TD n°1 : Dopage des semiconducteurs

Exercice 1 : Silicium intrinsèque :

On s'intéresse au Silicium dans cet exercice. On considère le semiconducteur intrinsèque qui a une densité $n_i = 10^{10}\,cm^{-3}$ à T=300K.

a) Donner l'expression de sa conductivité en fonction de n_i et des mobilités μ_n et μ_p des électrons et des trous respectivement.
b) Comparer sa résistivité ρ_{Si} à celle du Cuivre : $\rho_{Cu} = 1{,}7\,\mu\Omega.cm$ en calculant ρ_{Si} / ρ_{Cu}.
c) Calculer la résistance d'un barreau de silicium intrinsèque de section 1mm^2 et de longueur 1 cm.
d) Déterminer la position du niveau de Fermi de ce semiconducteur et le placer sur un diagramme de bandes d'énergie. On donne : $N_c = N_v = 10^{19}\,cm^{-3}$.

Exercice 2 : Dopage du Silicium :

On appelle n et p les densités d'électrons et de trous libres dans un semiconducteur dopé.

a) Donner la relation entre n, p et n_i à l'équilibre à la température T.
b) Ecrire la relation entre n, p, N_D et N_A traduisant la neutralité électrique de l'échantillon (concentration en atomes donneurs et accepteurs respectivement).
c) En déduire les expressions de n et p pour un semiconducteur dopé N. Justifiez les approximations.
d) En déduire les expressions de n et p pour un semiconducteur dopé P. Justifiez les approximations.

Exercice 3 : Semiconducteur dopé p :

On dope le Silicium avec du Bore (colonne III) jusqu'à obtenir une résistivité $\rho_B = 1{,}4\,\Omega.cm$. Les nouvelles mobilités sont $\mu_n = 950\,cm^2/V.s$ et $\mu_p = 450\,cm^2/V.s$.

a) Calculer la concentration de Bore introduite et les concentrations n et p d'électrons et de trous libres.
b) Déterminer la position du niveau de Fermi par rapport au haut de la bande de valence et le placer sur un diagramme de bandes d'énergie. On donne : $N_v = 10^{19}\,cm^{-3}$.
c) On surdope ce semiconducteur avec du phosphore (colonne V) jusqu'à obtenir un matériau de type n avec une résistivité $\rho_P = 0{,}12\,\Omega.cm$. Les nouvelles mobilités sont $\mu_n = 600\,cm^2/V.s$ et $\mu_p = 300\,cm^2/V.s$. Quelle est la concentration de Phosphore qu'il a fallu ajouter pour obtenir cette résistivité ?

Exercice 4 : Semiconducteur à dopage inhomogène

On considère un semiconducteur de type N, dont la densité d'atomes donneurs est : $N_D(x) = N_0.\exp(-x/x_0)$. On supposera que tous les atomes donneurs sont ionisés.

a) Représenter le diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique.
b) Déterminer le champ électrostatique E(x) dans le semiconducteur.

TD n°2 : Transport dans un semiconducteur

Exercice 1 : Courant de conduction dans un semiconducteur :

On considère un échantillon de Silicium (intrinsèque) soumis à une différence de potentiel V>0 créant ainsi un champ électrique $\vec{E}$.

a) Montrer, en régime stationnaire, que la norme du champ électrique est constante et tracer l'orientation de ce champ électrique sur un dessin.
b) Tracer le diagramme de bandes dans l'échantillon.

Exercice 2 : Courant de diffusion dans un semiconducteur :

On considère un échantillon de Silicium intrinsèque d'épaisseur d. En surface du semiconducteur, sur une épaisseur δ, on introduit à l'instant t=0, un excès de densité d'électrons $\Delta n \gg n_i$. Pour t>0, aucun nouveau porteur n'est introduit.

a) Pour quelle raison, les porteurs injectés ne se recombinent-ils pas de manière significative ?

b) Que se passe-t-il pour t>0 dans l'échantillon ? Quel est le phénomène physique mis en jeu ? Pouvez-vous citer un autre exemple où un tel phénomène se produit également ?

c) Déterminer la densité n(x) dans l'échantillon pour $t \to \infty$.

Exercice 3 : Courant de diffusion dans un semiconducteur dopé N :

1. On considère un barreau de Silicium de type N ($N_D = 10^{17} cm^{-3}$) dans lequel on crée une perturbation homogène de porteurs : $\Delta n \gg n_i$.

a) Ecrire l'équation de continuité dans le barreau. Ecrire l'expression du courant en fonction de la densité de porteurs n(x) et du champ électrique E(x) dans le barreau.
b) En déduire l'équation d'évolution de la concentration en électrons.
c) A t > 0, la perturbation cesse . Déterminer la loi de retour à l'équilibre de la concentration en électrons pour t>0 (on supposera que le barreau est connecté par un fil à un réservoir de charges, appelé masse, lui permettant d'échanger les charges).

2. On considère une excitation permanente en surface (x=0) du barreau par un rayonnement peu pénétrant créant une concentration de trous uniquement en surface : $\Delta p(x=0,t) = \Delta p_0$.

a) Déterminer le profil de concentration en trous en fonction de la position. On négligera le champ électrique induit par la diffusion des porteurs. On se placera dans le cas plu simple d'un échantillon long devant les longueurs caractéristiques. Que devient cette expression dans le cas général ?
b) En déduire la densité de courant associée, dans le cas d'un échantillon long.

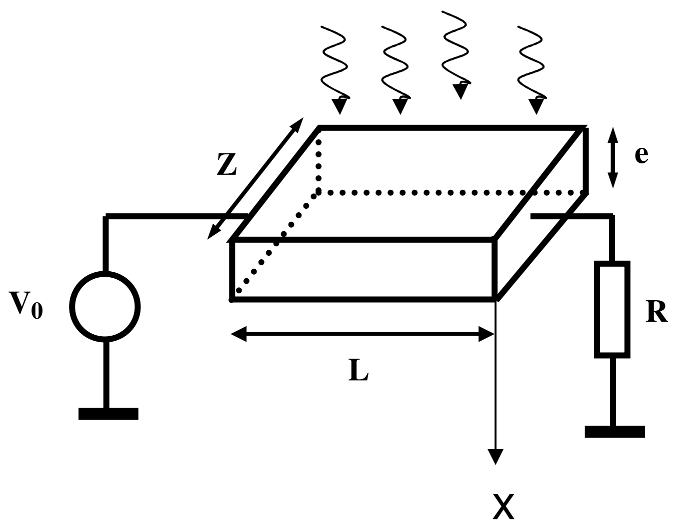
On donne $\tau_p = 1 \mu s$ et $\mu_p = 250 cm^2 / V.s$.

TD n°3 : Photoconducteur

On excite un semiconducteur non dopé par un rayonnement lumineux monochromatique. On suppose que le régime permanent est établi. Le taux de génération de paires électron-trou par unité de temps, g, est supposé identique pour les deux types de porteurs. On supposera que g décroit avec la distance x de pénétration dans le semiconducteur selon la loi suivante :

$$g = \alpha \frac{I_0}{h\upsilon} e^{-\alpha x}$$

où α=10^4 cm^{-1} est le coefficient d'absorption et I_0 , l'éclairement incident (en W/cm²), supposé uniforme. On applique une tension V_0, créant un champ uniquement dans le plan horizontal, permettant de mesurer, via la résistance R (supposée négligeable devant la résistance de l'échantillon), le courant et donc la résistance de l'échantillon.
Sous éclairement, la conductivité augmente, entrainant une diminution de résistance et donc une augmentation de courant permettant ainsi de détecter le flux de photons.



1) Calculer : la conductivité σ_0, puis la conductance G_0 (inverse de la résistance) lorsque l'échantillon n'est pas éclairé. En déduire le courant I_0 circulant dans le circuit.

2) Ecrire la variation de conductivité $\Delta\sigma$ (x) sous éclairement en fonction de $\Delta n(x)$

3) On suppose que le champ électrique n'a pas d'influence selon x. Ecrire l'équation différentielle satisfaite par les électrons.

4) Montrer que la variation du nombre d'électrons en fonction de la profondeur de pénétration dans le semiconducteur peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta n(x) = Ae^{-x/L} + Be^{x/L} + Ce^{-\alpha x}$$

Expliciter la valeur de C et de L. Rappeler la signification physique de la longueur L. Faire l'application numérique et simplifier alors l'expression du coefficient C.
Données : durée de vie $\tau_n = 1\ \mu s$, constante de diffusion $D_n = 25\ 10^{-4}\ m^2 s^{-1}$.

5) Déterminer les constantes A et B en supposant que le courant de diffusion est nul aux deux interfaces, dans le cas où l'échantillon est épais ($e >> L$ et $e >> 1/\alpha$).

6) En déduire la variation de conductivité $\Delta\sigma(x)$

7) Déterminer la variation ΔG de la conductance globale de la cellule photoconductrice , puis la variation de courant ΔI associée.

8) En déduire alors la variation relative $\Delta G/G_0$, puis le rendement η de la cellule (en A/W).
En déduire les conditions optimales.

TD n°4 : Cellule photovoltaïque

I. Jonction N^+P à l'équilibre thermodynamique

On considère une jonction Silicium N^+P dont les caractéristiques sont les suivantes
Zone N^+ :
$N_d=10^{19}\ cm^{-3}$: dopage
$x_n=0.5\ \mu m$: longueur de la zone de type N
Zone P:
$N_a=10^{15}\ cm^{-3}$: dopage
$x_p=5\ \mu m$: longueur de la zone de type P

On prendra comme origine des abscisses la jonction, et on notera W la largeur de la ZCE.
Pour les applications numériques, on prendra un échantillon de 1à cm de côté (dans tout l'exercice).

1. Donner la répartition des porteurs à l'équilibre.
2. Calculer la barrière de potentiel V_d
3. En appliquant l'équation de l'électro-neutralité dans la ZCE, décrire la ZCE.
4. Déterminer les variations du champ électrique dans la structure à l'équilibre.
5. En déduire la largeur W de la zone de charge d'espace. Faire l'application numérique.
6. En déduire le diagramme des bandes d'énergie.

II. Etude sous éclairement

On éclaire la jonction sous incidence normale, côté N^+, par le rayonnement solaire terrestre (*1 kW/m²*).
L'absorption de photons dans les 3 zones donne naissance à 3 courants :

- dans la ZQN N, qui est étroite, l'absorption de photons génère des paires électrons-trous : les trous, qui sont les porteurs minoritaires diffusent. Mais cette zone de diffusion est étroite afin que le rayonnement pénètre dans la ZCE.
- dans la ZQN P, qui est large, on retrouve le même phénomène concernant les électrons. Mais le flux de photons y est plus faible (les photons ont été absorbés dans la ZQN N et dans la ZCE)
- dans la ZCE, où il n'y a initialement aucun porteur, les électrons et trous photocrées donnent naissance à un courant de conduction.

On suppose que le photocourant généré est uniquement dû à la génération de porteurs dans la ZCE : on négligera les photocourants de diffusion dus à l'absorption des photons dans les deux zones quasi-neutres.
La génération de paire électrons-trous est caractérisée par un taux de génération $g(x)=\alpha\varphi_0 e^{-\alpha x}$, où φ_0 est le flux de photons incidents (en $cm^{-2}s^{-1}$) et α est le coefficient d'absorption du Silicium. Pour les applications numériques, on prendra :
$\varphi_0=2.\ 10^{17}\ photons.cm^{-2}s^{-1}$
$\alpha=10^4\ cm^{-1}$

1. En considérant le champ de la ZCE, que peut-on dire sur les porteurs générés dans cette zone ? En déduire la densité d'électrons et de trous, puis la valeur du courant d'électrons (ersp. de trous) en $+x_p$ (resp. en $-x_n$).
2. Ecrire l'équation de continuité relative aux trous dans la ZCE.
3. En négligeant les recombinaisons, en déduire par intégration de l'équation de continuité le photocourant de trous en $x=x_p$
4. Ecrire alors l'expression globale du courant en fonction de la tension, sous éclairement. Représenter ces variations en supposant le photocourant peu dépendant de la tension appliquée.
5. Déterminer la valeur du photocourant.
6. En réalité, le photocourant est plus faible : quelles peuvent en être les raisons essentielles ?

III. Calcul du rendement

On suppose que la jonction précédente a un courant de saturation $I_s=1\ nA$.
On supposera la ZCE indépendante de V.

1. Déterminer l'expression de la puissance fournie par la cellule
2. Déterminer les valeurs du courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert
3. En assimilant la courbe à un rectangle dans la zone P<0, donner l'expression et la valeur numérique de la puissance que peut fournir une telle cellule solaire.

Les panneaux solaires vendus dans le commerce fournissent une puissance crête de 130 W/m².

4. Comparer cette valeur à celle trouvée dans cet exercice.
5. Quelle surface de panneaux solaire faudrait-il pour un radiateur électrique de 1 kW (en puissance crête) ?

Données physique :
$\varepsilon_{Si}=11.9$
$\varepsilon_0=8.85\ 10^{-12}\ F.m^{-1}$
$n_i=10^{10}\ cm^{-3}$

TD n°5 : Jonction PN

I. Jonction PN linéaire à l'équilibre

On considère une jonction pn dont le profil de dopage est indiqué à la figure 1. On suppose que la largeur W de la zone de charge d'espace est supérieure à 2d et que la zone de charge d'espace est vide de porteurs.

$N = 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$

$n_i = 1.45\,10^{10}\ \mathrm{cm}^{-3}$

$\varepsilon_{SC} = 11.9\,\varepsilon_0\ \left(\varepsilon_0 = 8.85\,10^{-12}\right)$

$d = 50\ \mathrm{nm}$

$T = 300\ °\mathrm{K}$

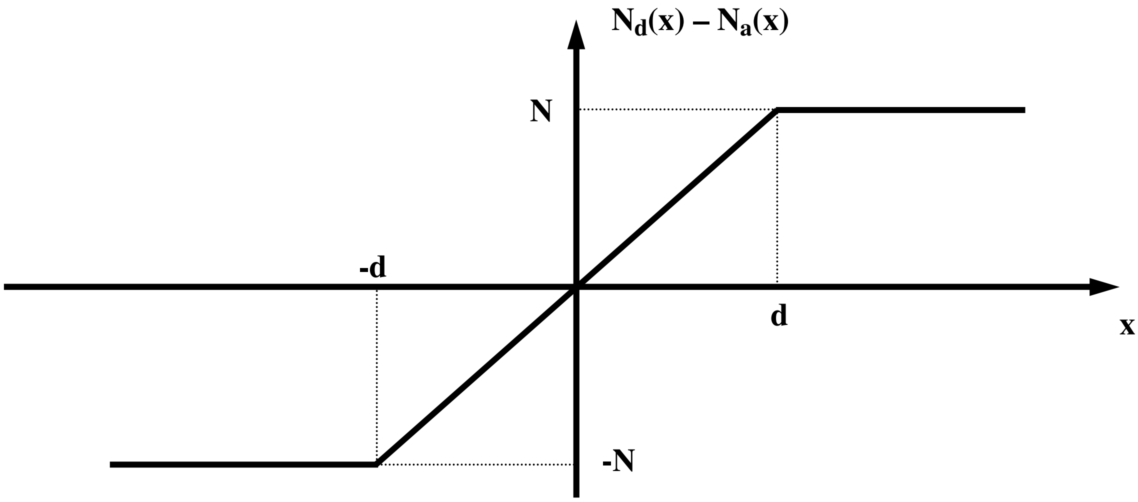


Figure 1

1. Déterminer la barrière de potentiel ψ_0
2. Exprimer la densité de charge $\rho(x)$ dans les différentes zones du dispositif
3. Déterminer le champ électrostatique $E(x)$
4. Comment pourrait-on déterminer la largeur W de la zone de charge d'espace ?

II. Jonction PN abrupte hors équilibre

On considère une jonction P^+N abrupte à température ambiante

<u>Zone P^+ :</u>

$N_a=10^{18}\ cm^{-3}$: dopage

<u>Zone N:</u>

$N_d=10^{15}\ cm^{-3}$: dopage

$x_n=200\ \mu m$: longueur de la zone de type N

Données : durée de vie $\tau_p = 1\ \mu s$, mobilité des trous : $\mu_p = 450\ cm^2V^{-1}s^{-1}$.

$n_i=10^{10}\ cm^{-3}$

1. On se place dans l'hypothèse d'une jonction longue. Que signifie cette hypothèse ? Ecrire l'équation de continuité des trous dans la zone ZQN N.
2. En déduire l'équation différentielle satisfaite par l'excès de trous dans la zone N.
3. Rappeler les conditions aux limites
4. En déduire l'expression du courant en fonction de x, puis en limite de ZCE.
5. Que vaut le courant d'électrons dans la zone P ?
6. Déterminer la valeur de la densité de courant de saturation Js, puis du courant de saturation Is dans le cas d'une jonction de section 1 mm².
7. Rappeler l'expression du courant dans le cas d'une jonction P^+N courte. Faire le rapport de ces densités de courant. Conclusion ?

On se placera dans la suite dans le cas d'une jonction courte.

8. Déterminer la charge Q_D (par unité de surface) qui correspond aux trous en excès injectés dans la zone neutre n en fonction de la densité de courant qui traverse le dispositif.
9. Montrer que Q_D = TT. J, déterminer TT. La constante TT est appelée temps de transit.

Cette constante est le temps moyen mis par un trou pour franchir la zone ZQN N. Faire l'application numérique.

TD n°6 : Diode Schottky

1. Rappeler les 4 jonctions que l'on peut former si l'on dépose un métal sur un SC.
2. Quels sont les cas où on a une diode redresseuse et un contact ohmique ?

On considère pour la suite une jonction Schottky métal-SC de type N, de type redresseuse.

3. Que peut on dire sur le travail d'extraction ϕ_m du métal par rapport au travail d'extraction ϕ_S du semiconducteur ?
4. Rappeler la structure de bande de cette structure.
5. Représenter la densité de charge.
6. En déduire la largeur W de la ZCE.
7. Rappeler la définition de la capacité de transition C_T. Donner alors son expression.

On suppose, uniquement pour la question suivante, que l'on insère entre le métal et le SC un isolant parfait.

8. Que se passe-t-il pour le niveau du vide de l'isolant ? (on pensera à appliquer l'équation de Poisson ...)
9. Quel type de composant a-t-on réalisé ?
10. En déduire la chute de potentiel dans l'oxyde en fonction de la charge de la ZCE puis de la tension.
11. En déduire la chute de potentiel totale.

On reprend la structure Métal-SC des questions 3 à 7. On effectue une mesure de capacité C en fonction de la tension V. On obtient une variation linéaire de C^{-2} en fonction de V :
$C^{-2} = A - B\,V$, où $A = 10^6\ F^{-2}m^4$ et $B = 1.25\ 10^6\ F^{-2}V^{-1}\ m^4$.

12. En déduire le potentiel de diffusion V_d de la structure.
13. Calculer le dopage N_d du semiconducteur. En déduire la position du niveau de Fermi dans la zone quasi-neutre.
14. Calculer le travail d'extraction ϕ_S du semiconducteur.
15. Calculer le travail d'extraction ϕ_m du métal.

On souhaite réaliser de l'autre côté du semiconducteur un contact ohmique. On suppose que l'on conserve le même métal.

16. Déterminer le dopage (en cm^{-3}) que l'on doit choisir en surface, afin d'obtenir une largeur de ZCE côté contact inférieure à 15 nm à 0V.
17. Positionnez alors le niveau de Fermi dans cette zone à l'équilibre.
18. Représenter le diagramme des bandes associé à tout le dispositif.

<u>Données physique</u> :

$\varepsilon_{Si}=11.9$
$\varepsilon_0=8.85\ 10^{-12}\ F.m^{-1}$
$n_i=10^{10}\ cm^{-3}$

$Eg=1.12\ eV$
$q\chi = 4\ eV$
$N_c= 10^{19}\ cm^{-3}$