

LES AUTEURS

Agnès Barthélémy est maître de conférences à l'université Paris-Sud, et chercheuse dans l'unité mixte CNRS-Thales.

Xavier Blase est chercheur au CNRS à Lyon.

Claude Boccara est directeur scientifique de l'ESPCI à Paris.

Jean-Philippe Bourgoïn est chercheur au CEA et directeur du LEM.

Arnaud Bournel est maître de conférences à l'université Paris XI et chercheur à l'IEF à Orsay.

Sophie Brasselet est maître de conférences à l'ENS de Cachan.

Pierre-François Brevet est professeur de physique à l'université Claude Bernard-Lyon I et chercheur au LASIM.

Etienne Bustarret est chargé de recherche au CNRS au LEPES à Grenoble.

Rémi Carminati est professeur à l'ECP (Physique et Énergétique) et chercheur au laboratoire EM2C du CNRS et de l'ECP.

David Cassagne est maître de conférences à l'université Montpellier II au sein du groupe d'étude des semi-conducteurs.

Claude Chappert est directeur de recherche au CNRS à l'Institut d'électronique fondamentale d'Orsay.

Yong Chen est professeur de l'ENS de Paris et chercheur au LPN à Marcoussis.

Christophe Delerue est directeur de recherche au CNRS et responsable du département physique de l'ISEN à l'IEMN de Lille.

Philippe Dollfus est chargé de recherche au CNRS à l'IEF à Orsay.

Joël Eymery est chercheur au CEA/DRFMC.

Arianna Filoramo est chercheuse au LEM au CEA.

David Fraboulet est ingénieur-chercheur au CEA.

Christian Frétiigny est chercheur au CNRS à l'ESPCI à Paris.

Sylvie Galdin-Retailleau est professeur à l'université Paris XI et chercheuse à l'IEF à Orsay.

Jean-Louis Gallani travaille au CNRS, à l'IPCMS à Strasbourg.

Christian Gamrat est ingénieur chercheur au CEA.

Jean-Michel Gérard est chef du laboratoire de physique des semi-conducteurs au CEA à Grenoble et professeur chargé de cours à l'École polytechnique.

Marcelo Fabián Goffman est membre du LEM au CEA.

Emmanuel Hadji est responsable du laboratoire SiNaPS au CEA à Grenoble.

Margrit Hanbücken est directrice de recherche au CNRS au CRMC2 de Marseille.

Jean-Claude Labrune est professeur à l'université de Franche-Comté et chercheur au CREST de l'Institut FEMTO-ST.

Jean Lermé est directeur de recherche au CNRS au LASIM à Lyon.

Annick Loiseau est directrice de recherche à l'Onera.

Dominique Maily est directeur de recherche au CNRS au LPN de Marcoussis.

Patrice Mélinon est directeur de recherche au CNRS au LPMCN à Lyon.

Jean-François Nierengarten est chargé de recherche au CNRS au LCC à Toulouse.

Frank Palmino est maître de conférences à l'université de Franche-Comté et chercheur au CREST de l'Institut FEMTO-ST.

Jean-Noël Patillon est responsable de laboratoires aux Motorola Labs.

Jean-Louis Pautrat est physicien et conseiller scientifique au CEA et à « Minatec » de Grenoble.

Anne Pépin est chercheuse au CNRS au LPN de Marcoussis.

Alain Perez est directeur de recherche au CNRS et dirige le LPMCN à Lyon.

Sylvie Rousset est directrice de recherche au CNRS au MPQ à Jussieu.

Yves Samson est chercheur au DRFMC du CEA Grenoble.

Christian Seassal est chargé de recherche CNRS au LEOM à l'École centrale de Lyon.

Nathalie Solladié est chargée de recherche au CNRS au LCC à Toulouse.

Didier Stiévenard est directeur de recherche au CNRS et est directeur adjoint de l'IEMN de Lille.

Christophe Vieu est professeur de physique à l'INSA de Toulouse et chercheur au LAAS/CNRS.

Dominique Vuillaume est directeur de recherche au CNRS de l'IEMN à Lille.

Joseph Zyss est professeur et chercheur à l'ENS de Cachan.

TABLE DES MATIERES**Introduction NANOPHYSIQUE ET NANOTECHNOLOGIES**

Chapitre 1. LES PROCÉDÉS DE LITHOGRAPHIE ET DE GRAVURE

1. Définitions et généralités
2. Résines
 - 2.1. Exemple de procédé sur une résine polymère
 - 2.2. Sensibilité et contraste
 - 2.3. Exemple d'une résine positive
 - 2.4. Étape de transfert
3. Transfert soustractif
 - 3.1. La gravure humide
 - 3.2. La gravure sèche
 - 3.3. La gravure ionique réactive
4. Transfert additif
 - 4.1. Le lift-off
 - 4.2. La croissance électrolytique
5. Les lithographies
 - 5.1. Panorama des méthodes de lithographie
 - 5.2. Photolithographies en proximité et en contact
 - 5.3. Photolithographie par projection
 - 5.4. Photolithographie par rayon X
 - 5.5. Lithographie UV extrême
 - 5.6. Lithographie électronique de projection
 - 5.7. Lithographie ionique de projection
 - 5.8. Lithographie par faisceaux d'électrons
 - 5.9. La lithographie par faisceau d'ions focalisés (FIB)
 - 5.10. Conclusions

Chapitre 2. CROISSANCE DE NANO-OBJETS ORGANISÉS SUR DES SURFACES PRÉ-STRUCTURÉES

1. Introduction
2. Pré-structuration du substrat et croissance périodique des adsorbats
 - 2.1. Cristallographie des surfaces : énergie de surface et contrainte de surface
 - 2.2. Surfaces auto-organisées
 - 2.3. Croissance tridimensionnelle : critère énergétique
 - 2.4. Le rôle du potentiel chimique comme moteur pour guider la croissance des adsorbats
3. Méthode d'élaboration des nano-objets
4. Croissance de nano-objets sur une surface naturellement pré-structurée
 - 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
6. Croissance de nano-objets sur une surface vicinale pré-structurée
 - 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
 - 2.3. 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 MICROSCOPIES 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. Les modes résonnants
 - 6.1. Principe général
 - 6.2. Le mode résonnant linéaire
 - 6.3. Le mode tapping ou résonnant non-linéaire
- 7. Mesures de force
 - 7.1. Mesures hors contact
 - 7.2. Mesures d'élasticité et d'adhésion d'une molécule
- 8. Mesures magnétiques et électriques
 - 8.1. Mesures magnétiques
 - 8.2. Mesures électriques
- 9. Mesure de propriétés mécaniques
 - 9.1. Nano-indentation
 - 9.2. Mesure de raideur de contact
 - 9.3. Fréquence de résonance au contact
 - 9.4. Forces de frottement
- 10. Applications pour les nanotechnologies
- 11. Conclusion

Chapitre 5. CHAMP PROCHE OPTIQUE : DE L'EXPÉRIENCE À LA THÉORIE

- 1. Bases et position du problème
 - 1.1. Résolution, champ lointain et champ proche : quelques exemples simples
 - 1.2. Bref rappel « historique » aux méthodes de champ proche
 - 1.3. La microscopie à champ proche optique : pour quoi faire ?
- 2. Le microscope à effet tunnel optique (PSTM)
 - 2.1. Introduction : la frustration des champs évanescents
 - 2.2. La Sonde PSTM dans le champ évanescent : un modèle « diffusif »
 - 2.3. Applications du PSTM
- 3. Le Microscope à champ proche « sans ouverture »
 - 3.1. Une nano-antenne qui rayonne vers le champ lointain
 - 3.2. L'origine du contraste : le modèle de la sphère diffusante
 - 3.3. Le pouvoir des pointes : résolution et efficacité
 - 3.4. Exaltation du champ au voisinage d'une pointe métallique
 - 3.5. SNOM sans ouverture : un exemple typique de montage SNOM
- 4. Le Microscope en champ proche optique (SNOM) « à ouverture »
 - 4.1. La fibre métallisée
 - 4.2. Transmission de l'énergie dans une fibremétallisée taillée en pointe
 - 4.3. Applications du montage SNOM à ouverture
- 5. Développement en ondes planes. Limite de diffraction
 - 5.1. Propagation d'un faisceau dans le vide
 - 5.2. Relations d'incertitude et diffraction
 - 5.3. Limite de diffraction
- 6. Au-delà de la limite de diffraction : champ proche et ondes évanescentes
 - 6.1. Ondes évanescentes. Echelles de longueur
 - 6.2. Retour aux relations d'incertitude
- 7. Rayonnement électromagnétique. Champ proche et champ lointain
 - 7.1. Rayonnement d'une source élémentaire (dipôle électrique)
 - 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. Émission dipolaire au voisinage d'une nanostructure
 - 8.1. Amortissement de l'émission dipolaire par rayonnement
 - 8.2. Émission dipolaire en espace libre
 - 8.3. Émission 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. Émission dipolaire au voisinage d'une nanoparticule. Couplage radiatif et non radiatif

Chapitre 6. NANOLITHOGRAPHIES ÉMERGENTES

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

Chapitre 7. AGRÉGATS ET COLLOÏDES

- 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 et excitations collectives
 - 5.1. Structure en couches électroniques
 - 5.2. Supercouches électroniques
 - 5.3. Propriétés optiques. Excitations collectives
- 6. Méthodes de préparation
 - 6.1. Méthodes physiques en phase gazeuse
 - 6.2. Méthodes chimiques en phase liquide
- 7. Assemblées d'agrégats ou colloïdes
 - 7.1. Assemblages d'agrégats métalliques
 - 7.2. Techniques de dépôts d'agrégats ou colloïdes
 - 7.3. Mécanismes caractéristiques de formation de nanostructures par assemblages d'agrégats
 - 7.4. Quelques exemples de systèmes nanostructurés nouveaux préparés par dépôts d'agrégats
- 8. Conclusion et perspectives

Chapitre 8. FULLERÈNES ET NANOTUBES DE CARBONE

- 1. Introduction
- 2. Les nanotubes et les différentes formes cristallines du carbone
 - 2.1. Rappels sur le diamant et le graphite
 - 2.2. Découvertes des fullerènes
 - 2.3. Découvertes des nanotubes de carbone

3. Les fullerènes
 - 3.1. Structure des fullerènes
 - 3.2. Production des fullerènes
 - 3.3. Propriétés Physicochimiques du Buckminsterfullerène
4. Les nanotubes de carbone
 - 4.1. Structure cristalline des nanotubes
 - 4.2. Structure électronique des nanotubes de carbone
 - 4.3. Auto organisation des nanotubes
 - 4.4. Variétés chimiques de nanotubes
 - 4.5. Synthèse des nanotubes
 - 4.6. Mécanismes de croissance des nanotubes de carbone
 - 4.7. Observation des nanotubes
 - 4.8. Propriétés des nanotubes
 - 4.9. De la science aux applications
5. Pour en savoir plus

Chapitre 9. LES NANOFILS

1. Introduction
2. Les techniques d'élaboration
3. L'approche « top-down »
 - 3.1. « Soft » lithographies
 - 3.2. Lithographies par microscopie en champ proche
4. L'approche « bottom-up »
 - 4.1. L'auto-assemblage en surface
 - 4.2. Synthèse VLS
 - 4.3. Utilisation de matrices poreuses
5. Conduction électrique dans les nanofils
 - 5.1. Les contacts électriques
 - 5.2. Transport incohérent
 - 5.3. Cas des chaînes atomiques et des molécules
6. Conclusion

Chapitre 10. LES NANO-OBJETS

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 par un cation métallique
 - 3.2. Auto-assemblage par liaisons hydrogène
 - 3.3. Auto-assemblage par interactions hydrophobes, interactions π et de transfert de charges
 - 3.4. Machines moléculaires
4. Assemblages polymoléculaires
 - 4.1. Auto-assemblage en volume
 - 4.2. Auto-assemblage sur des surfaces

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. Interférences 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

3.6. Les coupures

4. Un exemple d'interférence : l'effet Aharonov-Bohm

5. Nanoélectronique supraconductrice : la logique RSFQ

5.1. Introduction

5.2. Composants logiques supraconducteurs

5.3. Structure et performances des composants RSFQ

Chapitre 13. L'ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE

1. Les briques de base : choix, richesse, complexité

2. Un peu d'histoire

3. Composants moléculaires

3.1. Électrodes et contacts

3.2. Relation structure moléculaire – propriétés

3.3. Fonctions

4. Composants à base de nanotubes

4.1. Transistors à effet de champ

4.2. SET

5. Du composant au circuit

5.1. Techniques de fabrication

5.2. Quelle architecture de circuit ?

5.3. Conclusion

Chapitre 14. NANOMAGNÉTISME ET ÉLECTRONIQUE DE SPIN

1. Le Nanomagnétisme

1.1. Rappels de magnétostatique dans le vide

1.2. Le magnétisme dans la matière : relations fondamentales

1.3. Le magnétisme dans la matière : l'approximation du milieu continu

1.4. Effets magnétiques nouveaux à l'échelle du nanomètre

1.5. Dynamique de l'aimantation dans les nanostructures magnétiques

2. Électronique de Spin

2.1. Description

2.2. Retour sur les mécanismes et origines de l'électronique de spin

2.3. Magnétorésistance des jonctions tunnel

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

1. Introduction

2. Les mémoires de masse

2.1. Mémoires de masse : le disque dur

2.2. Au delà du disque dur, les techniques de sondes locales

3. Les mémoires matricielles

3.1. Principes généraux du stockage matriciel

3.2. Difficultés liées à la réduction des cellules mémoires à des dimensions nanométriques

3.3. Matrices Mémoires : technologies répandues

3.4. Concepts mémoire en développement

4. Discussion

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 applications
 - 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 permises du cristal photonique
 - 3.4. Les structures avec défauts
 - 3.5. Conclusion et perspectives

Chapitre 17. INTRODUCTION À LA NANOPHOTONIQUE POUR LA BIOLOGIE

1. Introduction
2. Introduction aux processus d'absorption et d'émission de lumière par 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 luminescentes à base de semi-conducteurs et de métaux
 - 3.3. Ingénierie moléculaire pour la biophotonique
4. Instrumentation nano-photonique pour la biologie
 - 4.1. La détection optique de molécules uniques par fluorescence
 - 4.2. Microscopie multi-photonique et microscopie 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. Potentiels et forces interatomiques
 - 2.2. La surface d'énergie potentielle
 - 2.3. La dynamique moléculaire classique
 - 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 ab initio
 - 3.4. Les forces inter-atomiques en ab initio
 - 3.5. Utilisation des fonctions d'ondes et valeurs propres électroniques
4. Conclusions

Chapitre 19. ARCHITECTURES DE CALCUL ET NANOTECHNOLOGIES : VERS LE NANO-ORDINATEUR

1. Introduction
2. Architecture du calculateur et fonctions de base
 - 2.1. Architecture typique d'un calculateur
 - 2.2. La mémoire
 - 2.3. Les interconnexions
 - 2.4. Les opérateurs
 - 2.5. Considérations technologiques
 - 2.6. Nanomémoire, nano-opérateurs, nanoconnexions
3. Quelques pistes architecturales
 - 3.1. Calculer en utilisant seulement la mémoire

3.2. Architecture de calcul reconfigurables

3.3. Automates cellulaires

3.4. Réseaux de neurones

4. Environnement du calculateur

4.1. Codage de l'information

4.2. Tolérance aux défauts

5. Perspectives

d'Évry-Val d'Essonne

Retour