

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

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

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

7.2	Rayonnement en champ lointain. Retour sur la limite de diffraction	
7.3	Rayonnement en champ proche. Limite quasi-statique	
7.4	Vers la modélisation	
8	Emission dipolaire au voisinage d'une nanostructure	
8.1	Amortissement de l'émission dipolaire par rayonnement	
8.2	Emission dipolaire en espace libre	
8.3	Emission dipolaire au voisinage d'un objet	
8.4	Lien avec l'approche quantique	
8.5	Exemple simple : émission dipolaire devant un miroir plan	
8.6	Emission dipolaire au voisinage d'une nanoparticule. Con radiatif et non radiatif	

Chapitre 6 NANOLITHOGRAPHIES ÉMERGENTES

1	Introduction	
2	Lithographie par nano-impression	
3	Le champ d'application de la nano-impression	
3.1	Microélectronique	
3.2	Nanomagnétisme	
3.3	Nano-optique	
3.4	Chimie et biologie	
4	Lithographie par nano-impression sous irradiation	
5	Nanocompression	
6	Lithographie molle	
7	Lithographie en champ proche	
8	Conclusion	

PARTIE II : LES NANO-OBJETS

Chapitre 7 AGRÉGATS ET COLLOIDES

1	Introduction	
2	Forme d'équilibre	
2.1	Modèle de la goutte	
2.2	Polyèdre de Wulff	
2.3	Au-delà du polyèdre de Wulff	
2.4	La liaison van der Waals	
2.5	La liaison covalente	
2.6	La liaison ionique	
3	Grandeur caractéristique : le rayon	
3.1	Grandeurs thermodynamiques : la température de fusion	
3.2	Grandeurs électroniques	
4	Grandeur caractéristique : les fluctuations	
4.1	Température de fusion	
4.2	Modèle de Kubo	
5	Effets quantiques spécifiques dans les systèmes nanométriques	
	l'atons collectives	
5.1	Structure en couches électroniques	
5.2	Supercouches électroniques	
5.3	Propriétés optiques. Exaltations collectives	

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		
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	270
3.3	Propriétés Physicochimiques du Buckminsterfullerène	271
4	Les nanotubes de carbone	272
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		
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	Mes des chaînes atomiques et des molécules	322
6	Conclusion	322

Chapitre 10 LES NANO-OBETS

1	Introduction
2	Les dendrimères
2.1	Synthèse divergente
2.2	Synthèse convergente
3	Les supramolécules
3.1	Auto-assemblage par effet de matrice tridimensionnel induit un cation métallique
3.2	Auto-assemblage par liaisons hydrogène
3.3	Auto-assemblage par interactions hydrophobes, interaction de transfert de charges
3.4	Machines moléculaires
4	Assemblages polymoléculaires
4.1	Auto-assemblage en volume
4.2	Auto-assemblage sur des surfaces

PARTIE III : PROPRIÉTÉS ET APPLICATIONS

Chapitre 11 ÉLECTRONIQUE ULTIME

1	Introduction
2	La technologie CMOS
3	Mise à l'échelle des MOSFET
3.1	Principes
3.2	Effets de canal court
3.3	Règles de dimensionnement
3.4	Bilan : roadmap ITRS
3.5	Les interconnexions
4	Les NanOMOS
4.1	Problèmes spécifiques
4.2	Architectures alternatives au MOSFET conventionnel
5	Conclusion

Chapitre 12 ÉLECTRONIQUE ALTERNATIVE

1	Introduction
1.1	Les longueurs caractéristiques des composants nanoscopiques
2	Transistor à un électron (SED)
2.1	Principes de base
2.2	Transport par blocage de Coulomb
2.3	Double jonction tunnel
2.4	Transistor à un électron
3	Intéférences quantiques dans les nanostructures
3.1	Introduction
3.2	Conductance et transmission : la formule de Landauer
3.3	Calcul de la correction
3.4	Effet du champ magnétique
3.5	Les fluctuations universelles de conductance

4	Un exemple d'interférence : l'effet Aharonov-Bohm	404
5	Nanoelectronique supraconductrice : la logique RSPQ	406
5.1	Introduction	406
5.2	Composants logiques supraconducteurs	407
5.3	Structure et performances des composants RSPQ	409

Chapitre 13 L'ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE

1	Les briques de base : choix, richesse, complexité	413
2	Un peu d'histoire	414
3	Composants moléculaires	415
3.1	Électrodes et contacts	416
3.2	Relation structure moléculaire – propriétés	416
3.3	Fonctions	421
4	Composants à base de nanotubes	432
4.1	Transistors à effet de champ	440
4.2	SET	440
5	Du composant au circuit	446
5.1	Techniques de fabrication	449
5.2	Quelle architecture de circuit ?	449
6	Conclusion	456

Chapitre 14 NANOMAGNÉTISME ET ÉLECTRONIQUE DE SPIN

1	Le Nanomagnétisme	463
1.1	Rappels de magnétostatique dans le vide	464
1.2	Le magnétisme dans la matière : relations fondamentales	464
1.3	Le magnétisme dans la matière : l'approximation du milieu continu	465
1.4	Effets magnétiques nouveaux à l'échelle du nanomètre	471
1.5	Dynamique de l'aimantation dans les nanostructures magnétiques	483
2	Électronique de Spin	495
2.1	Description	505
2.2	Retour sur les mécanismes et origines de l'électronique de spin	505
2.3	Magnétorésistance des jonctions tunnel	512
		519

Chapitre 15 LE STOCKAGE DE L'INFORMATION : UNE TECHNOLOGIE DE MASSE AUX PORTES DU NANOMONDE

1	Introduction	533
2	Les mémoires de masse	533
2.1	Mémoires de masse : le disque dur	534
2.2	Au delà du disque dur, les techniques de sondes locales	535
3	Les mémoires matricielles	543
3.1	Principes généraux du stockage matriciel	544
3.2	Difficultés liées à la réduction des cellules mémoires à des dimensions nanométriques	545
3.3	Matrices Mémoires : technologies répandues	548
3.4	Concepts mémoire en développement	549
4	Discussion	551

Chapitre 16 OPTRONIQUE

1	Plasmons de surface et optique à l'échelle nanométrique
1.1	Introduction
1.2	Qu'est-ce qu'un plasmon ?
1.3	Relations de dispersion, couplage avec la lumière et application
1.4	Transmission optique à travers des ouvertures sub-longueur d'onde
1.5	Nanoparticules métalliques
1.6	Mais, jusqu'où iront les plasmons ?
2	Boîtes quantiques semi-conductrices
2.1	Les lasers à semi-conducteurs : du puits aux boîtes quantiques
2.2	Une boîte quantique unique
3	Cristaux photoniques et microcavités
3.1	Introduction
3.2	Les structures périodiques
3.3	Les structures sans défauts : exploitation des bandes permittives interdites
3.4	Les structures avec défauts
3.5	Conclusion et perspectives

Chapitre 17 INTRODUCTION À LA NANOPHOTONIQUE POUR LA BIOPHOTONIQUE

1	Introduction
2	Introduction aux processus d'absorption et d'émission de lumière des systèmes moléculaires en régime linéaire et non-linéaire
3	Molécules, assemblages supra-moléculaires et nanoparticules
3.1	Couplage de nanoparticules et de biomolécules
3.2	Nanostructures lumineuses à base de semi-conducteur
3.3	Ingénierie moléculaire pour la biophotonique
4	Instrumentation nano-photonique pour la biologie
4.1	La détection optique de molécules uniques par fluorescer
4.2	Microscopie multi-photonique et microscope non-linéaire
4.3	Propriétés mécaniques de bio-molécules uniques
5	Conclusion

Chapitre 18 LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

1	Introduction
2	Les propriétés structurales
2.1	Potentiel et forces interatomiques
2.2	La surface d'énergie potentielle
2.3	La dynamique moléculaire classique [1]
2.4	Les méthodes Monte-Carlo
3	Les propriétés électroniques
3.1	Rappels de mécanique quantique
3.2	Approches semi-empiriques de la structure électronique
3.3	Les calculs <i>ab initio</i>
3.4	Les forces inter-atomiques en <i>ab initio</i>
3.5	Utilisation des fonctions d'ondes et valeurs propres électrostatiques
4	Conclusions

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