I) On veut préparer des cristaux de grande taille d'un composé semi-conducteur par la méthode de Czochralski. Décrivez rapidement cette méthode sachant qu'un des éléments du composé a une pression de vapeur très élevée à la température de fusion. Quelle doit être la caractéristique importante du diagramme de phase de ce composé.

II) Les mesures de caractérisation électrique ont permis d'obtenir les courbes de la figure 1

a) à partir de la courbe d'effet Hall de l'échantillon n°1 calculer la largeur de bande interdite de ce composé.

b) les courbes A, B et 1, 2, 3, 4 n'ont pas le même comportement de l'effet Hall comment expliquez vous cette différence ?

c) tracer la courbe de variation de la mobilité de Hall en fonction de la température dans le domaine intrinsèque pour les échantillons n°1 et n°2. L'évolution obtenue peut-elle être corrélée à des mécanismes simples de diffusion des porteurs (loi en $T^{-3/2}$ par exemple)

d) Dans le domaine de conduction mixte lorsque la courbe d'effet Hall présente un maximum montrer que la valeur du maximum peut s'écrire

$$R_{max} = -\frac{3\pi}{8e} \times \frac{1}{4(p-n)} \times \frac{(c-1)^2}{c}$$

en évaluant la valeur $(p-n)$ à partir des courbes d'effet Hall dans la

3ème de saturation (échantillon rouge) calculer pour les échantillons n°1 et n°2 la valeur du coefficient c.

Formules

- variations de R_H dans le domaine intrinsèque $R_H = -A \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$

avec $k = 8,62 \times 10^{-5}\ eV\,K^{-1}$

- valeur de R_H en régime de porteurs majoritaires

porteurs n $\quad R_H = -\frac{3\pi}{8} \times \frac{1}{ne}$

porteurs p $\quad R_H = \frac{3\pi}{8} \times \frac{1}{pe}$

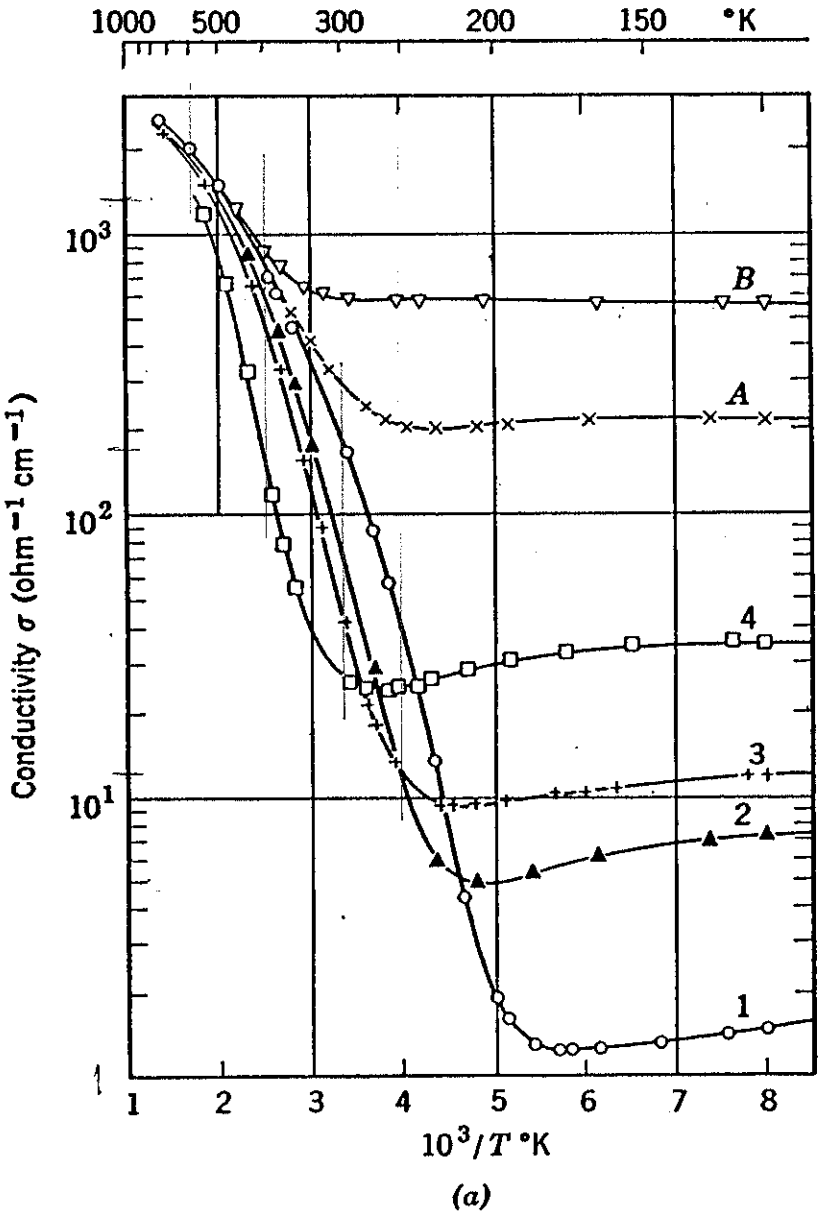
avec $e = 1,6 \times 10^{-19}\ C$

- mobilité de Hall $\quad \mu_H = |R_H| \times \sigma$

- valeur de R_H en régime de conduction mixte

$$R_H = -\frac{3\pi}{8e} \times \frac{nc^2 - p}{(nc+p)^2}$$

avec $c = \frac{\text{mobilité des électrons}}{\text{mobilité des trous}} = \frac{\mu_e}{\mu_p}$


1000 500 300 200 150 °K
Conductivity σ (ohm⁻¹ cm⁻¹)
10³
10²
10¹
1
B
A
4
3
2
1
1 2 3 4 5 6 7 8
10³/T °K
(a)

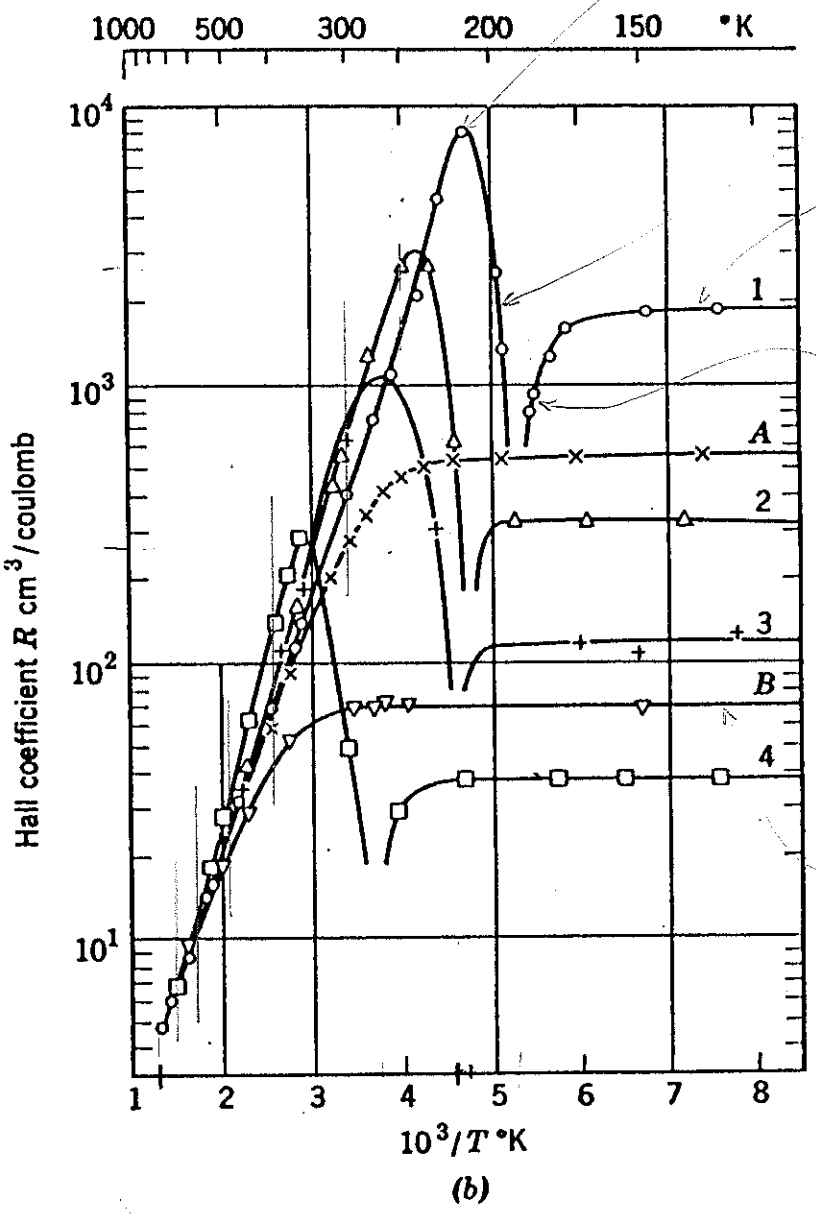
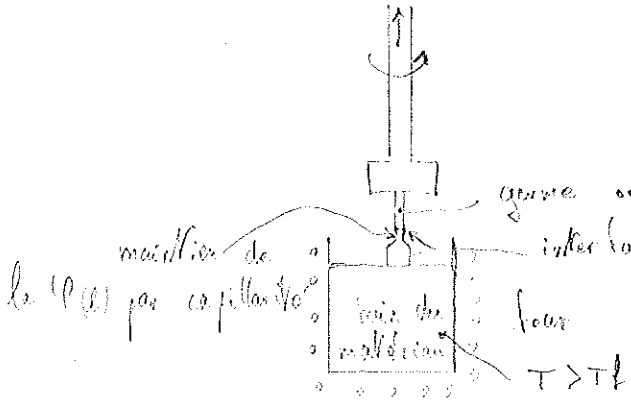

1000 500 300 200 150 °K
Hall coefficient R cm³/coulomb
10⁴
10³
10²
10¹
1
A
2
3
B
4
1 2 3 4 5 6 7 8
10³/T °K
(b)

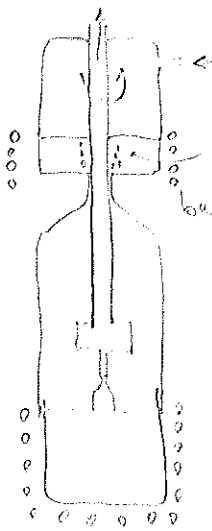
Fig. 1

1988 - 1989

I) La méthode de Czochralski consiste à faire tirer un monocristal à partir d'1 bain fondu du matériau à préparer :



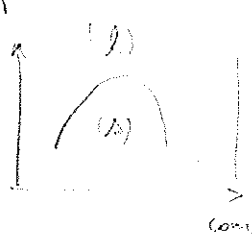
Comme l'un de composés présente une pression de vapeur très élevée, il aura tendance à s'échapper du bain, et il s'en suivra une perte en composition de cet élément dans le barreau tiré. Il faut donc éviter cet échappement, en établissant une contre pression par l'intermédiaire d'un deuxième bain liquide non réactif (d'un autre composé) :



bulle de l'élément à forte pression de vapeur, que l'on obtient en réglant la contre pression par

Système de la zone flottante

Le diagramme de phase de ce composé doit présenter un point de fusion congruente :



Ainsi, lors de la solidification, la composition du solide est la même que celle du liquide de départ.

II a) En régime intrinsèque, on a : $R_H = -A \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$

$$\rightarrow \quad \ln R_H = \ln(-A) + \frac{\Delta E}{2kT}$$

le régime intrinsèque est rejoint à haute température, dans la partie linéaire de la courbe 1. Cette courbe a dans cette région une pente $-A$. Si on prend deux points de cette droite :

$$R_{Ha} = -A \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT_a}\right)$$

$$R_{Hb} = -A \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT_b}\right)$$

$$\frac{R_{Ha}}{R_{Hb}} = \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT_a} - \frac{\Delta E}{2kT_b}\right)$$

$$\rightarrow \quad \boxed{\frac{R_{Ha}}{R_{Hb}} = \exp\left[\frac{\Delta E}{2k}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b}\right)\right]} \quad \text{d'où l'on peut}$$

tirer la valeur de ΔE, largeur de la bande interdite de notre composé.

AN : $R_{Ha} = 10^4 \text{ cm}^3/\text{C} \rightarrow T_a = 600 \text{ K}$

$R_{Hb} = 1000 \text{ cm}^3/\text{C} \rightarrow T_b = 267 \text{ K}$

$\Rightarrow \boxed{\Delta E = 0{,}38 \text{ eV}}$

b) Le cas A et B sont typiques de SC à forte concentration en niveaux donneurs : $N_d \gg N_a$. Aux basses températures, E_F se situe vers la BC, puis retrouve sa position intrinsèque (milieu de ΔE) lorsque T devient plus importante. A bT, n_d faible (ionisation totale) et la pente $\propto (R_H)$

Qd T ↘, n_d devient de plus en plus ↗, car $E_F \rightarrow E_{Fc}$, la pente tend à prendre la valeur due aux électrons restants de BC, lorsque Ed est complètement remplie.

On voit bien que la mobilité de nos porteurs ne peut pas être simplement corrélée à un mécanisme de diffusion en $\mu_H = K T^{-\frac{3}{2}}$

d)

En régime de conduction mixte :

$$R_H = -\frac{3\pi}{8e} \cdot \frac{nc^2 - p}{(nc+p)^2}$$

$$\frac{dR_H}{dc} = -\frac{3\pi}{8e}\left[\frac{2nc(nc+p)^2 - (nc^2-p)2(nc+p)n}{(nc+p)^4}\right]$$

$$= -\frac{3\pi}{8e}\left[\frac{(nc+p)\left[-2n(nc^2-p) + 2nc(nc+p)\right]}{(nc+p)^4}\right]$$

$$= -\frac{3\pi}{8e}\left[\frac{\cancel{2n^2c^2} + 2ncp - \cancel{2nc^2} + 2np}{(nc+p)^3}\right]$$

$$= -\frac{3\pi}{8e}\left[\frac{2np(c-1)}{(nc+p)^3}\right]$$

} nul.

$$= 0 \quad \Rightarrow \quad 2np(c-1) = 0 \quad \rightarrow \quad c = 1$$

$$\frac{nc^2 - p}{(nc+p)^2} = \frac{(c-1)^2}{4(p-n)c}$$

$$4c(nc^2 - p)(p-n) = (n^2c^2 + p^2 + 2ncp)(c^2 + 1 - 2c)$$

$$4c(pnc^2 - n^2c^2 - p^2 + np) = (n^2c^2 + p^2 + 2ncp)(c^2 + 1 - 2c)$$

$$\cancel{4}pnc^3 - \cancel{4}n^2c^3 - \cancel{4}cp^2 + \cancel{4}npc = n^2c^4 + n^2c^2 - \cancel{2n^2c^3} + p^2c^2 + p^2 - \cancel{2cp^2} + \cancel{2nc^3p} + \cancel{2ncp} - 4nc^2p$$

$$2pnc^3 - 2n^2c^3 - 2cp^2 + 2npc = n^2c^4 + n^2c^2 + p^2c^2 + p^2 - 4nc^2p$$

$$-n^2c^4 + c^3(2np - 2n^2) + (4np - p^2 - n^2)c^2 + (2np)c - p^2 = 0$$

En régime extrinsèque (zone d'épuisement) : $R_H = \frac{1}{(p-n)e}$

$\rightarrow p - n = \frac{1}{R_H e} \rightarrow (p-n)_1 = \frac{1}{2.10^3 e} = 3,1.10^{15}$

$(p-n)_2 = \frac{1}{3.10^2 e} = 2,1.10^{16}$

$$R_{max_1} = \frac{3\pi}{8e} \frac{1}{4(p-n)} \cdot \frac{(c-1)^2}{c}$$

$$\rightarrow -\left[\frac{8e\,4(p-n)}{3\pi} R_{max_1} + 2\right] c + c^2 + 1 = 0$$

$\rightarrow c_{11} = 15,43$

$c_{21} = 0,06$ ← non car $\mu_n \gg \mu_p$

$\rightarrow c_{21} = 36,24$

$c_{21} = 0,03$ ← non, id