

# Dispositifs semi-conducteurs

**Equipe enseignante :** G. Leo (PR), A. Altieri (MCF), P. Glidic (doctorant), M. Ravaro (IR)

**Heures :** 6h de Cours-TD, 26h de Cours, 14h de TD, 8h de TP

**ECTS :** 4 pour l'EIDD, 5 pour le Master de Physique fondamentale et applications (MPFA)

## Objectif

Comprendre les aspects fondamentaux à la base du fonctionnement des dispositifs électroniques et optoélectroniques :

- notions de base sur la physique des semi-conducteurs : structure de bande, statistique des porteurs, dopage, mobilité ;
- transport et diffusion dans une jonction p-n, comme la brique de base pour le fonctionnement de plusieurs dispositifs ;
- dispositifs électroniques : diode, transistor JFET, transistor bipolaire ;
- dispositifs optoélectroniques : photo-détecteurs, LED, diodes lasers ;
- notions clés sur les technologies et les processus de fabrication.

## Prérequis

Maths : développements limités, série de Fourier, calcul intégral et équations différentielles ;

Physique : électrostatique, électromagnétisme, bases des circuits électriques RCL ; physique du solide (seulement pour le parcours Physique fondamentale du MPFA).

## Organisation

2 Cours-TD de 3h d'introduction à la physique des semi-conducteurs pour les étudiants de l'EIDD et du parcours Physique appliquée du MPFA (A. Altieri, 1 groupe)

13 CM de 2h (G. Leo, 1 groupe)

7 TD de 2h (A. Altieri, groupe ANGLAIS ; P. Glidic, 1 groupe FRANÇAIS)

2 TP de 4h sur les diodes lasers (M. Ravaro, 2 groupes EIDD et 1 groupe Physique)

## Evaluation

30% évaluation continue (cours, TD) ; 70% examen final

## MATERIEL DIDACTIQUE

Présentations Powerpoint des CM et textes des TD disponibles sur Moodle.

## TEXTES DE CONSULTATION

- **RV** : E. Rosencher, B. Vinter, *Optoelectronics*, Cambridge University Press, 2002.
- **MK** : R. S. Muller, T. I. Kamins, *Device Electronics for Integrated Circuits*, 3rd ed., Wiley, 2002.
- **ST** : B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 3rd ed., Wiley 2019.

# PROGRAMME 2021

## Semaine 3

### Introduction générale et bases de physique des semi-conducteurs (2×3h Cours-TD, AA)

Rappels de mécanique quantique de l'électron [RV §1.1-1.4]. Cristaux, fonction de Bloch, zone de Brillouin, bandes d'énergie, masse efficace, densité des états, notion de trou [RV §1.1-1.2].

### Introduction au cours (1h Cours, GL)

Finalité et modalités de l'enseignement, présentation de l'équipe enseignante, description du programme.

## Semaine 4

### Dopage et description statistique de l'équilibre thermique (2h Cours, GL)

Donneurs et accepteurs, équilibre thermique, loi d'action de masse, fonction de Fermi. Porteurs libres : vitesse de dérive et mobilité ; courant de diffusion et relation d'Einstein [MK §1.1-1.2].

### Contacts métal-semiconducteur 1&2 (4h Cours, GL)

Equilibre dans les systèmes d'électrons. Jonction idéale métal – semi-conducteur : diagramme de bandes ; charge, région de déplétion et capacité ; jonction polarisée, barrière Schottky. Caractéristiques courant-tension de la diode de Schottky : barrière Schottky et barrière Mott. Contacts ohmiques tunnel et Schottky, longueur de Debye. Effets des états de surface.

## Semaine 5

### La jonction p-n /1&2 (4h Cours, GL)

Distribution non-uniforme d'impuretés : potentiel, équation de Poisson, approximation de quasi-neutralité. La jonction p-n abrupte : approximation de déplétion, barrière de potentiel, longueur de Debye. Jonction p-n polarisée inversement : largeur de la zone déplétée, champ électrique maximum, capacité. Rupture de la jonction : effet Zener et rupture par avalanche. Le transistor à jonction à effet de champ. Courants dans les jonctions p-n : équation de continuité, génération et recombinaison, capture et émission par des états localisés, recombinaison SRH [MK §4.1-5.2].

## Semaine 6

### La jonction p-n /3 (2h Cours, GL)

Caractéristiques courant-tension des jonctions p-n : conditions de bord pour les densités des porteurs minoritaires, analyse de la diode idéale, courants dans la région de charge spatiale. Hétérojonctions. Stockage de charge et réponse transitoire de la diode [MK §5.4-5.4].

### Exercices sur la physique des semi-conducteurs (2h TD, AA & PG)

## Semaine 7

### Le transistor bipolaire (2h Cours, GL)

Effet transistor. Fonctionnement en région active, gain de courant. Le transistor en régime de commutation. Régions de fonctionnement [MK §6.1-6.3].

### Exercices sur les courants de dérive/diffusion et sur la diode Schottky (2h TD, AA & PG)

## Semaine 8

### Vacance

## Semaine 9

### Technologie des dispositifs semi-conducteurs (2h Cours, GL)

Le processus de fabrication planaire du silicium. Croissance cristalline, Oxydation thermique, Lithographie, Ajout et diffusion des porteurs, déposition chimique en phase vapeur, épitaxie, interconnexion et packaging. Le processus de fabrication planaire des III-V. Fabrication de dispositifs intégrés : résistor, condensateur, diode, transistor JFET, transistor bipolaire [MK §2.1-2.8, 2.10, 3.6, 5.6, 6.5].

### Exercices sur la jonction p-n (2h TD, AA & PG)

## **Semaine 10**

### Les photons dans les semi-conducteurs (2h Cours)

Hétérostructures et puits quantiques dans les dispositifs optoélectroniques [ST §17.1 F,G]. Interactions des photons avec les porteurs : transitions inter-bande, densité d'états joints ; absorption, émission et gain dans les semi-conducteurs massifs et avec confinement quantique. [ST §17.2 A-F].

### Exercices sur le transistor bipolaire (2h TD, AA & PG)

## **Semaine 11**

### Sources de photons semi-conductrices (2h Cours)

Diodes électroluminescentes : électroluminescence à l'équilibre thermique et en présence d'injection de porteurs ; densité spectrale des photons. Caractéristique des LED : flux de photons intérieur ; flux de photons extérieur ; efficacité ; distribution spectrale. Amplificateurs laser à semi-conducteur : gain, bande [ST §18.1-2].

### Lasers semi-conducteurs à injection (2h Cours)

Amplification, rétroaction et oscillation. Pertes du résonateur, seuil laser. Puissance : flux interne de photons ; flux externe et efficacité ; comparaison entre une diode laser et une LED. Distributions spectrale et spatiale. Guide optique : sélection des modes transverses et longitudinaux. Laser à confinement quantique : Laser à QW (densité des états, coefficient de gain, densité de courant). Mention des lasers à cascade quantique et des lasers à microcavité et à nanocavité [ST §18.3-6].

## **Semaine 12**

### Photo-détecteurs à semiconducteur (2h Cours)

Propriétés des photo-détecteurs à semi-conducteur : rendement quantique, responsivité spectrale, temps de réponse ; photoconducteurs ; photodiodes : p-n, p-i-n et à hétérostructure ; photodiodes à avalanche : principe de fonctionnement, gain et responsivité spectrale, temps de réponse ; bruit dans les photo-détecteurs : bruit de grenaille, bruit de gain, bruit électrique ; sensibilité des récepteurs analogiques (SNR) et numériques (BER). [ST chapitre 19].

### Exercices sur la technologie des semi-conducteurs (2h TD, AA & PG)

## **Semaine 13**

### Exercices sur les diodes laser (2h TD, AA & PG)

### Exercices sur les photodiodes (2h TD, AA & PG)

## **Semaine 14**

### Diodes laser /1 (4h TP pour le groupe 1 de l'EIDD, MR)

### Diodes laser /1 (4h TP pour le groupe du MPFA, MR)

## **Semaine 15**

Diodes laser /2 (4h TP pour le groupe 1 de l'EIDD, MR)

Diodes laser /2 (4h TP pour le groupe du MPFA, MR)

## **Semaine 16**

Vacance

## **Semaine 17**

Vacance

## **Semaine 18**

Diodes laser /1 (4h TP pour le groupe 2 de l'EIDD, MR)

Diodes laser /2 (4h TP pour le groupe 2 de l'EIDD, MR)