

PHYSIQUE DU SOLIDE ET NANOSCIENCES

Exercice 1. Structure cristalline et structure de bandes de GaAs (5 points)

L'arséniure de gallium (GaAs) est un semiconducteur utilisé en (opto-)électronique. Il cristallise dans la structure zinc-blende, illustrée sur la figure 1.

Les atomes de gallium sont répartis sur un réseau cubique à faces centrées de côté a . Les atomes d'arsenic sont également répartis sur un réseau cubique à faces centrées de côté a , mais ce réseau est décalé d'un quart de la diagonale par rapport au premier [translation d'un vecteur $(a/4, a/4, a/4)$].

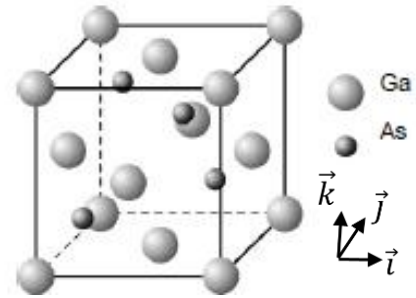


Figure 1. Structure cristalline de GaAs

1. Préciser le motif et les vecteurs de base du réseau.
2. Comparer à un cristal de silicium. Quelle est la différence ?

La structure électronique du gallium est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$; celle de l'arsenic est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$.

3. Combien le gallium et l'arsenic ont-ils d'électrons de valence chacun ? Justifier.
4. Pourquoi dit-on que GaAs est un semiconducteur III-V ?

La structure de bandes électroniques calculée pour GaAs est présentée figure 2. On appelle N le nombre d'atomes total. Le nombre d'électrons de valence par maille est 8.

5. Déterminer le nombre de bandes électroniques remplies et en déduire où se situe l'énergie de Fermi.
6. La bande interdite du semiconducteur est-elle directe ou indirecte ?
7. Quelle est l'amplitude de la bande interdite ?

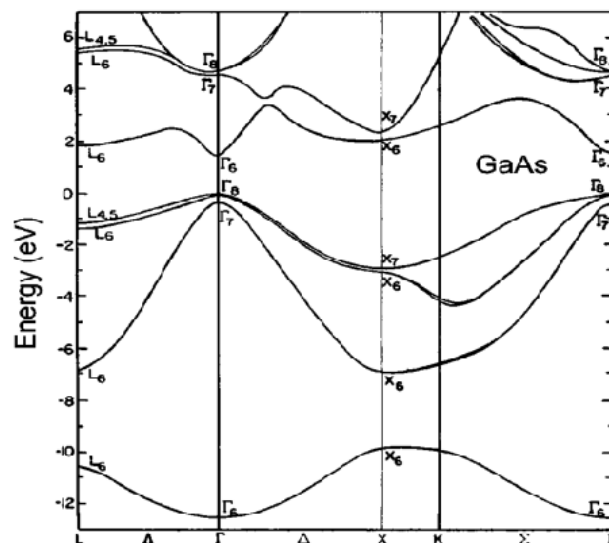


Figure 2. Structure de bandes électroniques de GaAs

Exercice 2. Effet Gunn (10 points)

Un formulaire se trouve en fin de sujet.

Lorsqu'on mesure la caractéristique courant tension d'un barreau de GaAs, celle-ci ne présente pas un simple comportement ohmique mais une courbe spécifique avec une région de pente négative, comme l'illustre la figure 3. C'est l'effet Gunn, du nom du physicien J.B. Gunn qui l'a découvert en 1962, utilisé notamment pour concevoir des oscillateurs électroniques. L'objectif de cet exercice est de montrer comment cette caractéristique est associée au transfert d'électrons entre deux vallées de la bande de conduction (figure 4), d'une vallée d'énergie à haute mobilité à une vallée d'énergie à basse mobilité.

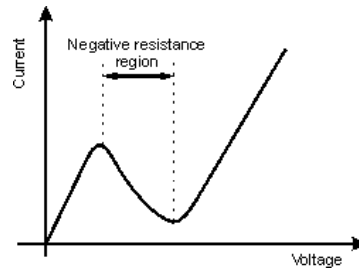


Figure 3. Allure de la caractéristique courant tension d'un barreau de GaAs.

On considère un parallélépipède rectangle – de longueur d et de section carré a^2 de GaAs, avec $a = 1 \text{ mm}$ et $d = 0,1 \text{ mm}$, qui comporte une concentration excédentaire $N_{exc} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ d'atomes d'arsenic, tous ionisés à la température ambiante. Ainsi, le semiconducteur se comporte comme un semiconducteur extrinsèque de type N dont la concentration de porteurs de charge est $n = N_{exc}$.

Comme l'illustre la figure 4, le GaAs possède en fait deux types de porteurs dans la bande de conduction. Les électrons légers de concentration n_1 sont situés au bas de la bande de conduction en Γ ; leur masse est $m_1 = 0,07 m_0$ et leur mobilité $\mu_1 = 7500 \text{ cm}^2/\text{V}$. Les électrons lourds, de concentration n_2 , correspondent au deuxième minimum, en L ; leur masse effective est sensiblement égale à celle des électrons libres $m_2 = m_0$.

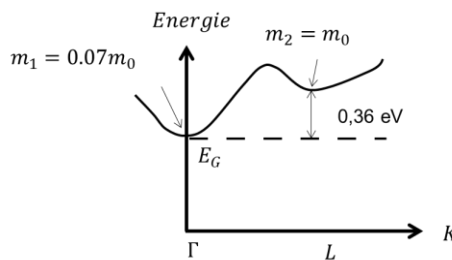


Figure 4. Illustration de la bande de conduction de GaAs avec deux minima associés à deux types de porteurs de charge de masses m_1 et m_2 .

Quand la tension appliquée aux extrémités du barreau est basse, seuls les états de la vallée Γ sont peuplés et tous les électrons sont des électrons légers.

1. Donner l'expression de la conductivité électrique basse-tension σ_0 et faire l'application numérique.
2. Donner l'expression de la résistance R_B du barreau et calculer sa valeur (à basse tension).

Dans le cas général, la conductivité électrique σ est assurée par les deux types de porteurs de charge.

3. Déterminer l'expression de σ en fonction de μ_1 et des densités n_1 et n_2 des porteurs de charges en supposant que le temps de relaxation τ est le même pour ces deux types de porteurs. L'expression à trouver est de la forme $\sigma = e\mu_1(x_1n_1 + x_2n_2)$; préciser les constantes x_1 et x_2 .

On admet que la densité n_2 des électrons lourds croît proportionnellement au champ électrique appliqué E suivant la loi $n_2 = n \frac{E}{E_0}$ pour $E \leq E_0$ et que cet accroissement s'effectue au détriment de la densité n_1 des électrons légers jusqu'à ce que ceux-ci aient complètement disparu (pour $E = E_0$). La conservation de la charge impose $n = n_1 + n_2$.

4. Déterminer l'expression de n_1 et tracer $n_1(E)$ et $n_2(E)$ en indiquant la position de n et de E_0 .
5. Donner l'expression de σ pour $E > E_0$ et la comparer à celle obtenue à basse tension σ_0 .
6. Donner l'expression de $\sigma(E)$ pour $E < E_0$.

Pour les questions suivantes, on prendra $\sigma = k_1 - k_2 E$ pour $E < E_0$ et $\sigma = k_3$ pour $E > E_0$ avec k_1, k_2, k_3 des constantes positives.

7. Donner l'expression de la densité de courant j pour $E > E_0$ puis $E < E_0$.
8. Préciser la valeur E_M de E pour laquelle j est maximum dans l'intervalle $0 < E < E_0$.
9. Représenter la courbe caractéristique $j(E)$ en indiquant E_M et E_0 .
10. Comment passe-t-on de la courbe $j(E)$ à la caractéristique courant tension ? Comparer votre courbe $j(E)$ à la figure 3 et conclure.

Exercice 3. GaAs intrinsèque et extrinsèque (7 points)

Un formulaire se trouve en fin de sujet.

On compare deux cristaux de GaAs, l'un pur, l'autre dopé de type P avec une concentration de dopants $N_A = 1,6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Les masses effectives et les mobilités des porteurs de charges sont $m_1 = 0,07 m_0$ et $\mu_1 = 7500 \text{ cm}^2/\text{V}$ pour les électrons et $m_h = 0,5 m_0$ et $\mu_h = 400 \text{ cm}^2/\text{V}$ pour les trous, la largeur de la bande interdite est $E_G = 1,42 \text{ eV}$.

1. Pour le cristal pur, donner l'expression de la concentration intrinsèque n_i en fonction de E_G , m_1 , m_h et $k_B T$ puis calculer sa valeur à température ambiante.
2. En déduire la valeur de la résistivité intrinsèque ρ_i à température ambiante.
3. Pour le cristal dopé, déterminer les concentrations de porteurs n et p .
4. En déduire la valeur de la résistivité ρ_d à température ambiante. Commenter ce résultat en le comparant à celui de la question 2.

Le coefficient d'absorption optique α mesuré pour les 2 cristaux est présenté figure 5.

5. Dans le cas pur, pourquoi y a-t-il une région à basse énergie pour laquelle α est nul ?
6. Déterminer à partir de quelle longueur d'onde le GaAs est absorbant.
7. Avec le dopage, comment varie l'absorption ? Pourquoi ?

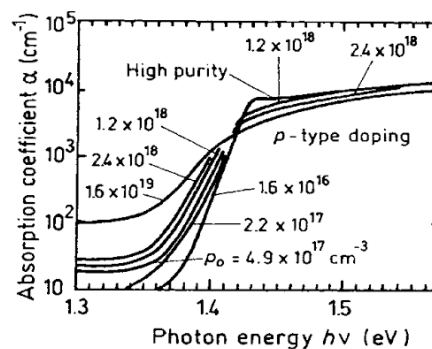


Figure 5. Coefficient d'absorption optique mesuré dans des cristaux de GaAs de dopage variable.

Formulaire et valeur des constantes usuelles

$$j = \sigma E$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h}$$

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e} \text{ et } \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h}$$

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h$$

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \text{ et } p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2}\right)^{3/2} = \left(\frac{m_e}{m_0}\right)^{3/2} N_0$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h k_B T}{h^2}\right)^{3/2} = \left(\frac{m_h}{m_0}\right)^{3/2} N_0$$

$$N_0 = 2 \left(\frac{2\pi m_0 k_B T}{h^2}\right)^{3/2} = 2.10^{19}/cm^3 \text{ à température ambiante}$$

$$h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s} = 6,58.10^{-16} \text{ eV.s}$$

$$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$e = 1,602.10^{-19} \text{ C}$$

$$m_0 = 9,1.10^{-31} \text{ kg}$$

$$k_B T = 25 \text{ meV à température ambiante}$$