



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

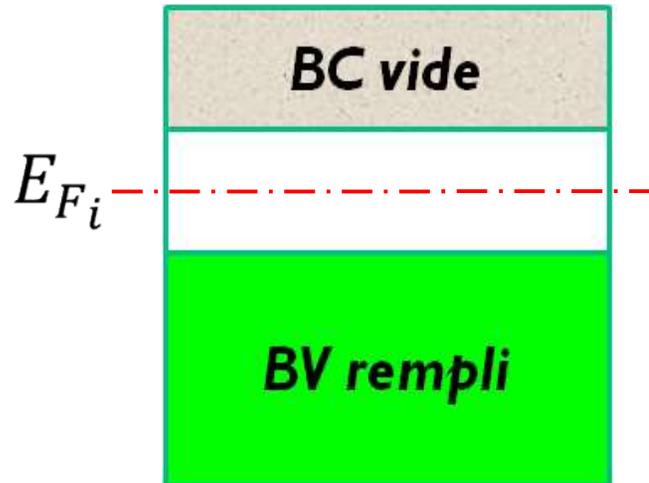
Partie 1 : Semi-conducteur intrinsèque

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

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

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

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

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

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

$$T' = 376K$$

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

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

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

5. Interprétation

Conductivité électrique intrinsèque

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

$$T' = 376K$$

Conductivité électrique extrinsèque

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

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

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

La conductivité électrique augmente avec la
température et avec le dopage

Problème n°2 : Semi-conducteurs intrinsèque et extrinsèque

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2^{ème} 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 : $\sigma = 2 (\Omega \cdot cm)^{-1}$

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

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

$$T' = 807 K$$

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

Tableau périodique des éléments

La plupart des éléments chimiques sont des métaux

métalloïdes non - métaux

1	2																	10
3	4																	18
11	12											13	14	15	16	17	18	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89															118	
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			

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

$$n = N_d$$

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu_n$$

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

$$N_d = 8,95 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

Tableau périodique des éléments

La plupart des éléments chimiques sont des métaux

métalloïdes non-métaux

1 H	2 He																	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											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	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac																
			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		
			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		

$$\frac{N_d}{N_{at}} = 5,1 \cdot 10^{-8}$$

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

7. Interprétation

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

$$N_d < N_a$$

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

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