

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 ρ (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.¹ 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.

Réponse 1 Voir figure.

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.

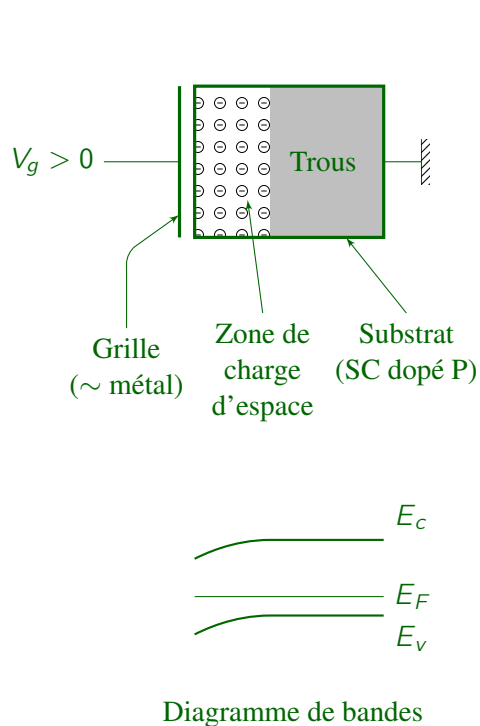


FIGURE 1 – Schéma et structure de bandes d'une structure MOS polarisée : un potentiel de grille positif repousse les trous du semi-conducteur dopé P, créant une zone de charge d'espace désertée de porteurs, et incurvant les bandes d'énergie.

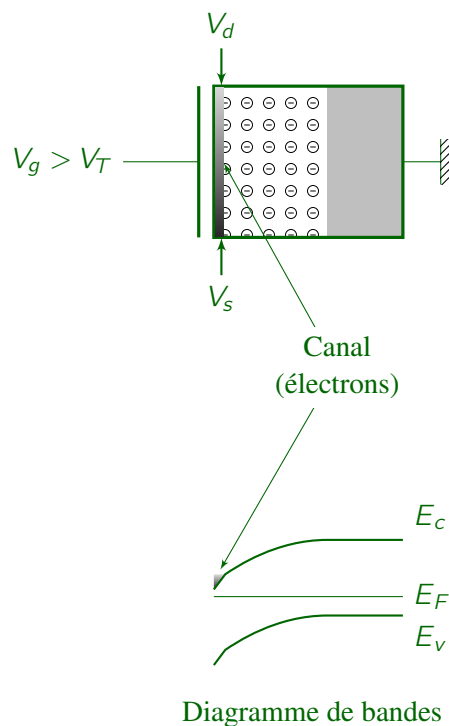


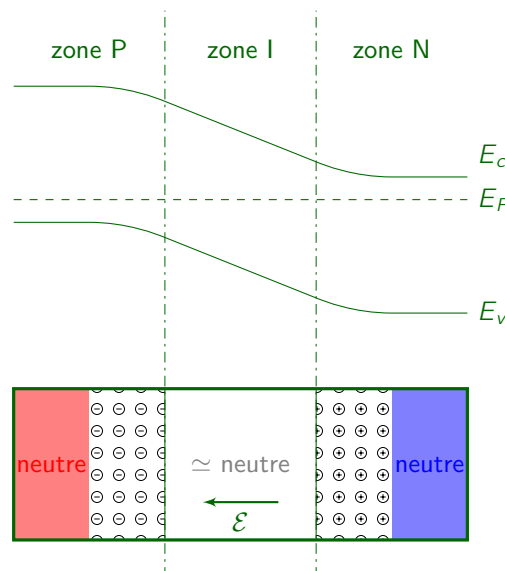
FIGURE 2 – Structure MOS polarisée au-dessus du seuil : au-delà d'une certaine limite, la polarisation de la grille rapproche la bande de conduction du semi-conducteur du niveau de Fermi. Les porteurs minoritaires se concentrent alors à la surface du semi-conducteur, créant alors un « canal » dont la conductivité peut être contrôlée finement par la tension de grille.

Réponse 2 Dans tout l'intervalle où le niveau de Fermi E_F est simultanément plus loin de E_c et E_v qu'il ne l'est dans les zones dopées, les densités de porteurs n et p sont toutes les deux négligeables devant la valeur de n dans la zone N (égale à la densité de dopants) et devant celle de p dans la zone P (idem).

(Remarque : on pourrait se dire que, le produit $n \times p = n_i^2$ étant constant, quand n diminue p augmente et vice-versa. Mais ça n'empêche pas n et p d'être toutes les deux négligeables simultanément devant les densités de dopants, car on choisit ces dernières grandes devant n_i .)

Par conséquent, dans les zones P et N au voisinage des jonctions, la densité de charge électrique n'est plus 0, car la charge due aux dopants ionisés n'est plus compensée par les porteurs que les dopants ont engendrés. Il se forme ainsi des zones de charge d'espace au voisinage des jonctions, de la même manière que dans une jonction P-N. La différence est qu'elles sont séparées par la zone I, où il n'y a pas de dopants, donc pas d'autres charges que les porteurs dont on a vu que la densité était faible dans cette zone, donc on peut négliger leur charge devant celle qui apparaît à côté dans les ZCE.

On en déduit ainsi la forme des raccords : parabolique dans les ZCE (ρ constante donc \mathcal{E} linéaire donc $-qV$ parabolique) ; et linéaire dans la zone I ($\rho \simeq 0$ donc \mathcal{E} constant donc $-qV$ linéaire).



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 ?

Réponse 3 Les bandes remontent côté P et s'abaissent côté N, donc la barrière augmente. Les ZCE (relativement isolantes car dépourvues de porteurs) s'épaississent, le courant va donc être faible.

(On pourrait remarquer que la barrière est orientée dans le bon sens pour faire passer les électrons dans le sens $P \rightarrow N$, qui correspond bien à la polarisation inverse. Sauf que les électrons arrivant dans la zone P depuis le générateur seront virtuellement tous annihilés par les trous avant d'arriver à la jonction ; augmenter la tension appliquée ne fera qu'ajouter à la charge électrique dans les ZCE, donc les élargir. Mais cette remarque aura son importance à la question suivante.)

Question 4 On injecte de la lumière au niveau de la zone I, de puissance P_{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_{opt} .

Réponse 4 Les photons ont une énergie supérieure au gap, donc suffisante pour exciter les électrons de la BV vers la BC, créant des paires électron-trou. Une fois dans la BC, les électrons peuvent dévaler la pente de la barrière de potentiel jusqu'à la zone N (et inversement pour les trous). C'était aussi le cas en polarisation inverse dans la question 3, mais les électrons du générateurs n'arrivaient tout simplement pas jusqu'à la jonction, alors qu'en absorbant de la lumière on crée des paires électron-trou directement au bon endroit.

Le photocourant induit correspond à une charge élémentaire q par photon absorbé, dont il y aura un flux $\frac{P_{\text{opt}}}{h\nu}$. Avec éventuellement un facteur d'efficacité η (qui en pratique sera proche de 100 %), on trouve :

$$I = \frac{\eta q}{h\nu} P_{\text{opt}}.$$

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 $E'_g > E_g$.

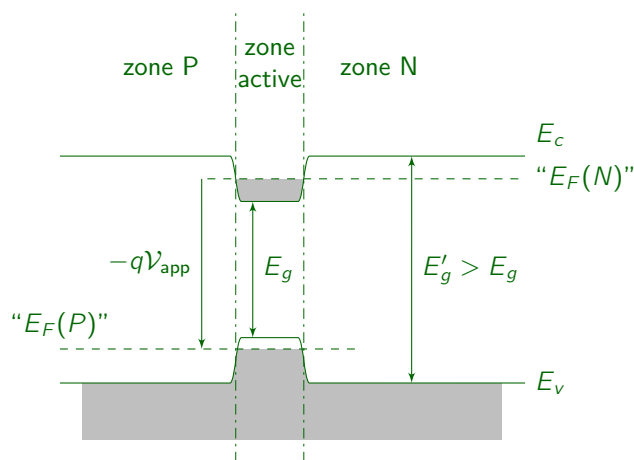
On applique une tension \mathcal{V}_{app} dans le sens direct : potentiel électrique positif sur la zone P.

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}_{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 : $q\mathcal{V}_{\text{app}} > E_g$.

Réponse 5 Les hypothèses données permettent de positionner les E_c et E_v des zones du substrat. On suppose toujours que E_F est dans la bande interdite à un niveau déterminé par la densité de dopage, proche de E_c mais en-dessous dans la zone N, proche de E_v mais au-dessus dans la zone P.

Par contre, dans la zone active, l'hypothèse que $q\mathcal{V}_{\text{app}} > E_g$ va imposer que E_c passe en-dessous de $E_F(N)$, ou E_v passe au-dessus de $E_F(P)$, ou les deux. (Cela aura des conséquences sur le « remplissage » des bandes dans la zone active, que l'on précisera question suivante.)



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.

Réponse 6 On constate que dans la zone active, $E_F(N)$ est au-dessus de E_c , donc tout le bas de la BC est rempli (forte densité d'électrons). De même, tout le haut de la bande de valence est vide (forte densité de trous). Autrement dit, les électrons occupent des états d'énergie au niveau de la BC, alors qu'il y a des états libres dans la BV, donc d'énergie inférieure.

Cette situation, qui n'est bien sûr possible que hors d'équilibre, est précisément ce qu'on appelle une « **inversion de population** », qui est à la base du fonctionnement des diodes laser : pour obtenir de la lumière cohérente, on doit la générer principalement via le phénomène d'émission stimulée (COM101, chapitre sur les lasers), mais ce phénomène est toujours en compétition avec l'absorption, qui réduit la puissance émise. Pour que ce soit l'émission stimulée qui domine, on a donc besoin de plus d'électrons dans les niveaux excités (i. e. d'énergie élevée) que dans les niveaux inférieurs. Ce n'est jamais le cas à l'équilibre, d'où l'expression.