

CHAPITRE INTRODUCTION : INTERET DE L'ETUDE DES TECHNIQUES DE CARACTERISATION ET RAPPELS SUR LES PROPRIETES ELECTRIQUES DES SEMICONDUCTEURS

I. Introduction : Intérêt de l'étude des techniques de caractérisation :

Ce cours s'intéresse à des moyens expérimentaux ou des méthodes qui permettent de mesurer et de déterminer les propriétés essentielles des semiconducteurs ou de certains matériaux qui entrent en jeu dans la fabrication technologique des composants micro-électroniques, tel que l'oxyde de silicium, en tant que diélectrique. Ces méthodes sont appelées "techniques de caractérisation". Bien que ce cours soit axé sur des moyens de mesures de différents paramètres, tels que la résistivité, la mobilité, la concentration de porteurs libres, la durée de vie des porteurs excédentaires, et d'autres mesures telles que celle de l'épaisseur et de la quantité de charges dans un isolant, le dopage d'un semiconducteur (avec la caractérisation capacité-tension), l'indice optique, la taille des grains, la rugosité de surface, etc,... il sera nécessaire, pour certaines techniques, d'exposer des notions théoriques nécessaires à la compréhension de la méthode mise en œuvre pour l'accès à la mesure des caractéristiques.

L'étude des techniques de caractérisation est donc indispensable dans le domaine de la micro-électronique et des composants à semiconducteurs. Elles sont aussi nombreuses que diversifiées, et il est impossible de toutes les décrire dans le cadre d'un seul cours.

Pour mesurer une propriété ou une caractéristique d'un semiconducteur, il faut savoir choisir la méthode la mieux adaptée, puis, il faut savoir mettre en œuvre cette méthode pour pouvoir interpréter correctement et efficacement les résultats de mesures.

Dans ce cours, les quatre premiers chapitres seront consacrés aux méthodes de mesure des propriétés électriques des semiconducteurs (propriétés qui ont été étudiées au premier semestre de cette filière de master 1- UEF " Physique des composants à semiconducteurs 1"). Pour la résistivité, il s'agira de la méthode des quatre pointes ; pour la mobilité et la concentration de porteurs libres, ce sera la méthode de Van der Pauw (effet Hall) ; pour la durée de vie des porteurs, la méthode du déclin de la photoconductivité sera présentée et pour l'étude de la qualité de l'oxyde SiO₂, le calcul des états d'interfaces, l'épaisseur de l'isolant, la caractérisation C(V) d'une structure MIS sera étudiée. Enfin, les deux derniers chapitres regrouperont des exemples de techniques optiques (ellipsométrie, photoluminescence) et de techniques surfaciques et structurales.

Ce premier chapitre est consacré à de brefs rappels sur quelques propriétés des semiconducteurs, telles que la concentration des porteurs, la mobilité et la résistivité.

II. Les concentrations d'électrons et de trous dans les semiconducteurs:

Les électrons et les trous sont appelés les porteurs de charges. Leurs concentrations n et p sont données par : $n = N_C \cdot e^{(E_F - E_C)/kT}$ (1) avec $N_C = 2 \left[\frac{2\pi}{h^2} \cdot m_e kT \right]^{3/2} = (2/h^3) \cdot [2\pi \cdot m_e kT]^{3/2}$ (en cm⁻³) (3)

$$p = N_V \cdot e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (2) \quad \text{avec } N_V = 2 \left[\frac{2\pi}{h^2} \cdot m_p kT \right]^{3/2} = (2/h^3) \cdot [2\pi \cdot m_p kT]^{3/2} \quad (\text{en cm}^{-3}) \quad (4)$$

h : constante de Planck, k : constante de Boltzman, m_e : masse effective de l'électron, m_p : masse effective du trou, T : la température en degrés Kelvin.

Pour un semiconducteur dopé de type N avec N_D atomes donneurs, la concentration n est donnée par $n=N_D$ avec l'approximation $p \ll n$

$$\text{on a donc : } n = N_D = N_C \cdot e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (5)$$

Pour un semiconducteur dopé de type P avec N_A atomes accepteurs, la concentration p est donnée par $p=N_A$ avec l'approximation $n \ll p$

$$\text{et on a : } p = N_A = N_V \cdot e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (6)$$

Pour un semiconducteur intrinsèque :

L'équation de neutralité est $n = p$: la concentration d'électrons est égale à la concentration de trous.

On écrit $n = p = n_i$ (en cm^{-3}) où n_i est la concentration intrinsèque.

Le produit $n.p$ est obtenu à l'aide des relations (5) et (6) :

$$n.p = n_i^2 = N_C.N_V \cdot e^{-E_g/kT} \quad (7) \text{ où } E_g \text{ (en eV) est la largeur de la bande interdite ou "gap".}$$

La relation $n.p = n_i^2$ (8) est appelée la **loi d'action de masse**. C'est une loi très importante, on l'applique aussi pour un semiconducteur extrinsèque ou dopé.

D'après (7) on obtient la relation qui exprime la concentration de porteurs intrinsèques :

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (9)$$

Avec les formules de N_C et N_V données plus haut (relations (3) et (4)), on peut écrire :

$$n_i = (2/h^3) \cdot [2\pi \cdot kT]^{3/2} \cdot (m_e \cdot m_p)^{3/4} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (10)$$

Remarque : Pour mettre en évidence la dépendance de n_i^2 avec la température T , le produit " $n.p$ " peut s'écrire :

$$n.p = n_i^2 = N_C.N_V \cdot e^{-E_g/kT} = (\text{constante}) \cdot T^3 \cdot e^{-E_g/kT} \quad (11)$$

En rappelant que $N_C = 2 [(2\pi/h^2) \cdot m_e kT]^{3/2}$ (3) et $N_V = 2 [(2\pi/h^2) \cdot m_p kT]^{3/2}$ (4), le facteur $(\text{constante}) \cdot T^3$ dans la relation (10) provient du produit " $N_C.N_V$ ".

III. La mobilité des porteurs (électrons et trous) dans un semiconducteur

Sous l'action d'un champ électrique ξ , les porteurs (électrons ou trous) se déplacent suivant un mouvement ordonné avec une vitesse d'entraînement v qui reste proportionnelle au champ électrique appliqué, tant que celui-ci est faible. On rappelle que l'unité du champ électrique est le Volt/m (dans le système MKSA) ou Volt/cm.

Pour les électrons, la vitesse $v_n = - (q\tau/m_e) \cdot \xi$ avec $\mu_n = q\tau/m_e$

μ_n est la mobilité des électrons (en $\text{cm}^2/\text{Volt.s}$), q la charge de l'électron, m_e sa masse effective, τ : le temps moyen entre deux collisions ou chocs.

La relation donnant la vitesse s'écrit alors $v_n = -\mu_n \cdot \xi$ (en cm/s)

Pour les trous les relations sont analogues : $v_p = (q \cdot \tau / m_p) \cdot \xi$ avec $\mu_p = q \cdot \tau / m_p$

μ_p est la mobilité des trous, q la charge du trou, m_p sa masse effective, τ : le temps moyen entre deux collisions.

D'où $v_p = \mu_p \cdot \xi$

IV. La densité de courant de conduction "J_c", la conductivité "σ" et la résistivité "ρ" :

Le déplacement de porteurs sous l'effet du champ électrique ξ crée une densité de courant J appelée densité de courant de conduction et notée J_c . La densité de courant est définie comme étant "la concentration de particules chargées (électrons ou trous) qui traversent l'unité de surface pendant l'unité de temps" : en conséquence, elle s'exprime comme étant le produit de la charge par le flux de particules. La relation entre le courant I (en A) et la densité de courant J (en A/cm²) est : $J = I/S$, S étant la section ou la surface (en cm²).

Pour les électrons la densité de courant de conduction s'écrit

$$J_n = -q \cdot n \cdot v_n$$

n est la concentration des électrons (on rappelle que $n = N_D$ dans un semiconducteur de dopé de type N avec N_D atomes donneurs).

En remplaçant v_n par son expression $v_n = -\mu_n \cdot \xi$, on a :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \xi$$

De la même façon, pour les trous, les relations sont données par:

$$J_p = q \cdot p \cdot v_p$$

p est la concentration des trous (on rappelle que $p = N_A$ dans un semiconducteur de dopé de type P dopé avec N_A atomes accepteurs).

En remplaçant v_p par son expression $v_p = \mu_p \cdot \xi$, on a :

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \xi$$

Dans le cas général, où on considère le flux créé par les deux types de porteurs, on peut écrire que la densité de courant de conduction totale J_T est la somme :

$$J_T = J_n + J_p = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \xi + q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \xi = (q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p) \cdot \xi$$

Le facteur $(q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p)$ représente la conductivité du semiconducteur notée "σ" :

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$$

La résistivité "ρ" est définie comme étant l'inverse la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \text{ en } (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n+p)}$$

V. La conductivité "σ" et la résistivité "ρ" pour trois cas particuliers:

V.1. Pour le semiconducteur de type N dopé avec N_D atomes donneurs: on applique $n=N_D$ et $p \ll n$

La densité de courant est exprimée par la relation :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \xi = q \cdot N_D \cdot \mu_n \cdot \xi$$

La conductivité est $\sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n = q \cdot N_D \cdot \mu_n$

$$\text{et la résistivité } \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot N_D \cdot \mu_n}$$

V.2. Pour le semiconducteur de type P dopé avec N_A atomes accepteurs: on applique $p=N_A$ et $n \ll p$

La densité de courant est exprimée par la relation :

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \xi = q \cdot N_A \cdot \mu_p \cdot \xi$$

La conductivité est $\sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p = q \cdot N_A \cdot \mu_p$

et la résistivité s'écrit :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot N_A \cdot \mu_p}$$

V.3. Pour le semiconducteur intrinsèque: on applique $n = p = n_i$

La densité de courant est donnée par la relation :

$$J = (q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p) \cdot \xi = q \cdot n_i (\mu_n + \mu_p) \cdot \xi$$

La conductivité du semiconducteur intrinsèque est : $\sigma_i = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$

$$\text{et la résistivité intrinsèque est exprimée par : } \rho_i = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot n_i (\mu_n + \mu_p)}$$

Références bibliographiques:

- H. Mathieu « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques » (5^{ème} Edition Dunod, 2001).
- Christian et Hélène Ngô « Introduction à la physique des semiconducteurs » (Edition Dunod, 1998).
- J.L.Teyssier & H.Brunet « Introduction à la physique des matériaux conducteurs et semi-conducteurs » (Edition Dunod Université, 1992).
- F. Mansour « Cours de la matière Physique des composants à semiconducteurs1 » Master 1 Microélectronique , Département d'électronique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des frères Mentouri de Constantine .