

# TD Composants électroniques et opto-électroniques

## Objectifs

- Expliquer le comportement d'un composant à semi-conducteurs à partir de son diagramme de bandes.
- Expliquer le fonctionnement de composants électroniques ou opto-électroniques simples : photodiode, diode laser, transistor.

## Rappel de la méthode du diagramme de bandes

1. À l'équilibre,  $E_F$  est constant dans toutes les zones du composant où les porteurs peuvent circuler (même principe que la surface de l'eau dans des vases communicants).
2. Loin des jonctions  $E_c$  et  $E_v$  se positionnent par rapport à  $E_F$ , en utilisant les densités de dopants qui fixent  $n$  et  $p$ .
3. Les variations de  $E_c - E_F$  et  $E_F - E_v$  au niveau des jonctions indiquent les variations de  $n$  et  $p$ , permettant de remonter aux variations de la densité de charge électrique  $\rho$  (sans oublier les dopants ionisés !), puis par intégration au champ électrique  $\mathcal{E}$  et au potentiel électrique  $\mathcal{V}$ .
4. La forme de  $\mathcal{V}$  donne la forme des raccords des bandes au niveau des jonctions, qui suivent l'énergie potentielle des électrons  $-q\mathcal{V}$ .
5. On peut ensuite raisonner de façon classique en considérant les électrons et les trous comme des particules dans des barrières de potentiel formées par le champ électrique.

## I Transistor MOS

On considère une structure NMOS : métal-oxyde-semi-conducteur dopé P.<sup>1</sup> La couche d'oxyde est considérée comme un isolant parfait, qui empêche le courant de passer entre la zone métallique (appelée *grille*) et le SC dopé. Mais on peut quand même appliquer une tension électrique, qui décalera les bandes du SC comme pour une jonction.

**Question 1** La tension appliquée  $\mathcal{V}_g$  est positive : potentiel électrique positif au niveau de la grille. Dessiner le diagramme de bandes dans le semi-conducteur, d'abord pour  $\mathcal{V}_g$  faible, puis pour  $\mathcal{V}_g$  plus élevée. Remarquer que dans ce dernier cas, au-delà d'un certain seuil, les densités de charge et de porteurs à l'interface oxyde-SC changent qualitativement. Proposer une façon d'utiliser cette structure pour réaliser un transistor : composant dont la conductivité peut être contrôlée par une tension de commande.

## II Photodiode P-I-N

**Question 2** Tracer l'allure du diagramme de bandes d'une jonction P-I-N : une zone intrinsèque en sandwich entre une zone dopée N et une zone dopée P. On fera attention aux zones de charge d'espace dans les différentes zones, et à la forme des bandes dans la zone I. (Indice : on peut négliger la densité de charge électrique dans la zone I ; le justifier.)

---

1. Ce n'est pas une faute de frappe, c'est bien un dopage P pour le NMOS, et on aurait eu un dopage N pour une structure PMOS.

**Question 3** Si on polarise la jonction P-I-N en inverse (potentiel électrique négatif côté P et positif côté N), est-ce que la barrière de potentiel augmente ou diminue ? Le courant électrique va-t-il être fort ou faible ?

**Question 4** On injecte de la lumière au niveau de la zone I, de puissance  $P_{\text{opt}}$  constituée de photons d'énergie  $h\nu > E_g$ . Que va-t-il se passer en termes de courant électrique, quelle sera la différence avec la question 3 ? Proposer une expression pour le courant en fonction de  $P_{\text{opt}}$ .

### III Diode laser à hétérojonction

On considère une structure en « double hétérojonction » : une fine « zone active » de gap  $E_g$ , dopée P, en sandwich entre deux zones de « substrat », dopées respectivement P et N, mais d'un matériau semi-conducteur différent, de gap  $E'_g > E_g$ .

On applique une tension  $\mathcal{V}_{\text{app}}$  dans le sens direct : potentiel électrique positif sur la zone P.

**Question 5** Représenter le diagramme de bandes hors d'équilibre. On ne se préoccupera pas de la forme exacte des raccords au niveau des jonctions, et on fera les hypothèses suivantes :

- $\mathcal{V}_{\text{app}}$  est telle que les bandes sont à la même hauteur dans la zone N et la zone P du substrat ;
- les zones du substrat sont localement à l'équilibre, mais ne sont pas à l'équilibre entre elles, notamment on peut définir un niveau de Fermi  $E_F(P)$  dans la zone P et un  $E_F(N)$  dans la zone N, qui diffèrent du décalage  $-q\mathcal{V}_{\text{app}}$  ;
- la zone active est hors d'équilibre, on ne peut pas définir de niveau de Fermi, mais on s'intéressera à la position relative de  $E_c$  et  $E_v$  par rapport à  $E_F(N)$  et  $E_F(P)$ , en supposant :  $q\mathcal{V}_{\text{app}} > E_g$ .

**Question 6** La zone active étant fine, on suppose que le remplissage de la BC et de la BV dans cette zone est imposé par les porteurs majoritaires qui diffusent depuis le substrat :

- la BC est remplie par les électrons diffusant depuis la zone N avec leur distribution de Fermi au niveau  $E_F(N)$  ;
- pour la BV, on raisonne sur les trous, qui diffusent depuis la zone P, avec leur distribution de Fermi au niveau  $E_F(P)$ .

Commenter sur la densité d'électrons et de trous dans la zone active. La situation semble-t-elle plus propice à l'absorption ou à l'émission de photons ? Faire le lien avec une condition vue en COM101 sur le fonctionnement des lasers.