



Physique des Matériaux II

Filière : SMP - Semestre : VI

***Travaux Dirigés
Série n°3***

2024/2025

Problème n°1

On considère un cristal de Germanium, de longueur $L=2 \text{ mm}$ et de section $S=1 \text{ mm}^2$, à $T = 300\text{K}$

Partie 1 : Semi-conducteur intrinsèque

1. Déterminer la position du niveau de Fermi intrinsèque d'un tel cristal ;
2. Calculer la concentration intrinsèque ;
3. Combien d'atomes de Ge donnent naissance à une paire électron/trou ?
4. Calculer sa conductivité électrique ;
5. A quelle température doit-on porter ce cristal pour que sa conductivité électrique soit 50 fois plus élevée que celle à la température ambiante.

Partie 2 : Semi-conducteur extrinsèque

Ce cristal est fortement dopé par du phosphore dont la concentration est $N_d = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

1. Quelle est la nature du dopage de ce semi conducteur ?
2. Tous les atomes de phosphore participent à la conduction ; expliquer cette phrase ;
3. Calculer la concentration en trous et électrons ;
4. Calculer la nouvelle conductivité électrique ;
5. . Interpréter ce résultat ;

$$M_{\text{Ge}}=72,59 \text{ g/mol} \quad \rho=5,33\text{g/cm}^3 \quad E_g=0,66\text{eV} \quad m_e^* = m_t^* = \frac{1}{2}m_0$$

$$\mu_n = 4500 \text{ cm}^2/\text{V.s} \quad \mu_p = 3500\text{cm}^2/\text{V.s} \quad k_B = 8,625 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} \quad \frac{\hbar^2}{2m_0} = 3,8 \text{ eV}\text{\AA}^2$$



Objectif

Conductivité électrique

Intrinsèque

Influence de la température

Extrinsèque

Influence du Dopage

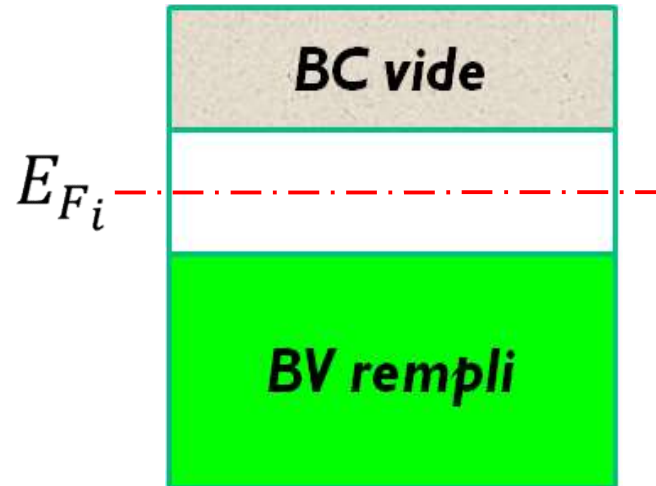
Partie 1 : Semi-conducteur intrinsèque

1. Position du niveau de Fermi intrinsèque

$$E_{F_i} = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4}k_B T \cdot \ln\left(\frac{m_t}{m_e}\right)$$

$$m_e^* = m_t^*$$

$$E_{F_i} = \frac{E_C + E_V}{2}$$



Origine des énergies : $E_V = 0$

$$E_{F_i} = \frac{E_g}{2} = 0,33 \text{ eV}$$

2. Concentration intrinsèque

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_C \cdot n_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$n_C = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad n_V = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$n_i = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$n_i = 2 \left(\frac{m_0 k_B T}{4\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$k_B T = 0,026 \text{ eV}$$

$$n_i = 2,76 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

3. Création de paire électrons/trous

$$n_a = \frac{\rho \cdot N_{av}}{M} \quad n_a = 4,42 \cdot 10^{22} \text{ cm}^3$$

$$\frac{N_0}{N_{at}} = \frac{n_i}{n_{at}} = 6 \cdot 10^{-10}$$

4. Conductivité électrique intrinsèque

$$\sigma = n_i e (\mu_n + \mu_p) \quad \sigma = 3,5 \cdot 10^{-2} (\text{cm} \cdot \Omega)^{-1}$$

5. Influence de la température

n_C et n_V sont indépendants de la température

$$\sigma = n_C e (\mu_n + \mu_p) e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = e^{-\frac{E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right)}$$

$$\ln(50) = -\frac{E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right)$$

$$\sigma' = n_C e (\mu_n + \mu_p) e^{-\frac{E_g}{2k_B T'}}$$

$$\frac{1}{T'} = \frac{1}{T} - \frac{2k_B}{E_g} \ln(50)$$

$$T' = 433K$$

Partie 2 : Semi-conducteur extrinsèque

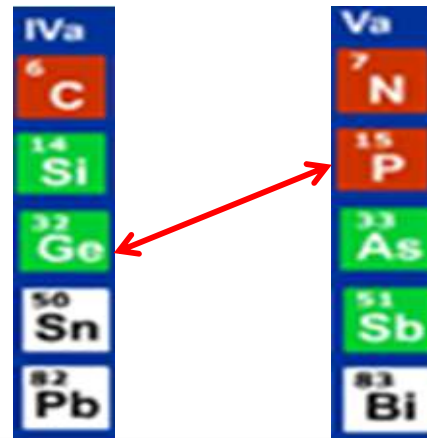
$$N_d = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

1. Type du dopage de ce semi conducteur ?

Dopage avec du phosphore : colonne à droite de celle du germanium.

Atomes donneurs

Dopage par un élément de type V



IVa	Va
⁶ C	⁷ N
¹⁴ Si	¹⁵ P
³² Ge	³³ As
⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb
⁸² Pb	⁸³ Bi

Dopage de type N

Introduction d'une concentration N_d
d'atomes donneurs

2. Tous les atomes de phosphore participent à la conduction : Tous les atomes donneurs sont ionisés

3. Concentration en trous et électrons

$$n = N_d = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_d} = 3,8.10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

4. Conductivité électrique extrinsèque

$$\sigma'' = e(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$$\sigma'' = 0,146(cm. \Omega)^{-1}$$

5. Interprétation

Conductivité électrique intrinsèque

$$\sigma = 3,5 \cdot 10^{-2}(cm. \Omega)^{-1}$$

Conductivité électrique extrinsèque

$$\sigma'' = 0,146(cm. \Omega)^{-1}$$

$$\frac{\sigma''}{\sigma} = 4$$

$$T' = 433K$$

$$\sigma'' = 50 \cdot \sigma$$

La conductivité électrique augmente avec la
température et avec le dopage

1^{ère} partie : Semi-conducteur intrinsèque

1. Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) : Analyser et commenter cette phrase ;
2. Expliquer pourquoi on doit introduire la notion de densité d'états énergétiques ;
3. En utilisant l'approximation de Maxwell-Boltzmann, établir les expressions des concentrations des électrons et des trous dans les bandes de conduction et de valence ;
4. En déduire l'expression de la concentration intrinsèque ;
5. Etablir l'expression du niveau de Fermi intrinsèque ;
6. Donner l'expression de la conductivité intrinsèque ;
7. Application numérique :

-
1. Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) : Il est très difficile voir impossible de réaliser un SC pure à 100%. Il existe toujours des impuretés de l'ordre de quelques ppm
 2. Notion de densité d'états énergétiques : Les niveaux d'énergies sont tellement rapprochés qu'il est difficile d'apprécier l'écart entre deux niveaux successifs

3. concentrations des électrons et des trous

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$

$$p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_C \cdot n_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$n_i = 6,143 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_{F_i} = \frac{E_g}{2} + \frac{1}{2} k_B T \ln \left(\frac{n_V}{n_C} \right)$$

$$E_{F_i} = 0,5385 \text{ eV}$$

$$\sigma_i = n_i e (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma_i = 1,9 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

2ème partie : Semi-conducteur extrinsèque

1. Tous les atomes dopants participent à la conduction : Tous ses atomes sont ionisés
2. La concentration des porteurs de charges est égale à celle des atomes dopants

3. Température pour avoir : $\sigma' = 2 (\Omega.m)^{-1}$

Il s'agit toujours du cas pur; c'est-à-dire conductivité intrinsèque

$$\sigma' = e\sqrt{n_C n_V}(\mu_n + \mu_p)e^{-\frac{E_g}{2k_B T'}} \quad \sigma_i = e\sqrt{n_C n_V}(\mu_n + \mu_p)e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

$$\ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_i}\right) = 13,87 = -\frac{E_g}{2k_B}\left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right) \quad T' = 807 K$$

4. Dopage de type P : Élément dopant est le Bore

Tableau périodique des éléments

La plupart des éléments chimiques sont des métaux

métalloïdes non - métaux

1 H	2 He																	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr			
3 Li	4 Be																	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
11 Na	12 Mg																	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																						
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																							
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																							

5. Concentration de l'élément dopant

$$p = N_a \quad \sigma = p \cdot e \cdot \mu_p$$

$$N_a = \frac{\sigma}{e \cdot \mu_p}$$

$$N_a = 2,5 \cdot 10^{16} cm^{-3}$$

Concentration en *ppm*

$$M_{Si} = 28,08 \text{ g/mol}$$

$$N_a = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rho_{Si} = 2,33 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Si} = \frac{N \cdot M_{Si}}{a^3 N_{av}} \qquad N_{at} = \frac{N}{a^3} = \frac{\rho_{Si} \cdot N_{av}}{M_{Si}}$$

$$N_{at} = 1,75 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$\frac{N_d}{N_{at}} = 1,44 \cdot 10^{-7}$$

$$C_{ppm} = 0,144 \text{ ppm}$$

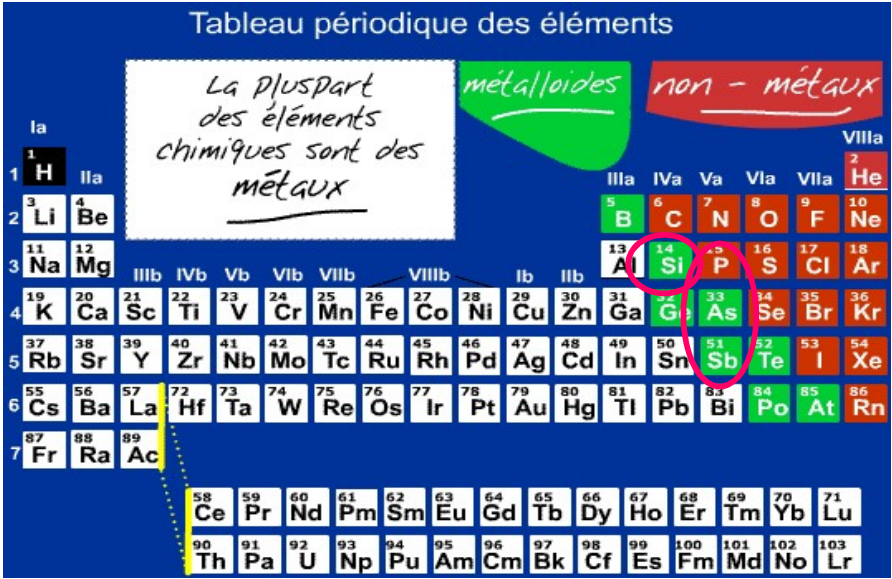
6. Dopage de type N : Elément dopant est le Phosphore

$$n = N_d$$

$$\sigma = n.e.\mu_n$$

$$N_d = \frac{\sigma}{e.\mu_n}$$

$$N_d = 8,95.10^{15}cm^{-3}$$



$$\frac{N_a}{N_{at}} = 5,1.10^{-8}$$

$$C_{ppm} = 0,05 ppm$$

7. Interprétation

Dopage de type P : $C_{ppm} = 0,144 ppm$

$$N_d < N_a$$

Dopage de type N : $C_{ppm} = 0,05 ppm$

Le dopage de type *N* est meilleure que le dopage de type *P*