Chapitre 3. METHODES DE MESURE DE LA DUREE DE VIE DES PORTEURS EXCEDENTAIRES.

Introduction :

La durée de vie des porteurs τ est un paramètre important pour le fonctionnement des composants à semiconducteurs. Les longueurs de diffusion des porteurs en dépendent, ainsi que le calcul des courants dans les jonctions. Il est donc nécessaire de savoir la mesurer. L'aspect théorique de la notion de durée de vie, la génération et la recombinaison des porteurs, ainsi que les équations qui gouvernent ces phénomènes, ont été détaillés dans le cours « Physique des composants à Semiconducteurs 1 ».

La durée de vie des porteurs est un temps très court (compris entre 10^{-9}s et 10^{-3}s dans le Silicium), c'est donc un paramètre difficile à mesurer. En général, les méthodes de mesures utilisées sont des méthodes indirectes. Il s'agit de créer des porteurs excédentaires au moyen d'une perturbation extérieure (un éclairement de longueur d'onde convenablement choisie), ce qui accroît la concentration des porteurs dans la région du semiconducteur soumise à cette lumière. Lorsque l'éclairement est transitoire (comme un flash lumineux), on observe après la croissance de la valeur des excédentaires, un retour à l'équilibre avec une diminution de la concentration de porteurs. Lorsque l'excitation lumineuse est permanente, il y a diffusion des porteurs dans le semiconducteur avec une certaine longueur de diffusion qui peut être calculée. Dans ce qui suit, il sera présenté d'abord des rappels sur la théorie liée aux phénomènes de génération-recombinaison des porteurs, puis trois méthodes de mesure de la durée de vie des porteurs excédentaires.

I. **Rappels sur la génération et la recombinaison des paires électrons-trous:**

I-1- Semiconducteur sous éclairement : phénomène de génération de porteurs

- Lorsqu'on éclaire un semiconducteur avec une lumière de longueur d'onde λ convenablement choisie, on fournit au cristal une énergie $E = hc/\lambda$. Cette énergie est absorbée par le semiconducteur et va causer la rupture de liaisons chimiques de valence. Donc des électrons vont se libérer et passer de la bande de valence vers la bande de conduction, en créant un nombre **égal** de trous dans la bande de valence. Si un nombre ''**Δn**'' d'électrons est créé, alors un nombre de trous ''**Δp**'' est créé et on a **$\Delta n = \Delta p$** (1).
- On dit qu'il y a **génération** (ou ''création'') de **paires électrons-trous** et ces porteurs créés sont appelés **porteurs excédentaires.** Durant le temps de cette **excitation lumineuse** et durant la création de porteurs, le semiconducteur se trouve **hors équilibre**.
- Si un nombre ''**Δn**'' d'électrons est créé, alors un nombre de trous ''**Δp**'' est créé et on a l'égalité **$\Delta n = \Delta p$** (1). On dit qu'il y a **génération** (ou ''création'') de **paires électrons-trous** et ces porteurs créés sont appelés **porteurs excédentaires.** Durant le temps de cette **excitation lumineuse** et durant la création de porteurs, le semiconducteur se trouve **hors équilibre**.

- Avant le début de l'éclairement ou flash de lumière, le semiconducteur est à **l'état d'équilibre** : la concentration d'électrons est $\mathbf{n_0}$ et celle des trous est $\mathbf{p_0}$. En situation d'équilibre, on peut appliquer la loi d'action de masse $\mathbf{n_0 . p_0 = n_i^2}$ (2).
- Hors équilibre, sous éclairement : les concentrations d'électrons et de trous vont augmenter par rapport à l'équilibre puisqu'il y a création de porteurs, on note leurs nouvelles valeurs ''**n**'' et ''**p** '' telles que : $\mathbf{n = n_0 + \Delta n}$ (3) et $\mathbf{p = p_0 + \Delta p}$ (4).

I-2- Taux de génération G, taux de recombinaison R, les équations de génération des porteurs et du retour à l'équilibre, et la définition de la durée de vie des porteurs :

Si l'excitation lumineuse est maintenue durant un temps suffisamment long, la création des électrons et des trous ne va pas se faire indéfiniment. Plus il y a de porteurs créés, et plus ils ont de chance de se rencontrer et de se **recombiner** entre eux : les paires électrons-trous qui ont été créées vont commencer à disparaître, et ceci est appelé **phénomène de recombinaison**.

Le taux de génération G et le taux de recombinaison R ont pour unité $cm^{-3}. s^{-1}$. On a vu que la concentration d'électrons créés est Δn (en cm^{-3}). En supposant que le taux de recombinaison R est proportionnel à Δn, on peut écrire $R = \alpha . \Delta n = \alpha . (n - n_0)$.

Si pendant un temps très court ''dt'', l'augmentation des porteurs est ''dn'', alors on peut écrire :

$$\frac{dn}{dt} = G - R \qquad (5)$$

Cette équation signifie que : « La variation des porteurs ''dn'' durant le temps ''dt'' est égale au nombre de porteurs créés/cm^3 - nombre de porteurs recombinés/cm^3 ».

Equation de génération des porteurs.

$$\frac{dn}{dt} = G - \alpha . \Delta n \qquad (6)$$ Dans cette équation on pose $\alpha = \frac{1}{\tau}$

Si on considère que $\Delta n = n - n_0$, l'équation (6) s'écrit :

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - \alpha . \Delta n \qquad (7) \quad \text{ou} \quad \frac{d(\Delta n)}{dt} + \alpha . \Delta n = G \quad (8)$$

On a : $\frac{d(\Delta n)}{dt} + \frac{\Delta n}{\tau} = G$ (9) c'est une équation différentielle du 1er ordre avec second membre. Dans cette équation, la variable est Δn, le second membre de l'équation est le taux de génération G.

La solution de l'équation (9) est :

$\mathbf{\Delta n(t) = A . e^{-t/\tau} + \tau . G}$ (10) (''t'' représente le temps ; A , τ, et G sont des constantes).

Pour déterminer la constante A, on pose la condition initiale : **pour t= 0** (avant le flash de lumière), le semiconducteur est à l'équilibre donc $n = n_0$ $\Rightarrow$ $\mathbf{\Delta n = n - n_0 = 0}$ et on a: $A = -\tau . G$

En remplaçant l'expression de ''A'' dans l'équation (10) , on obtient :

$\Delta n(t) = \tau.G\ .\ (1 - e^{-t/\tau})$ (11) : **cette équation est l'équation de génération des porteurs.**

On remarque que Δn augmente avec le temps ''t''. Si t est très grand $\Delta n \rightarrow$ **$\tau.G$** = Δn_{max} : nombre maximal de porteurs excédentaires créés.

<u>Equation du retour à l'équilibre (recombinaison des porteurs):</u>

Le retour à l'équilibre du semiconducteur commence dès qu'on coupe le flash de lumière : il y a recombinaison des porteurs excédentaires Δn et Δp jusqu'à leur disparition totale au bout d'un certain temps. Sans lumière, on pose G=0 (pas de génération) et la condition initiale pour cette 2ème étape est $\Delta n = \Delta n_{max} = \tau.G$

L'équation à résoudre est toujours l'équation (9) mais avec G=0 (sans lumière il n'y a pas de génération). Rappelons cette équation pour G=0 :

$$\frac{\mathbf{d(\Delta n)}}{\mathbf{dt}} + \frac{\mathbf{\Delta n}}{\boldsymbol{\tau}} = 0$$

Pour cette 2ème étape, juste au moment de la coupure du flash, la condition initiale pour ''t= 0'' est $\Delta n = \Delta n_{max} = \tau.G$ qui est la valeur finale de la 1ère étape

La solution de l'équation est **$\Delta n = A.\,e^{-t/\tau}$** ; la constante ''A'' est déterminée par la condition initiale : pour ''t= 0'' $\Delta n = \Delta n_{max} = \tau.G$

On obtient $A = \tau.G$

Finalement, **Δn =** $\tau.G\ .\,e^{-t/\tau}$ (12) **: cette équation est l'équation du retour à l'équilibre.**

On remarque que si $t \rightarrow \infty$ $\Delta n \rightarrow 0$: au bout d'un temps ''t'' sufisamment long, on va avoir Δn= 0 ce qui signifie que la valeur des porteurs revient à sa valeur d'équilibre initiale **n_0.**

<u>Définition de la durée de vie des porteurs excédentaires :</u>

Les deux équations, génération des porteurs et retour à l'équilibre (relations (11) et (12) respectivement), sont des fonctions en exponentielle du rapport '' $-t/\tau$ **''.**

Le temps τ est la durée de vie des porteurs : il est défini comme étant le temps pour lequel la concentration maximum des porteurs excédentaires est divisée par le facteur exponentiel ''e''. La durée de vie τ est de l'ordre de quelques microsecondes ou de quelques nanosecondes.

II. Méthodes de mesure de la durée de vie des porteurs :

II.1. Méthode de la diminution de la photoconductivité :

Principe de la méthode : Cette méthode est utilisée sur un barreau de semiconducteur dopé (un morceau de substrat). Un flash lumineux d'énergie E= hc/λ éclaire l'échantillon, et si cette énergie est supérieure au gap du semiconducteur ($E = hc/\lambda > Eg$), il y a alors création ou génération de porteurs excédentaires Δn et Δp. Les porteurs créés sont en nombre égal et on a $\Delta n = \Delta p$.

La conductivité initiale est $\sigma = qn.\mu_n+qp.\mu_p$ (dans le cas général, on doit tenir compte des deux types de porteurs) et la variation de σ due aux porteurs créés est $\Delta\sigma= q\Delta n.\mu_n+q\Delta p.\mu_p$ (avec $\Delta n= \Delta p$). La concentration de minoritaires décroît après la coupure du flash suivant l'équation $\Delta n= \Delta n_0.e^{-t/\tau}$ (voir partie théorique du cours « Physique des composants à Semiconducteurs 1 »), et cela entraîne donc une diminution de la conductivité du semiconducteur. Si on arrive à visualiser (ou observer) sur l'écran d'un oscilloscope, cette diminution de σ liée à la décroissance de la densité de porteurs, on peut alors mesurer la durée de vie τ. En réalité, c'est une variation de résistance qui peut être observée sur l'oscilloscope, et si l'échantillon est parcouru par un courant I constant, la diminution de concentration de porteurs excédentaires va se traduire par une augmentation de la résistance de l'échantillon observée sur l'écran. Rappelons en effet que la conductivité est inversement proportionnelle à la résistance, puisque $\sigma =1/\rho=L/SR$ (L : longueur de l'échantillon, S : surface et R : résistance). La figure 1 suivante montre que l'échantillon est éclairé par le faisceau lumineux sur une région localisée, le reste de la surface de l'échantillon est protégé par des écrans. Deux contacts sont pris sur la surface du semiconducteur pour brancher la source de courant, et deux autres contacts vont vers l'oscilloscope. L'écran de l'oscilloscope indique une variation de la résistance due aux variations de la concentration des porteurs minoritaires dans le semiconducteur.

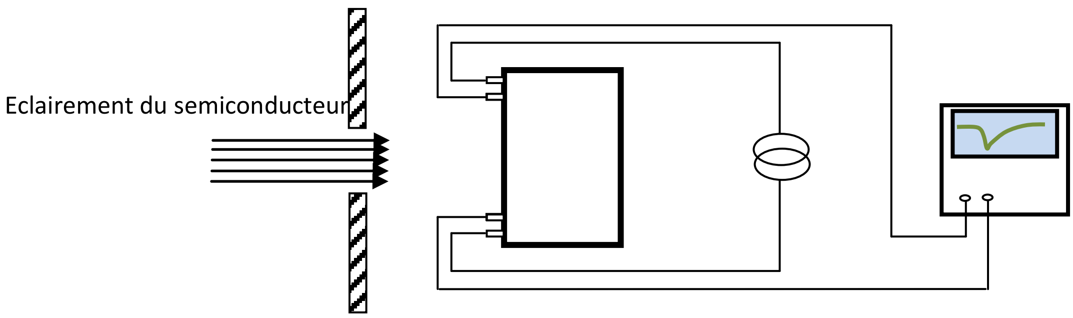

Figure 1 : Méthode de la décroissance de la photoconductivité (D'après A.Vapaille « Méthodes de caractérisation »).

Exercice d'application pour cette méthode :

Résumé de la méthode : La mesure de la durée de vie τ se fait généralement en créant des porteurs en excès dans le semiconducteur à l'aide d'une excitation extérieure (lumière laser), puis en coupant la lumière, on peut suivre leur diminution (retour à l'équilibre) à l'aide d'un oscilloscope. L'oscilloscope peut mesurer la variation de la tension aux bornes de l'échantillon lorsque celui-ci est parcouru par un courant constant et cette variation de tension est liée à une petite variation ΔR de la résistance du semiconducteur. C'est la mesure de ΔR qui va permettre de calculer la valeur de la durée de vie des porteurs en excès.

Enoncé de l'exercice : Un barreau semi-conducteur est dopé avec $N_D = 5.10^{15}$ cm^{-3} atomes donneurs. Avec une lumière de longueur d'onde appropriée, on crée des porteurs en densités $\Delta p= \Delta n=10^4$ cm^{-3}. $\Delta p=p-p_o$ et $\Delta n= n-n_o$ (n_o et p_o sont les concentrations des porteurs à l'équilibre).

1- Calculer les concentrations des porteurs n_o et p_o à l'équilibre et les comparer à n et p hors équilibre. Pouvez-vous conclure que ce semi-conducteur est en régime de faible injection de porteurs? Donnée : $n_i = 1{,}5.10^{10}$ cm^{-3}.
2- Calculer la valeur numérique de la résistance R de ce barreau (à l'équilibre). La longueur L= 1.2 cm, la section S= 0.1 cm^2, la mobilité des électrons $\mu_n = 1400$ cm^2/V.s.

3- Calculer la dérivée $dR/d\sigma$ en fonction, de L, S, et σ (la conductivité). En déduire l'expression de la variation ΔR en fonction de $\Delta\sigma$.
4- Hors équilibre (sous éclairement), on a : $\Delta\sigma = q\mu_p \Delta p$. Ecrire ΔR (obtenu à la question 4) en fonction de Δp.
5- On coupe la lumière: donner l'expression du retour à l'équilibre Δp en fonction du temps t, du taux de génération G et de la durée de vie τ_p . En déduire l'expression de ΔR (en fonction de L, S, τ, G, q, μ_p, μ_n, et N_D), et écrire l'expression de ΔR pour $t= \tau_p$. En déduire l'expression de τ_p.
6- Après la coupure du flash, on a pu mesurer sur l'oscilloscope une très faible variation (une augmentation) de la résistance ΔR=1.126 mΩ. Calculer la valeur numérique de la durée de vie τ_p. On donne : $G= 5.10^{18}$ cm^{-3}/s, μ_p = 400 $cm^2/V.s$. Le nombre e = 2.718

II.2. Méthode des photocourants dans une jonction PN:

Pour appliquer cette méthode, il faut utiliser une jonction PN et non pas un morceau de semi-conducteur comme pour la méthode précédente. Le principe est d'éclairer perpendiculairement le plan de la jonction avec un flash de lumière. Puis, on court-circuite la jonction, et si on arrive à mesurer le courant de court-circuit on peut alors calculer la durée de vie des porteurs τ.

Une jonction PN est constituée d'une région quasi neutre P, d'une zone de charge d'espace et d'une région quasi-neutre N. Sous éclairement, les électrons minoritaires créés dans la région quasi-neutre P diffusent vers la zone de charge d'espace et ils ont ensuite injectés dans la région N sous l'effet du champ électrique interne dans la zone de charge d'espace. Le même phénomène est valable pour les trous minoritaires dans la région N qui vont être propulsés dans la région P. Ces porteurs créés dans les deux régions quasi-neutres N et P font apparaître un photocourant appelé « photocourant retardé » car il est créé par une diffusion lente. Ce photocourant dépend des coefficients de diffusion D_n et D_p des électrons minoritaires côté P et des trous minoritaires côté N, respectivement, ainsi que des durées de vie de ces porteurs τ_n et τ_p. Pour éviter de considérer les paramètres des deux types de porteurs (ceux des électrons et des trous), on choisit d'utiliser une jonction P^+N, pour laquelle la zone de charge d'espace ne s'étend que dans la région quasi-neutre N (la région la moins dopée). Le photocourant de court-circuit $I_{cc}(t)$ dans cette région va s'écrire :

$\mathrm{I}cc(t) = \frac{\sqrt{\mathrm{Dpn}\,.\,e^{-t/\mathrm{\tau pn}}}}{\sqrt{\pi \mathrm{t}}}$ où D_{pn} est le coefficient de diffusion des trous minoritaires dans la région N.

τ_{pn} est la durée de vie des trous minoritaires dans la région N, et t le temps.

II.3. Mesure de la durée de vie par la mesure du temps de recouvrement d'une jonction PN :

Quand une jonction passe de l'état passant à l'état bloqué, il n'y a pas de passage brutal et instantané du courant direct I_D (environ quelques milliampères) à la valeur du courant inverse de l'ordre de quelques micro-ampères. On remarque qu'il y a, durant un certain intervalle de temps, une valeur du courant inverse assez élevée, ce courant est noté I_R . Puis le courant prend sa valeur normale I_{inv} au bout du temps t_r : ce temps est appelé temps de recouvrement de la jonction. Cette charge est appelée Q_s . Le temps t_r est indiqué sur la figure 2 ci-dessous. On voit sur cette figure que le courant inverse est négatif, il est égal à I_R au moment de la commutation de la jonction de l'état passant à l'état bloqué (à t=0) ; ensuite, il atteint la valeur 0.1 I_R pour le temps t_{RR}.

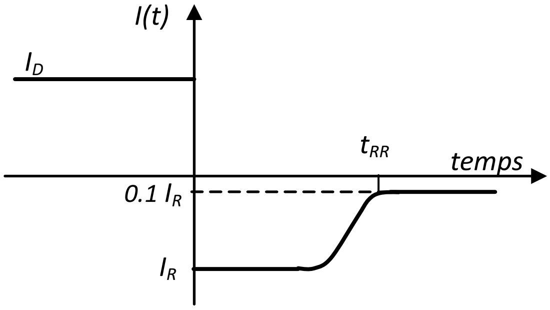

Figure 2 : Variation du courant inverse et temps de recouvrement t_{RR}. (D'après A. Vapaille « Méthodes de caractérisation »).

La charge stockée dans la région N est constituée de trous minoritaires, on la note Q_{Sp}.

Une charge Q de façon générale est égale au produit (Courant .Temps). Q_{Sp} est une charge stockée due aux trous minoritaires dans la région N, elle est donc exprimée par le produit :

$Q_{Sp} = I_D . \tau_p$

Où τ_p est la durée de vie des trous minoritaires dans la région N et I_D est le courant direct dans la jonction.

De plus, on peut montrer que le temps de recouvrement de la jonction est donné par

$t_r = \frac{QSp}{Ir} = \tau_p . \frac{ID}{Ir}$

On remarque dans la formule ci-dessus que dans le cas de l'égalité $I_D = I_R$, on a : $t_r = \tau_p$. Ceci qui montre que la durée de vie τ_p peut être mesurée par cette méthode et qu'elle est égale au temps de recouvrement de la jonction.

Références bibliographiques:

- H. Mathieu « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques » (5ème Edition Dunod, 2001).

- Christian et Hélène Ngô « Introduction à la physique des semiconducteurs» (Edition Dunod, 1998).

- A. Vapaille « Méthodes de caractérisation » et A.Vapaille, R.Castagné « Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs » (Edition Dunod, 1987).

- 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 Constantine .