

TP : Caractérisation de deux semi-conducteurs par mesure de conductivité

Melvin Creff, Félix Faisant

23 février 2018

1 Introduction

On cherche à caractériser deux semi-conducteurs de types différents : leur caractère extrinsèque ou intrinsèque (dopé ou non), et, pour le semi-conducteur intrinsèque, son énergie de gap. Pour cela, on mesure la conductivité du matériau en fonction de sa température.

2 Méthodologie

La température des deux semi-conducteurs est contrôlée par un module à effet Peltier, et la température est mesurée grâce à une sonde de Platine.

2.1 Détermination de la température

La sonde de platine voit sa résistance varier avec la température. On mesure la tension aux bornes de la sonde qui est parcourue d'un courant de $I_0 = 1 \text{ mA}$ grâce à une source de courant.

La courbe de calibration de la sonde de platine est donnée. Étant donné que l'on effectue des mesures de -25°C à 50°C , on effectue une régression linéaire de la courbe de calibration entre 250 K et 327 K, où la réponse de la sonde est linéaire. On mesure $T_{\text{salle}} = 300 \text{ K}$ et $R_{\text{Pt}}^{T_{\text{salle}}} = \frac{0.112 \text{ V}}{I_0} = 112 \Omega$.

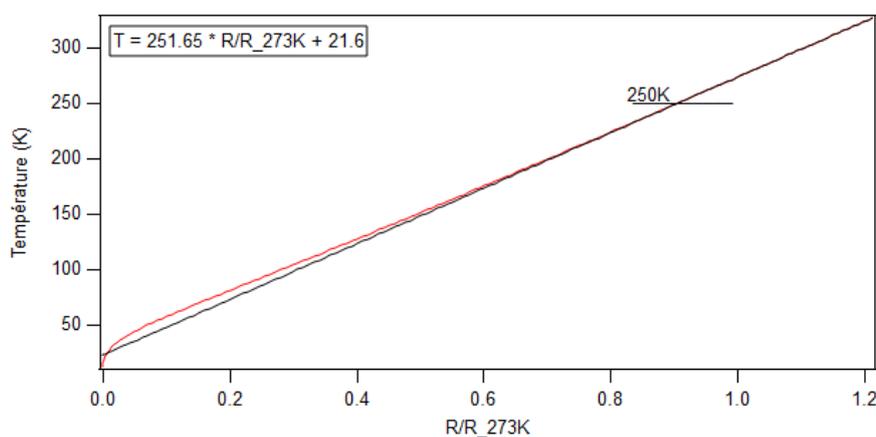


FIGURE 1 – Courbe de calibration de la sonde de température au platine, et régression linéaire de 250 K à 327 K.

La régression linéaire donne, avec $a = 251.65$ et $b = 21.6$,

$$T = a \frac{R}{R_{273\text{K}}} + b \quad \text{d'où} \quad R_{273\text{K}} = a \frac{R_{\text{Pt}}^{T_{\text{salle}}}}{(T - b)}$$

Ainsi la température est donnée par

$$T = a \frac{V_{\text{Pt}}}{I_0 R_{273\text{K}}} + b$$

2.2 Obtention de la résistance et thermalisation

La résistance du semi-conducteur est mesurée grâce à un pont diviseur de tension 5.0 V - R_0 - semiconducteur - masse. Ainsi $R_{\text{semi-conducteur}} = R_0 \frac{V}{V_0 - V}$, avec $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ pour le semi-conducteur n° 1 et $R_0 = 17 \text{ k}\Omega$ pour le semi-conducteur n° 2.

On ne peut pas obtenir directement la résistance en fonction de la température car la sonde de température ne mesure pas la température au sein du semi-conducteur : tant que la température varie, il existe un décalage de température entre la sonde et le semi-conducteur. En effectuant un balayage de température, on obtient un cycle d'hystérésis (voir figure 4 et 6).

On mesure 4 points pour chaque semi-conducteur proche de la thermalisation, ce qui permet d'obtenir directement les résistances avec une bonne précision aux 4 températures.

Dans un second temps, on effectue un balayage de température. Pour obtenir une courbe approchée résistance/température, on prend la moyenne entre la courbe de température croissante et décroissante.

2.3 Détermination du type de semi-conducteur et de E_{gap}

La conductivité des conducteurs étudiés suit la loi de Drude :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

avec $n(T)$ la densité électronique, m la masse électronique effective dans le matériau, et $\tau(T)$ le temps de diffusion. Aux températures étudiées, $\tau \propto T^{-3/2}$ (diffusion dominée par les phonons).

Le comportement de la densité électronique pour les semi-conducteurs intrinsèques est

$$n \propto T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}\right)$$

où E_{gap} est l'énergie du gap. La résistance varie donc avec T comme :

$$R \propto \frac{1}{\sigma} \propto \frac{1}{n\tau} \propto T^{\frac{3}{2}} T^{-\frac{3}{2}} e^{\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}} \quad \text{donc} \quad \boxed{R_{\text{intr}} \propto \exp\left(\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}\right)} \quad (1)$$

Pour déterminer E_{gap} pour le semi-conducteur intrinsèque à partir de 2 points (T_1, R_1) et (T_2, R_2) , on a

$$\frac{R_1}{R_2} = \exp\left(\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T_1} - \frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T_2}\right)$$

d'où

$$\boxed{E_{\text{gap}} = 2k_B \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)^{-1}} \quad (2)$$

Le comportement de la densité électronique pour les semi-conducteurs extrinsèques est

$$n \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_d}{2k_B T}} \quad \text{donc} \quad R_{\text{extr}} \propto e^{\frac{E_d}{2k_B T}} \quad \text{si} \quad k_B T < E_d \quad (3)$$

$$n = \text{cste} \quad \text{donc} \quad R_{\text{extr}} \propto T^{\frac{3}{2}} \quad \text{si} \quad E_d < k_B T < E_{\text{gap}} \quad (4)$$

$$n \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}} \quad \text{donc} \quad R_{\text{extr}} \propto e^{\frac{E_d}{2k_B T}} \quad \text{si} \quad E_{\text{gap}} < k_B T \quad (5)$$

3 Mesures et résultats

On commence par la mesure des points proches de la thermalisation. La figure 2 donne un exemple de mesure pour chaque semi-conducteur, et quatre points pour chaque semi-conducteur sont donnés dans les tableaux de la figure 3.

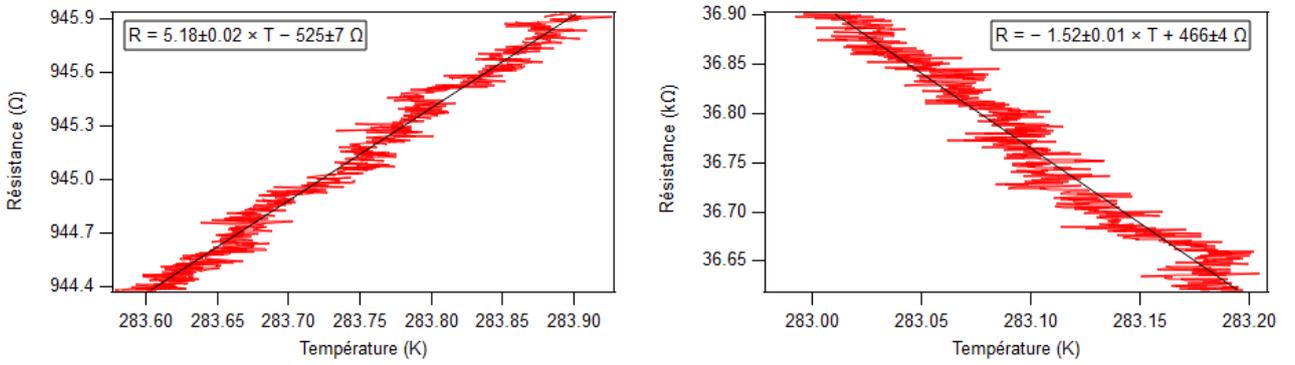


FIGURE 2 – Résistance du semi-conducteur n° 1 (à gauche) et n° 2 (à droite) vers 283 K mesurée sur une durée de l'ordre de la minute (~ 800 points), où l'on a un écart de quelques dizaines de mK : on est donc très proche de la thermalisation.

Points pour le semi-conducteur n° 1

Température (K)	253.50 ± 0.02	283.7 ± 0.02	295.2	310.90 ± 0.02
Résistance (Ω)	783.30 ± 0.01	945.2 ± 0.2	1016	1115.2 ± 0.4

Points pour le semi-conducteur n° 2

Température (K)	253.18 ± 0.02	283.10 ± 0.02	295.05	317.4 ± 0.2
Résistance ($k\Omega$)	155.7 ± 0.1	36.76 ± 0.02	20.4	8.61 ± 0.01
Nom du point	P1	P2	P3	P4

FIGURE 3 – Tableau de points (T, R) proches de la thermalisation pour les deux semi-conducteurs.

On effectue ensuite la mesure d'une courbe complète de ~ 250 K à ~ 320 K, dans les deux sens, et pour chaque semi-conducteurs. À cause de l'inertie thermique, on a un cycle d'hystérésis (figures 4 et 6).

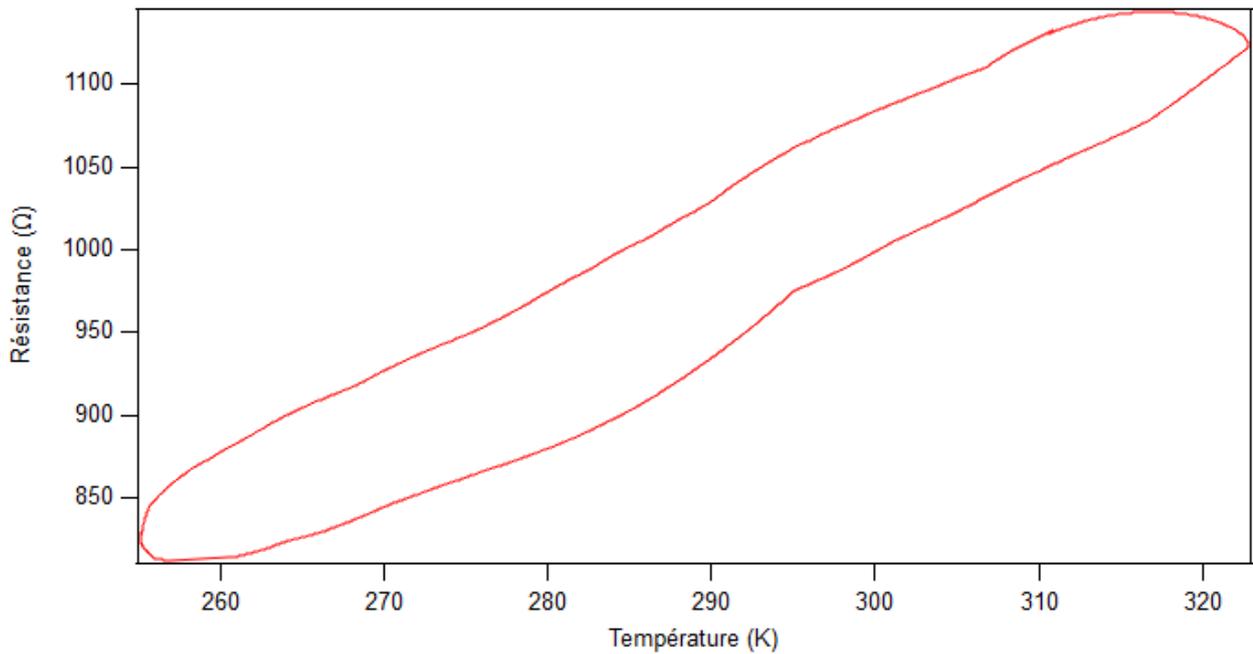


FIGURE 4 – Courbe complète résistance/température de 255 K à 323 K pour le semi-conducteur n° 1.

La croissance est typique d'un métal ou d'un semi-conducteur extrinsèque pour $E_d < k_B T < E_{\text{gap}}$ (équation 4), confirmé par la régression figure 5. De plus, la résistance est de l'ordre du $k\Omega$, ce qui est bien plus important que la résistance d'un fil d'un métal typique $R = \rho \frac{L}{S} = 0.17 \text{ m}\Omega$, pour $L = 1 \text{ cm}$, $S = 1 \text{ mm}^2$ et $\rho = 17 \Omega \text{ m}$ pour du cuivre. Le semi-conducteur n° 1 est donc bien **extrinsèque**.

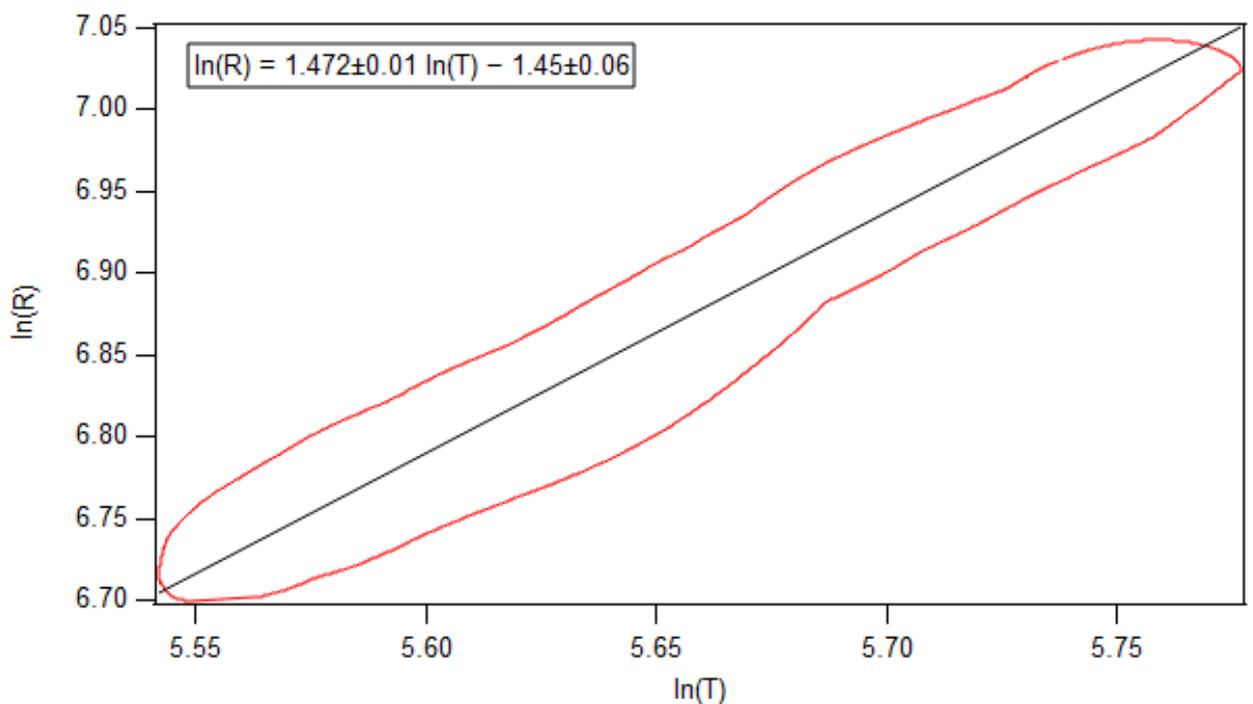


FIGURE 5 – Courbe complète résistance/température en log/log pour le semi-conducteur n° 1. On a bien une loi de puissance $R \propto T^\alpha$, avec $\alpha = 1.47 \simeq \frac{3}{2}$.

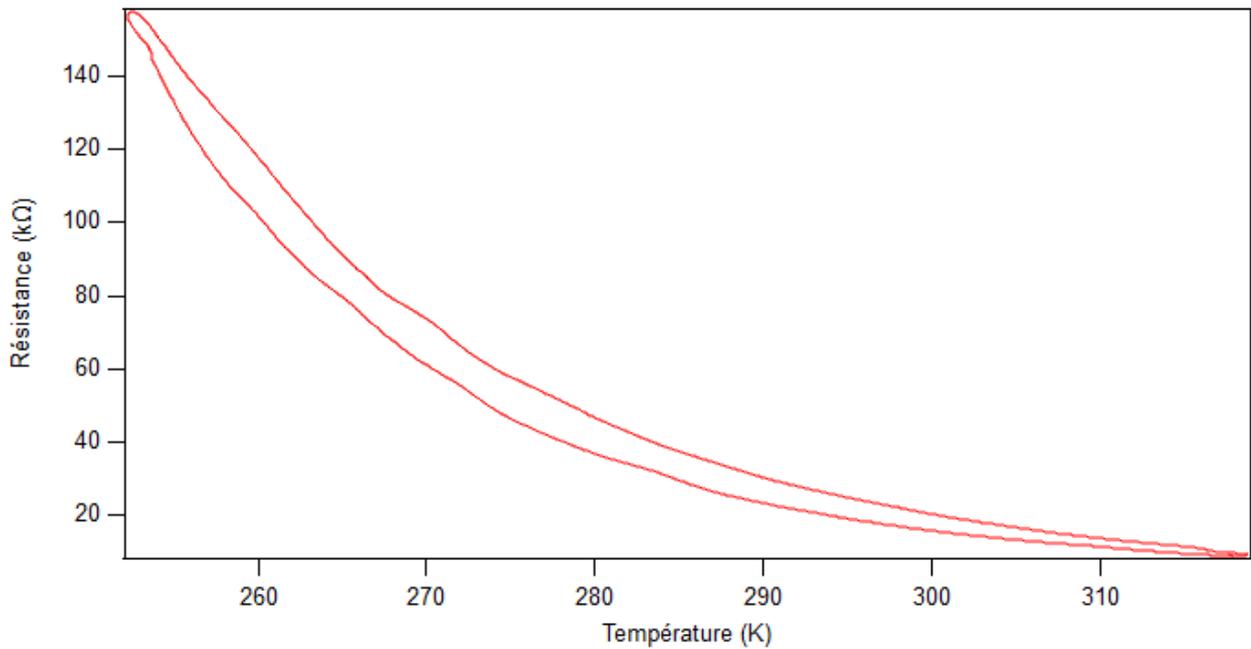


FIGURE 6 – Courbe complète résistance/température de 253 K à 320 K pour le semi-conducteur n° 2.

On observe pour le semi-conducteur n° 2 sur la figure 6 un comportement du type $R \sim e^{1/T}$ (et confirmé par la figure 7), typique d'un **semi-conducteur intrinsèque**.

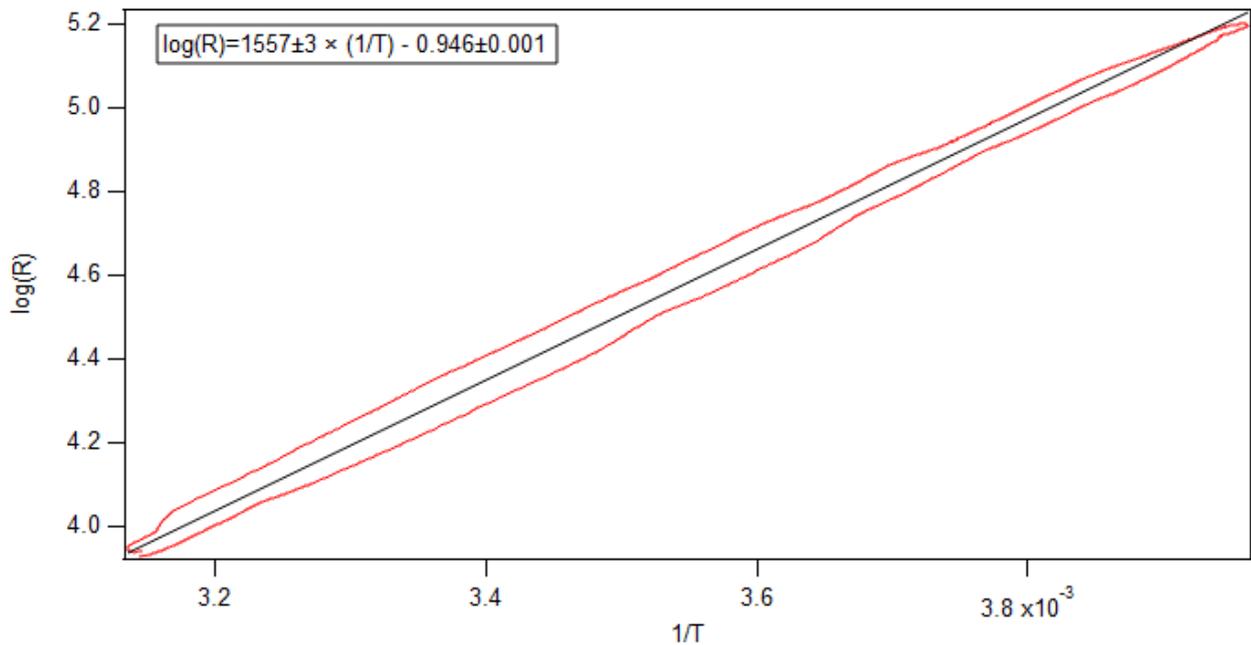


FIGURE 7 – Courbe complète pour le semi-conducteur n° 2 du logarithme de la résistance en fonction de l'inverse de la température, et régression linéaire. Le comportement en $R \sim e^{1/T}$ est bien confirmé.

3.1 Détermination de E_{gap}

À partir des points proches de la thermalisation (tableau 2 de la figure 3) et de la formule 2, on calcule les valeurs de E_{gap} pour chaque couple de points :

Couple	P1-P2	P1-P3	P1-P4	P2-P3	P2-P4	P3-P4
E_{gap} (eV)	0.60	0.62	0.63	0.70	0.65	0.63

Dans un second temps, on utilise la courbe complète résistance/température de semi-conducteur n° 2 pour déterminer E_{gap} :

$$R_{\text{extr}} = \text{cste} \cdot e^{\frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T}} \quad \text{d'où} \quad \log(R_{\text{extr}}) = \log(\text{cste}) + \frac{E_{\text{gap}}}{2k_B T \ln(10)}$$

À partir de la régression linéaire (figure 7), on a alors

$$E_{\text{gap}} = 1557 \cdot 2k_B \ln(10) = 0.62 \text{ eV}$$

Cette valeur coïncide avec celles obtenues par couples de points.

4 Conclusion

Pour conclure, les semi-conducteurs n° 1 et n° 2 sont respectivement extrinsèque (dopé) et intrinsèque.

La valeur de 0.62 eV est typique du Germanium. En effet, la valeur tabulée de E_{gap} pour le Germanium est de 0.67 eV à 302 K¹. De plus, le Germanium est, comme le Silicium, un semi-conducteur répandu. Il est donc probable que le semi-conducteur n° 2 est un composant en Germanium.

Pour augmenter la précision des résultats, il serait utile de mesurer un grand nombre de points thermalisés, ou d'effectuer un balayage de température très lent (ce qui nécessiterai une automatisation du balayage) pour avoir une évolution quasi-statique afin de réduire la largeur du cycle d'hystérésis.

1. Table de valeurs de quelques semi-conducteurs, Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Band_gap#List_of_band_gaps