2.1	Mémoires de masse : le disque dur.....	542
2.2	Au delà du disque dur, les techniques de sondes locales.....	550

3	Les mémoires matricielles	551
3.1	Principes généraux du stockage matriciel	552
3.2	Difficultés liées à la réduction des cellules mémoires à des dimensions nanométriques	555
3.3	Matrices Mémoires : technologies répandues	556
3.4	Concepts mémoire en développement	561
4	Discussion	568
Chapitre 16 OPTRONIQUE		573
1	Plasmons de surface et optique à l'échelle nanométrique	573
1.1	Introduction	573
1.2	Qu'est-ce qu'un plasmon ?	574
1.3	Relations de dispersion, couplage avec la lumière et applications ..	577
1.4	Transmission optique à travers des ouvertures sub-longueur d'onde	581
1.5	Nanoparticules métalliques	583
1.6	Mais jusqu'où iront les plasmons ?	587
2	Boîtes quantiques semi-conductrices	587
2.1	Les lasers à semi-conducteurs : du puits aux boîtes quantiques ...	587
2.2	Une boîte quantique unique	593
3	Cristaux photoniques et microcavités	598
3.1	Introduction	598
3.2	Les structures périodiques	599
3.3	Les structures sans défauts : exploitation des bandes permises du cristal photonique	604
3.4	Les structures avec défauts	607
3.5	Conclusion et perspectives	611
Chapitre 17 INTRODUCTION À LA NANOPHOTONIQUE POUR LA BIOLOGIE... 616		
1	Introduction	616
2	Introduction aux processus d'absorption et d'émission de lumière par des systèmes moléculaires en régime linéaire et non-linéaire	627
3	Molécules, assemblages supra-moléculaires et nanoparticules	636
3.1	Couplage de nanoparticules et de biomolécules	636
3.2	Nanostructures luminescentes à base de semi-conducteurs et de métaux	644
3.3	Ingénierie moléculaire pour la biophotonique	646
4	Instrumentation nano-photonique pour la biologie	655
4.1	La détection optique de molécules uniques par fluorescence	655
4.2	Vers l'ultra résolution en microscopie de fluorescence	678
4.3	Microscopie multi-photonique et microscopie non-linéaire	681
4.4	Propriétés mécaniques de bio-molécules uniques	687
5	Conclusion	692
Chapitre 18 LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES		699
1	Introduction	699
2	Les propriétés structurales	700
2.1	Potentiels et forces interatomiques	700
2.2	La surface d'énergie potentielle	702

2.3	La dynamique moléculaire classique [1]	703
2.4	Les méthodes Monte-Carlo	705
3	Les propriétés électroniques	706
3.1	Rappels de mécanique quantique	707
3.2	Approches semi-empiriques de la structure électronique	708
3.3	Les calculs <i>ab initio</i>	714
3.4	Les forces inter-atomiques en <i>ab initio</i>	719
3.5	Utilisation des fonctions d'ondes et valeurs propres électroniques	720
4	Conclusions	720
Chapitre 19 ARCHITECTURES DE CALCUL ET NANOTECHNOLOGIES : VERS		
LE NANO-ORDINATEUR		
		724
1	Introduction	724
2	Architecture du calculateur et fonctions de base	726
2.1	Architecture typique d'un calculateur	726
2.2	La mémoire	727
2.3	Les interconnexions	728
2.4	Les opérateurs	729
2.5	Considérations technologiques	730
2.6	Nanomémoires, nano-opérateurs, nanoconnexions	732
3	Quelques pistes architecturales	733
3.1	Calculer en utilisant seulement de la mémoire	733
3.2	Architectures de calcul reconfigurables	734
3.3	Automates cellulaires	735
3.4	Réseaux de neurones	737
4	Environnement du calculateur	740
4.1	Codage de l'information	740
4.2	Tolérance aux défauts	740
5	Perspectives	743
Index		747