



PHYSIQUE DES MICRO- et NANOSTRUCTURES PHY 723

COURS	
Titre: Physique des micro et nanostructures	
Sigle :	PHY 723
Crédits :	3
Cours magistraux :	4 heures/semaine
Travail personnel :	5 heures/semaine

PROFESSEUR
Nom : D. Morris
Bureau : D2-1084-5
Horaire de disponibilité : à déterminer au début du cours

PLACE DU COURS DANS LE PROGRAMME
Type de cours : optionnel (module nanotechnologies et nanosciences du baccalauréat en physique; diplôme 2 ^e cycle en nanomatériaux; maîtrise en physique ou en génie électrique; doctorat en physique)
Cours préalables : PHQ 585 Physique du solide ou un équivalent
Cours concomitants : AUCUN

MISE EN CONTEXTE DU COURS

Les avancées technologiques des 30 dernières années ont permis de parfaire les techniques de fabrication et de caractérisation de microstructures semiconductrices et de nanomatériaux. Par une approche dite « bottom-up » il est maintenant possible de faire croître des multicouches semiconductrices et des nanomatériaux avec un contrôle des épaisseurs et de la taille à l'échelle nanométrique. Par une approche dite « top-down » il est aussi possible de réaliser des dispositifs micro- et nano-structurés utiles pour une intégration à grande échelle dans un circuit électronique ou photonique. Les propriétés structurales de ces structures et matériaux peuvent être obtenues via une panoplie de techniques de caractérisation de pointe (diffraction des rayons-X, AFM, STM, SEM, etc.). Diverses techniques optiques (photoluminescence, absorption, cathodoluminescence, etc.) et de transport électronique (effet Hall, I-V, C-V, etc.) permettent d'avoir accès à leurs propriétés physiques. Dans le cas de structures à dimensionnalité réduite, des effets quantiques peuvent apparaître et modifier significativement les propriétés optiques et électroniques de ces matériaux. Des approches analytiques et numériques découlant des équations fondamentales de la mécanique quantique et de la physique statistique, permettent de bien expliquer l'origine microscopique des propriétés physiques de ces matériaux. Il est maintenant possible de concevoir des microstructures et nanomatériaux artificiels avec des propriétés spécifiquement dédiées à une application particulière, telle la détection d'une biomolécule spécifique. Le cours PHY 723 abordera quelques aspects de la physique des microstructures et nanostructures essentiels à la compréhension d'un grand nombre de dispositifs électroniques, optoélectroniques et photoniques modernes.

OBJECTIF GÉNÉRAL

Le cours PHY 723 vise à décrire les phénomènes physiques régissant les propriétés électroniques et optiques des microstructures et des nanomatériaux, ainsi que le fonctionnement de dispositifs avancés intégrant ce type de matériaux.

PLAN DE LA MATIÈRE ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Le contenu du cours est réparti en 7 thèmes, dont la liste est donnée ci-après. Les sujets abordés, le nombre approximatif d'heures de cours correspondant, et les objectifs spécifiques à accomplir par l'élève à la fin de chaque thème, sont indiqués.

- Thème 1. Fonctions d'onde et états électroniques : quelques rappels de mécanique quantique (4 heures)
- Fonction d'onde et paquet d'ondes.
 - Opérateurs, valeurs propres et fonctions propres, équation de Schrödinger.
 - Conditions aux frontières et normalisation de la fonction d'onde.
 - Quantification des états d'énergie d'un électron confiné dans une boîte.

Thème 2. Physique des semiconducteurs et structure de bandes (5 heures)

- Réseau cristallin, notions de symétrie.
- Des orbitales atomiques à la structure de bandes.
- Structure de bandes de différents semiconducteurs (Si, Ge et III-V).
- Masse effective et densités d'états.
- Couplage spin-orbite.
- Méthode $\vec{k} \cdot \vec{p}$ de calcul de bandes.

Thème 3. Hétérostructures, micro et nanostructures (8 heures)

- Croissance et fabrication : modulation de dopage et de composition, auto-assemblage, gravure.
- Différents types d'hétérostructures, de micro et de nanostructures. Nanocristaux.
- Densité d'états 2D, 1D et 0D.

Thème 4. États excitoniques, impuretés et états de surface (4 heures)

- Excitons libres et liés, complexes excitoniques.
- Impuretés : type hydrogénoïde, niveaux profonds, états d'interface et de surface.

Thème 5. Propriétés optiques de micro et nanostructures (9 heures)

- Éléments de matrice pour l'absorption.
- Règles de sélection.
- Transitions directes et indirectes, intra et inter-bandes.
- Aperçu des techniques de caractérisation des propriétés optiques.
- Caractéristiques typiques de quelques microstructures et nanostructures.
- Électro-absorption, effet Stark, effet Kerr, et effet photoréfractif

Thème 6. Micro-structuration des matériaux et des surfaces de dispositifs : influence sur les propriétés optiques (4 heures)

- Guide d'onde et cavité optique
- Matériaux à gap photonique

Thème 7. Application aux dispositifs optoélectroniques et photoniques (6 heures)

- Photodétecteurs et cellules solaires
- Émetteurs de lumière large-bande
- Laser à puits quantiques
- Source à photons uniques
- Mémoires optiques

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

- **Exposés magistraux.** Le professeur y expose les concepts importants du cours. Durant ces périodes, les élèves sont fortement encouragés à poser des questions. Le professeur utilise principalement des présentations Power-Point (accessibles via sa page WEB personnelle). Le rythme des exposés devrait permettre aux élèves d'annoter les notes du professeur et d'y ajouter des compléments comme des démonstrations.
- **Séances d'exercices.** Lors de ces séances, le professeur aide les élèves à poser correctement le problème et résume la méthodologie à suivre pour résoudre ce problème.
- **Devoirs.** Des retours sont faits en classe sur les problèmes rencontrés par les élèves dans leurs devoirs.

ÉVALUATION

Les évaluations, détaillées au point 1 ci-dessous, sont sommatives. L'évaluation formative résulte de l'interaction entre le professeur et les étudiants lors du retour en arrière fait après chacune des évaluations sommatives.

1. Méthodes d'évaluation :

- 3 devoirs;
- 2 résumés d'article scientifique;
- Un examen final

2. Pondération :

- 30% pour les devoirs;
- 30% pour les exposés oraux;
- 40% pour le final.

3. Descriptif des méthodes d'évaluation:

Devoir: Travail individuel consistant à résoudre des problèmes d'applications des connaissances et notions vues en classe.

Résumé: Travail individuel consistant en une présentation de 10 à 15 minutes résumant un article paru dans la littérature spécialisée. Le choix de l'article est fait par le professeur. La présentation est faite en classe devant les autres élèves.

Noter que les exigences pour ces résumés seront plus importantes pour les étudiants aux études supérieures.

Examen: Examen de type traditionnel avec documentation permise.

4. Calendrier des activités d'évaluation :

- Les devoirs seront répartis tout au long de la session;

- Le premier exposé devrait se tenir durant la semaine des intra tandis que le second exposé devrait avoir lieu durant les deux dernières semaines de cours.

BIBLIOGRAPHIE

Fundamentals of Nanoelectronics, George W. Hanson

Énergie et Fonctions d'Onde des Semiconducteurs, Guy Fishman

Quantum Semiconductor Structures, Fundamentals and Applications, C. Weibuch and B. Vinter

Wave-Mechanics Applied to Semiconducteurs Heterostructures, Gerald Bastard

Physique des Semiconducteurs, 5^e édition, Henry Mathieu

Electronic States and Optical Transitions in Solids, Bassani and Pastori Parravicini

Nanostructures : Theory and Modelling, C. Delerue and M. Lannoo

Quantum Dots : L. Jacak, P. Hawrylak, A. Wojs

Optics of Semiconductors and Their Nanostructures, H. Kalt and M. Hetterich (eds)

Nano-optoelectronics : Concepts Physics and Devices, M. Grundmann (ed.)

Quantum Dot Heterostructures, D. Bimberg, M. Grundmann and N.N. Ledentsov

Photonic Crystal : Molding the flow of light, 2nd edition, J. Joannopoulos, S.G. Johnson, J. N. Winn, R.D. Meade

FICHE SIGNALÉTIQUE

PHY 723 (3 crédits)

Physique des micro- et nanostructures

Objectif(s)

Comprendre les concepts physiques décrivant les propriétés électroniques et optiques des micro- et nanostructures, et les applications aux dispositifs avancés.

Contenu

Structure de bandes électroniques des semi-conducteurs. Gaz électronique à dimensionnalité réduite, quantification électronique. Nanocristaux, micro- et nanostructures. Impuretés et états de surface. Propriétés optiques linéaires et non linéaires : règles de sélection, effet Kerr, effet photoréfractif, électro-absorption, amplification optique. Matériaux à gap photonique, cavités et guides d'ondes. Applications aux sources laser, aux sources à photon unique, aux photodétecteurs, ainsi qu'aux mémoires optiques.

Préalable(s)

PHQ 585