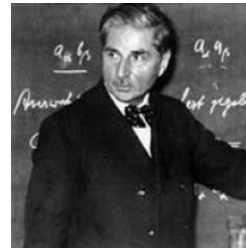


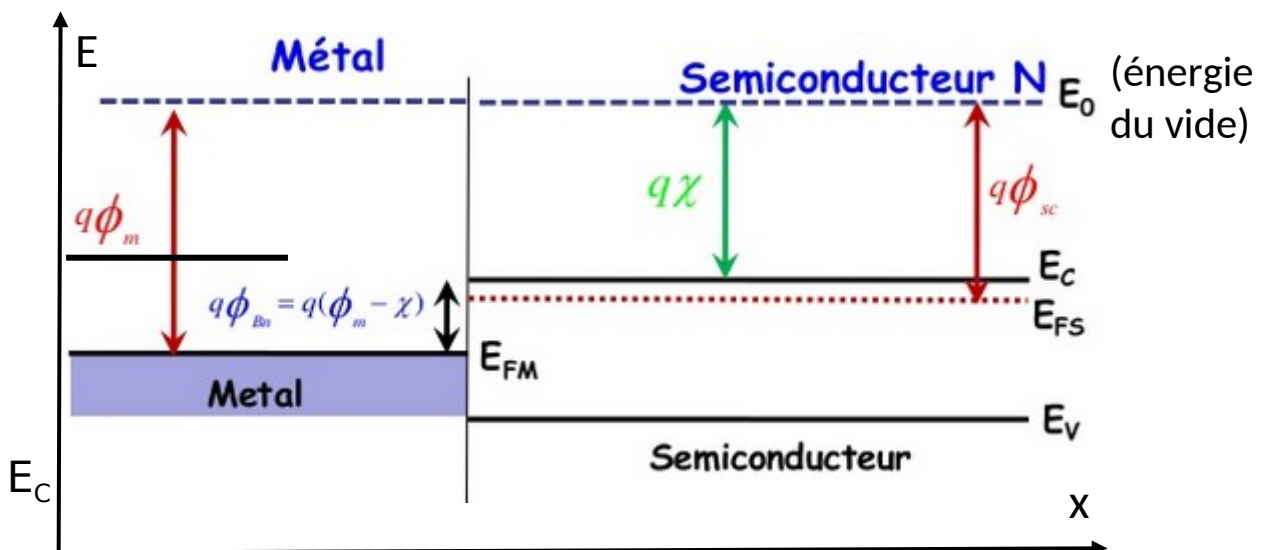
# DIODE SCHOTTKY

On va s'intéresser à l'origine d'une caractéristique parmi les plus fondamentales et les plus essentielles des semiconducteurs : la non linéarité. En effet, l'électronique, même linéaire, s'appuie sur le comportement non linéaire de la plupart des composants. C'est en particulier le cas de la diode Schottky, qui repose sur le contact entre un métal et un semiconducteur et aboutit à une caractéristique « rectifiante ». Sa particularité est que pour comprendre son fonctionnement on peut ne raisonner qu'avec un seul type de porteurs (dispositif « unipolaire »), les électrons ou les trous selon la nature du dopage du semiconducteur (N ou P). Un autre composant assez proche, la jonction PN, met en jeu les deux types de porteurs, mais l'origine principale de la non linéarité est similaire.



Walter Schottky

Dans cet exercice, on va comprendre assez facilement comment cette non linéarité se produit et quelles sont ses caractéristiques quantitatives principales



Dans cet exercice, on s'intéresse au contact entre un métal et un semiconducteur de type N, dont le niveau de dopage est  $N_D$ . On admettra que tous les donneurs sont ionisés.

« L'affinité électronique » est la distance entre l'énergie d'un électron dans le vide (sans énergie cinétique) et le bas de la bande de conduction. C'est une propriété du matériau. Le passage d'un électron en bas de BC du semiconducteur vers le bas de BC du métal implique une perte d'énergie fixe qui traduit la façon différente dont se sont construites les liaisons chimiques. L'écart  $E_C(\text{semiconducteur}) - E_C(\text{métal})$  est donc une propriété caractéristique de cette interface.

Le « travail de sortie » exprime l'énergie nécessaire à un électron au niveau de Fermi pour s'extraire du matériau vers le vide. Il est spécifique du matériau et diffère à nouveau entre le métal et le semiconducteur.

La « hauteur de barrière » est l'énergie nécessaire à un électron pour passer du niveau de Fermi du métal au bas de la bande de conduction du semiconducteur.

1/ Le schéma ci-dessus vous paraît-il « stable » ? Sinon, quel problème se pose et que peut-il se passer pour aboutir à une situation d'équilibre ?

Par un raisonnement qualitatif, modifier le « diagramme de bandes » ci-dessus pour respecter l'équilibre thermodynamique.

2/ Identifier différentes zones du point de vue électrique dans l'ensemble de la structure. Pour bien comprendre ce qu'il se passe, on prendra en compte que l'énergie d'un électron est celle qu'il a par rapport à la structure de bandes, additionnée de son énergie potentielle électrique (on peut parler d'énergie potentielle « électro-chimique »). Cela permet, par analyse de ce diagramme de bandes, de faire apparaître sous forme de 3 autres diagrammes (superposables):

- La répartition spatiale des charges électriques
- La répartition du champ électrique
- La répartition du potentiel électrique

Calculer la charge qui apparaît du côté métal et son équivalent du côté semiconducteur, puis la tension  $V_{bi}$  induite du côté semiconducteur par la création de la jonction.

3/ On s'intéresse maintenant à une situation hors d'équilibre, et on admettra que le niveau de Fermi reste constant dans le semiconducteur et subit une discontinuité à la jonction avec le métal.

- Dans le cas d'une tension positive appliquée au semiconducteur, comment les diagrammes de la question 2/ sont-ils modifiés ?
- Même question pour une tension négative

4/ Représenter, à l'équilibre thermique, la distribution FD sur le diagramme. Comment cette distribution est-elle modifiée, de part et d'autre de la jonction, en admettant une situation de quasi-équilibre dans le métal comme dans le semiconducteur ?

On va considérer que le courant électrique dans la diode résulte d'une part d'électrons venant du métal et traversant la jonction pour aller vers le semiconducteur et d'autre part l'inverse : des électrons venant du semiconducteur et traversant la jonction pour aller vers le métal.

En faisant deux hypothèses :

- Seuls les électrons d'énergie supérieure à la hauteur de barrière peuvent passer
- Le transport d'électrons d'un côté vers l'autre est directement proportionnel au nombre d'électrons venant de ce côté avec l'énergie suffisante

Montrer qu'on peut en déduire très simplement l'expression du courant en fonction de la tension appliquée.

# DIODE SCHOTTKY

## Corrigé

Dans cet exercice, on s'intéresse au contact entre un métal et un semiconducteur de type N, dont le niveau de dopage est  $N_D$ . On admettra que tous les donneurs sont ionisés.

« L'affinité électronique » est la distance entre l'énergie d'un électron dans le vide (sans énergie cinétique) et le bas de la bande de conduction. C'est une propriété du matériau. Le passage d'un électron en bas de BC du semiconducteur vers le bas de BC du métal implique une perte d'énergie fixe qui traduit la façon différente dont se sont construites les liaisons chimiques. L'écart  $E_c(\text{semiconducteur}) - E_c(\text{métal})$  est donc une propriété caractéristique de cette interface.

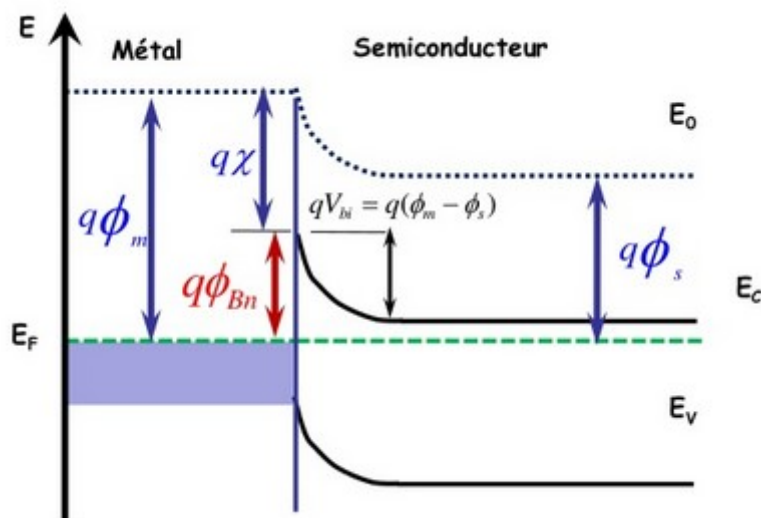
Le « travail de sortie » exprime l'énergie nécessaire à un électron au niveau de Fermi pour s'extraire du matériau vers le vide. Il est spécifique du matériau et diffère à nouveau entre le métal et le semiconducteur.

La « hauteur de barrière » est l'énergie nécessaire à un électron pour passer du niveau de Fermi du métal au bas de la bande de conduction du semiconducteur.

1/ Le schéma ci-dessus vous paraît-il « stable » ? Sinon, quel problème se pose et que peut-il se passer pour aboutir à une situation d'équilibre ?

Par un raisonnement qualitatif, modifier le « diagramme de bandes » ci-dessus pour respecter l'équilibre thermodynamique.

Le niveau de fermi n'étant pas uniforme, il ne peut s'agir d'une situation d'équilibre. Pour la réaliser, les électrons de la BC (proches de  $E_F$ ) vont « tomber » du côté métal, brisant la neutralité électrique locale. On aboutit à ce schéma :

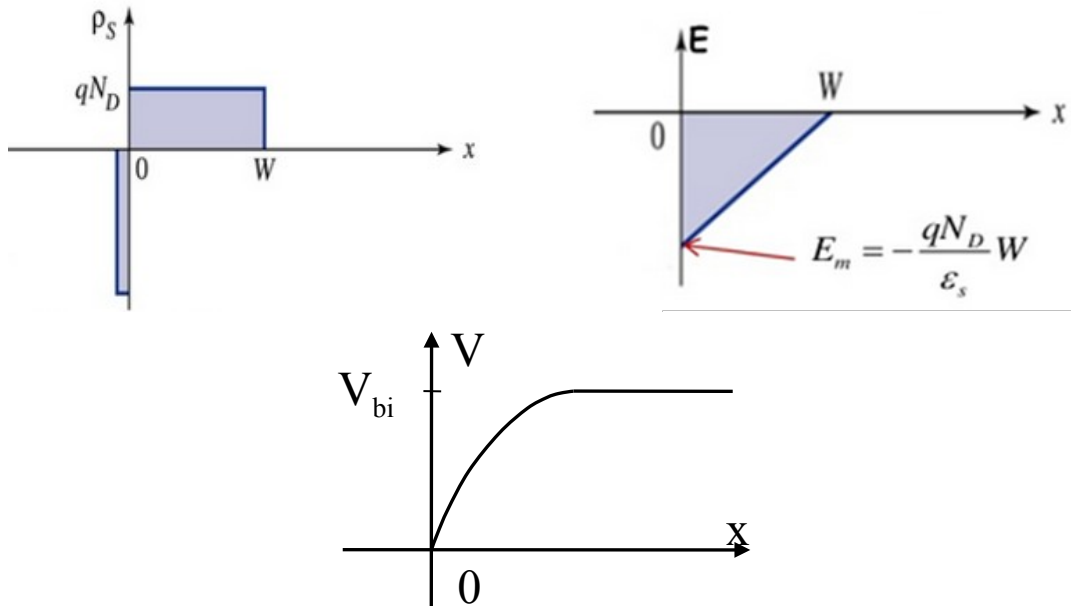


2/ Identifier différentes zones du point de vue électrique dans l'ensemble de la structure. Pour bien comprendre ce qu'il se passe, on prendra en compte que l'énergie d'un électron est celle qu'il a par rapport à la structure de bandes, additionnée de son énergie potentielle électrique

(on peut parler d'énergie potentielle « électro-chimique »). Cela permet, par analyse de ce diagramme de bandes, de faire apparaître sous forme de 3 autres diagrammes (superposables):

- La répartition spatiale des charges électriques
- La répartition du champ électrique
- La répartition du potentiel électrique

Calculer la charge qui apparaît du côté métal et son équivalent du côté semiconducteur, puis la tension  $V_{bi}$  induite du côté semiconducteur par la création de la jonction.



$$0 < x < W \quad \longrightarrow \quad \rho_s = qN_D -$$

$$\nabla^2 V = \frac{\rho_s}{\epsilon_s} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad \longrightarrow \quad \nabla E = \frac{dE}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}$$

$$E = \int dE = \int \frac{\rho_s(x)}{\epsilon_s} dx = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x + C_1 = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x - \frac{qN_D}{\epsilon_s} W$$

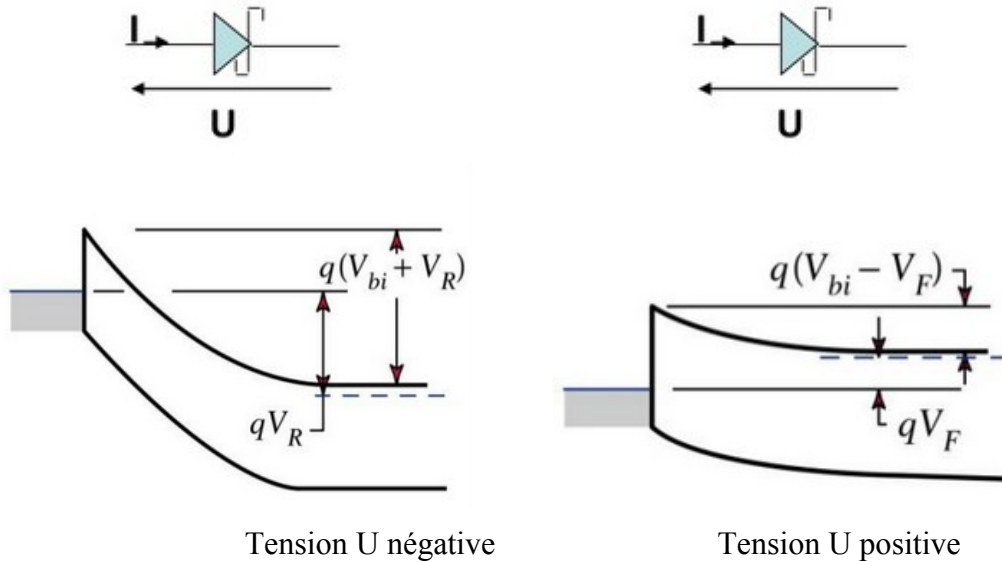
$$E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - W) \quad \longrightarrow \quad V(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left( Wx - \frac{x^2}{2} \right) + Cte$$

$$|V_{bi}| = \frac{qN_D W^2}{2\epsilon_s} \quad W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} |V_{bi}|}$$

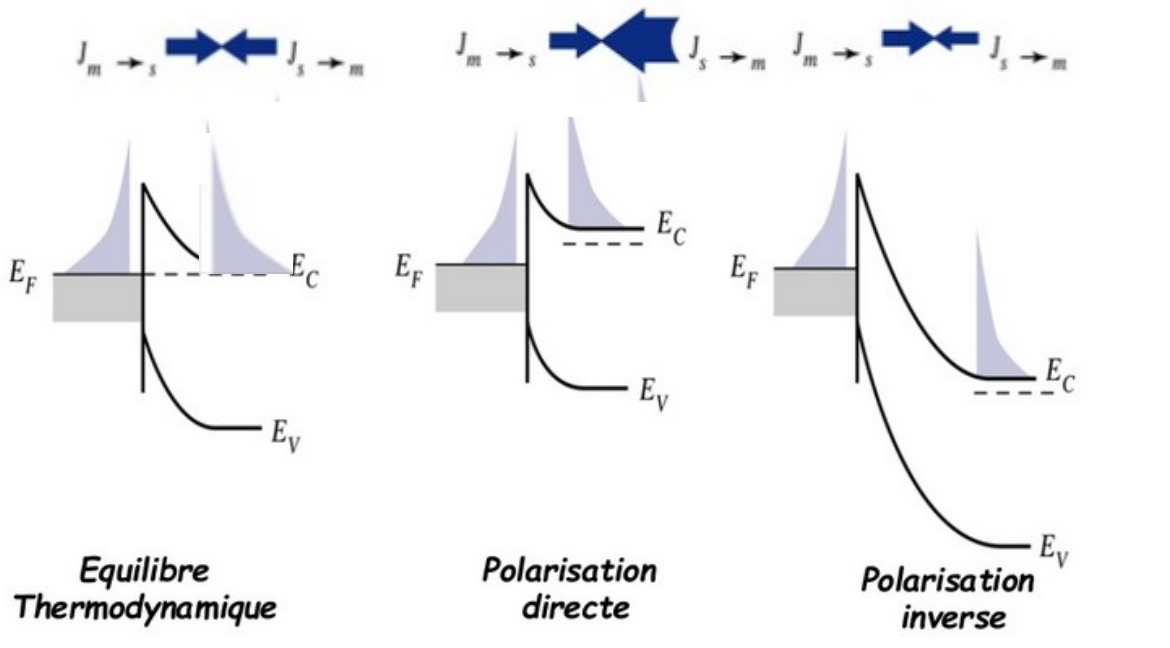
Entre 0 et W on a la « zone de charge d'espace », constituée des donneurs ionisés (charges positives fixes). Des charges libres ne pouvant pas subsister dans le volume d'un métal (conducteur « parfait »), elles se concentrent à sa surface c'est-à-dire à l'interface métal-semiconducteur. C'est donc, idéalement, un plan bidimensionnel d'électrons. Il en résulte une discontinuité du champ électrique à l'interface.

3/ On s'intéresse maintenant à une situation hors d'équilibre, et on admettra que le niveau de Fermi reste constant dans le semiconducteur et subit une discontinuité à la jonction avec le métal.

- Dans le cas d'une tension négative appliquée au métal, comment les diagrammes de la question 2/ sont-ils modifiés ?
- Même question pour une tension positive



4/ Représenter, à l'équilibre thermique, la distribution FD sur le diagramme. Comment cette distribution est-elle modifiée, de part et d'autre de la jonction, en admettant une situation de quasi-équilibre dans le métal comme dans le semiconducteur ?



On va considérer que le courant électrique dans la diode résulte d'une part d'électrons venant du métal et traversant la jonction pour aller vers le semiconducteur et d'autre part l'inverse : des électrons venant du semiconducteur et traversant la jonction pour aller vers le métal.

En faisant deux hypothèses :

- Seuls les électrons d'énergie supérieure à la hauteur de barrière peuvent passer
- Le transport d'électrons d'un côté vers l'autre est directement proportionnel au nombre d'électrons venant de ce côté avec l'énergie suffisante

Montrer qu'on peut en déduire très simplement l'expression du courant en fonction de la tension appliquée.

Il s'agit d'un courant « thermoïonique », i.e. il provient des électrons (en faible quantité) excités thermiquement au-dessus de la barrière. Or du côté métal, ce nombre est :

$$N = \int_{q\Phi_{BN}}^{\infty} f_{FD}(E) \rho(E) dE \cong \int_{q\Phi_{BN}}^{\infty} \exp(-E/k_{BT}) \rho(E) dE = Cte_A \cdot \exp(-q\Phi_{BN}/k_{BT}) \quad \square$$

D'après l'hypothèse  $J_{M \rightarrow S} = Cte_B \cdot \exp(-q\Phi_{BN}/k_{BT}) = J_{sat}$ , avec  $J_{sat} < 0$  compte tenu de la charge négative de l'électron, et à l'équilibre  $J_{S \rightarrow M} = -J_{M \rightarrow S}$

Lorsqu'on applique une tension U sur le métal (ou -U sur le semiconducteur), on a alors :

$$J_{M \rightarrow S}(U) = J_{M \rightarrow S}(0) \quad J_{S \rightarrow M}(U) = J_{S \rightarrow M}(0) \cdot \exp(qU/k_{BT})$$

$$\text{Au final : } J = J_{M \rightarrow S} - J_{S \rightarrow M} = |J_{sat}| \cdot [\exp(qU/k_{BT}) - 1]$$

Si  $U > 0$  (polarisation « en direct »), la densité de courant varie exponentiellement avec la tension appliquée, alors que si  $U < 0$  (polarisation « en inverse »), la densité de courant tend rapidement vers une valeur constante, le courant de « saturation ». On voit donc le caractère fortement non linéaire de la relation courant-tension, qui peut donc, très approximativement, s'assimiler à un dispositif bloquant en inverse et à un court-circuit en direct.

### Compléments (pour les très curieux)

$J_{sat}$  dépend exponentiellement de la hauteur de barrière, ce qui veut dire que la qualité « diode » de la jonction Schottky dépend du choix du couple métal-semiconducteurs. En pratique moins qu'on ne pourrait penser, car cette interface reliant des cristaux aux caractéristiques souvent très différentes (type de réseau cristallin, période du cristal... introduit des « défauts d'interface » qui sont des pièges à électrons très efficaces. Ce sont typiquement eux qui bloquent la valeur du niveau de Fermi à l'interface et déterminent la hauteur de barrière.

Le modèle électrique ci-dessus est très simplifié car il néglige des effets importants comme les défauts d'interface ou de surface, qui sont aussi des points de passage du courant. En inverse comme légèrement en direct, ce sont eux qui déterminent la valeur du courant, pour cette raison nettement plus fort que le courant de saturation qu'on pourrait calculer d'après le modèle. A forte tension inverse, des phénomènes de « claquage » peuvent se produire (ex. effet « Zener »), pouvant brutalement aboutir à la destruction de la diode. Par ailleurs, sous forte tension directe, la résistance série contribue largement à réduire le caractère exponentiel du courant avec U.

<https://fr.slideshare.net/omarbllaouhamou1/cours-master-phys-sc-chap-4-2015>