[1]JONCTION PN : RECHERCHE DE LA NATURE DU SEMI-CONDUCTEUR

On dispose d'une diode semi-conductrice dont on ignore tout, sauf qu'elle est de type PN^{++}. On supposera donc que $N_a << N_d$. Le schéma de principe d'une telle diode est rappelé en figure 1.

- Z.C.E est la zone de charge d'espace, vide de porteurs.
- V_j représente la différence de potentiel au niveau de la jonction idéale.
- V_d représente la différence de potentiel aux bornes de la jonction réelle sachant que l'on prend en compte la résistivité des zones P et N^{++}.

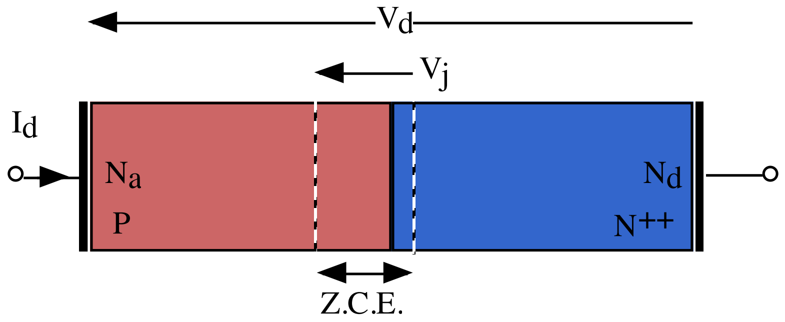


Figure 1

On rappelle les lois suivantes :

$$I_d = I_s\left[\exp(\frac{V_j}{U_T}) - 1\right] \text{(1) avec : } U_T = \frac{kT}{q} \text{ et } V_d = V_j + R_s I_d \qquad (2)$$

- I_d est le courant circulant dans la diode
- I_s le courant inverse de saturation
- R_s la résistance série correspondant aux zones dopées N^{++} et P de part et d'autre de la zone de charge d'espace.

On tiendra compte aussi de la variation du courant inverse de saturation I_s en fonction de la température :

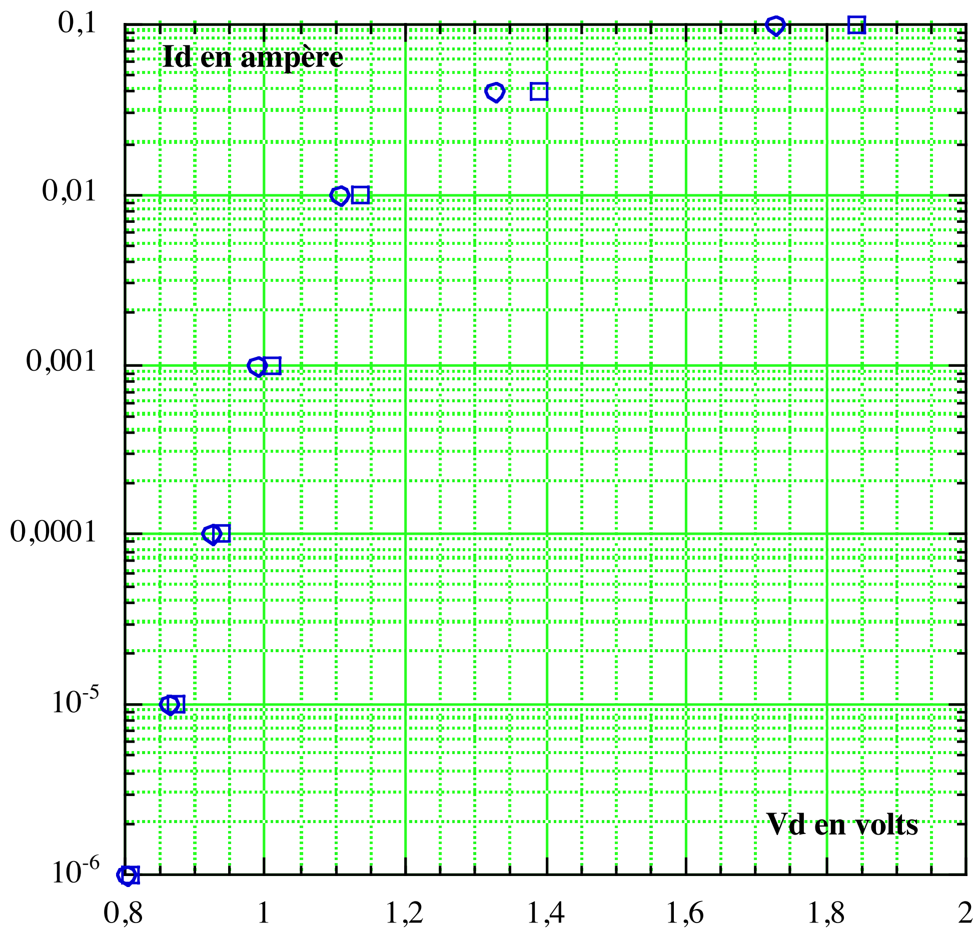
$$I_s = A\,T^3 \exp(-\frac{E_g}{k\,T}) \quad \textit{(3)} \quad \text{où } E_g \text{ représente la hauteur de bande interdite}$$

Pour déterminer les caractéristiques physiques de la diode, on a effectué la mesure de l'évolution du courant I_d en fonction de la tension V_d pour deux températures :

- $T_0 = 300$ °K où $kT_0 = 0.026$ eV
- $T_1 = 330$ °K où $kT_1 = 0.028$ eV

Id	1 µA	10 µA	100µA	1mA	10mA	40 mA	100mA
V_d (T_0) en V	0.800	0.860	0.920	0.986	1.103	1.326	1.725
V_d (T_1) en V	0.808	0.873	0.937	1.009	1.137	1.390	1.844

Les graphes du courant I_d dans la diode en fonction de la tension V_d pour les deux températures T_0 et T_1 sont donnés en figure 2.



1) A partir de quelle valeur du courant I_d, l'effet de la résistance série R_S est-elle prépondérante sur la tension V_j ?

2) En se plaçant à courant de diode très faible où l'effet de la résistance R_S est négligeable, calculer la valeur du courant inverse de saturation I_S pour les deux températures T_0 et T_1.

On se propose de déterminer le type de semi-conducteur dans lequel est réalisée la diode. Pour cela, on va déterminer une relation liant la variation relative du courant I_S avec la variation relative de la température.

3) Dans ces conditions, on suivra les étapes de calcul suivantes :

a) Calculer l'expression de la dérivée du courant I_S par rapport à la température soit : $\dfrac{dIs}{dT}$

b) En déduire ensuite la relation suivante :

$$\left[\frac{dI_s}{I_s}\right]_{T0} = \left(3+\frac{E_g}{k\,T_0}\right)\frac{dT}{T_0}$$

c) En remplaçant dI_S et dT par ΔI_s et ΔT, déterminer la valeur de la hauteur de bande interdite Eg et en déduire le type de semi-conducteur utilisé dans ce dispositif en utilisant les données suivantes pour la température T_0 = 300 °K.

T = 300 K	**Si**	Ge	GaAS
Eg (eV)	1.12	0.67	1.4
μ_n (V^{-1} cm^{-2} s^{-1})	1450	3800	6000
μ_p (V^{-1} cm^{-2} s^{-1})	450	1700	400

On se propose de déterminer les mobilités de ce semi-conducteur à la température T_1 .

4) Déterminer l'expression de la résistance série R_S en fonction de V_d, I_d, I_s et U_T. Calculer la résistance série de la diode pour I_d = 100 mA et ceci pour T_0 et T_1.

5) Sachant que la diode est de type PN^{++}, quelle est la zone P ou N^{++} qui est la plus résistive ?

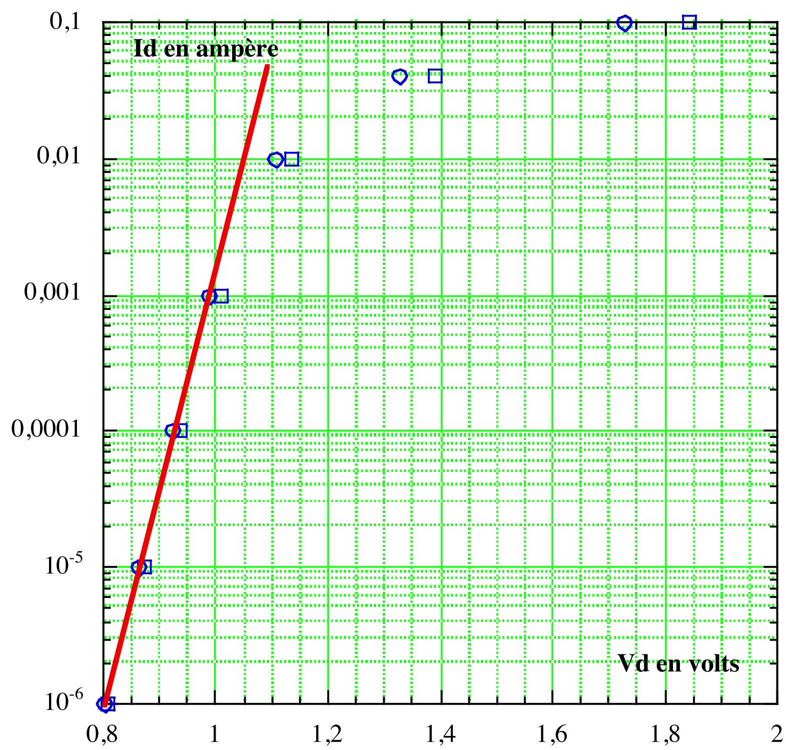
6) En négligeant la contribution de la zone dopée la moins résistive, on peut alors écrire la relation habituelle : $R_s = \dfrac{1}{qp\mu_p}\dfrac{L}{S}$. Exprimer alors : $\dfrac{dR_s}{R_s}$ en fonction de $\dfrac{d\mu_p}{\mu_p}$.

7) La mobilité des trous est fonction de la température selon la loi : $\mu_p(T) = \mu_{p_0}\left[\dfrac{T}{T_0}\right]^{-\alpha}$ où μ_{p0} représente la mobilité à la température T_0 = 300 K.
Dans ces conditions, exprimer la relation liant ($d\mu_p/\mu_p$) en fonction de (dT/T).

8) En déduire l'expression du coefficient α et faire l'application numérique.
Calculer alors la mobilité des trous à T_1 = 330 K, dans le matériau semi-conducteur utilisé.

CORRECTION

1) la tension aux bornes de la diode est telle que : $V_d = V_j + R_s I_d$. Si le terme $R_s I_d$ est négligeable alors : $V_d \approx V_j = U_T \ln I_d - U_T \ln I_s$. La fonction $I_d = f(V_d)$ en coordonnées semi-logarithmique doit être une droite.



Comme le montre la figure précédente, l'effet de R_s est sensible au-delà de I_d = 1 mA.

2) Calcul de la valeur du courant inverse de saturation I_S pour les deux températures T_0 et T_1.

La relation (1) permet d'écrire : $I_s = \dfrac{I_d}{\exp(\dfrac{Vj}{U_T}) - 1}$. On obtient alors le tableau suivant :

I_d	1µA	10 µA	100 µA
300 K	$4{,}34\ 10^{-20}$	$4{,}31\ 10^{-20}$	$4{,}29\ 10^{-20}$
330 K	$2{,}93\ 10^{-19}$	$2{,}88\ 10^{-19}$	$2{,}93\ 10^{-19}$

On prendra donc I_s (300K)= $4{,}3\ 10^{-20}$ A et I_s (330K)= $2{,}9\ 10^{-19}$ A.

3) Recherche de la nature du semi-conducteur.

a. $I_s = AT^3 \exp(-\dfrac{E_g}{kT})$. Calculons $\dfrac{dI_s}{dT}$: $\qquad \dfrac{dI_s}{dT} = \left[3AT^2 + \dfrac{ATE_g}{k}\right]\exp(-\dfrac{E_g}{kT})$

b. Variation relative du courant inverse I_s à la température T_0.

$$\frac{dI_s}{dT} = \left[3AT^2 + \frac{ATE_g}{k}\right]\exp(-\frac{E_g}{kT}) \qquad \text{avec : } \exp(-\frac{E_g}{kT}) = \frac{I_s}{AT^2}$$

Soit en développant : $$\boxed{\left[\frac{dI_s}{dT}\right]_{T_0} = \left[3 + \frac{E_g}{kT_0}\right]\frac{dT_0}{T_0}}$$

c. La relation précédente va permettre de calculer la hauteur de bande interdite E_g et par conséquence la nature du semi-conducteur.

$$\boxed{E_g = kT_0\left[\frac{\frac{\Delta I_s}{I_s}}{\frac{\Delta T}{T_0}} - 3\right]}$$

$I_s = 4{,}3\ 10^{-20}$, $\Delta is = 2{,}47\ 10^{-19}$, $T_0 = 300K$, $\Delta T = 30$ K. Eg = 1,42 eV.
Le semi-conducteur est GaAs.

4) Exprimons la tension aux bornes de la jonction : $V_d = V_j + R_s I_d$ où $V_j = U_T \ln\left[\frac{I_d}{I_s} + 1\right]$

$$\boxed{R_s = \frac{1}{I_d}\left[V_d - U_T \ln\left[\frac{I_d}{I_s} + 1\right]\right]}$$

Pour $I_d = 100$ mA : R_s (300 K) = 6,25 Ω R_s (330 K) = 7,13 Ω.

5) La zone la plus résistive est celle qui est la moins dopée : SiP.

6) Sachant que : $R_s = \frac{1}{q p \mu_p}\frac{L}{S}$, on peut écrire : $\ln(R_s) = \ln(\frac{L}{S}) - \ln(q p \mu_p)$

Soit : $$\boxed{\frac{dR_s}{R_s} = -\frac{d\mu_p}{\mu_p}}$$

7) Mobilité des trous en fonction de la température : $\mu_p(T) = \mu_{p_0}\left[\frac{T}{T_0}\right]^{-\alpha}$

$\ln(\mu_p(T)) = \ln(\mu_{p_0}) - \alpha \ln(\frac{T}{T_0})$ soit : $$\boxed{\frac{d\mu_p}{\mu_p} = -\alpha\frac{dT}{T}}$$

8) Les deux relations précédentes conduisent à : $$\boxed{\alpha = \frac{\Delta R_s}{R_s}\frac{T_0}{T} = 1{,}41}$$

La mobilité μ_p des trous à $T_1 = 330$ K est de 350 $cm^2V^{-1}s^{-1}$.