

TP3 : Determination de la valeur du gap du Germanium

Boris Alexandre Baudel - Master de Physique - Université du Maine

Decembre 2023

Introduction

Dans ce travail pratique (TP3 : Étude Thermique), nous explorons la relation entre la conductivité électrique et la température dans les semi-conducteurs, avec un focus particulier sur le germanium. L'objectif est de déterminer la valeur de la bande interdite du germanium, une caractéristique influençant ses propriétés électroniques. Ce TP combine théorie et expérimentation pour fournir une compréhension approfondie des semiconducteurs et de leurs comportements thermiques.

Travail demandé

L'objectif de ce travail expérimental est de déterminer la valeur de la bande interdite du semiconducteur au Germanium par une mesure de conductivité électrique en fonction de la température.

Théorie

La conductivité électrique σ d'un matériau a pour expression :

$$\sigma = \sum_i C_i q_i \mu_i \quad (1)$$

où C_i est la concentration en porteurs de charge i , q_i est la charge des porteurs i et μ_i est la mobilité des porteurs de charges. Ici C_n est la concentration en électrons de valence. C_n ne varie quasiment pas en fonction de la température et correspond en première approximation à la concentration des électrons « libérés » par les cations. C_n vaut aux alentours de 10^{28} m^{-3} dans les bons métaux ce qui correspond très approximativement à un électron de conduction par cation. Ces électrons sont ceux contenus dans la sphère de Fermi (voir cours du Master).

Cas des métaux

En revanche, la mobilité électronique (μ_n) varie en fonction de la température en raison des collisions des électrons avec les vibrations du réseau atomique (collisions électrons-phonons) telle que $\mu_n = A/T$. La mobilité est à peu près inversement proportionnelle à la population de phonons (i.e. proportionnelle à la température T pour des températures typiquement supérieures à la température de Debye). Dans le cas des métaux, la conductivité électrique est assurée par les électrons de valence et nous avons :

$$\sigma = C_n q_n \mu_n \quad (2)$$

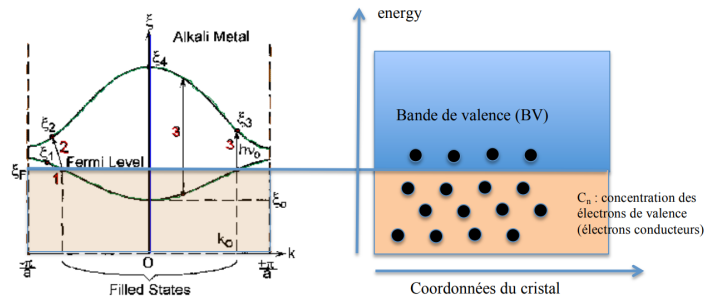


FIGURE 1 – gauche) structure de bande électronique d'un métal alcalin (seuls les électrons s contribuent à la conductivité). Le niveau d'énergie le plus haut occupé est le niveau de Fermi. L'ensemble des niveaux peuplés est délimité par la zone grisée. (b) représentation schématisée des électrons de conduction dans un cristal, pouvant, par excitation thermique occuper différents niveaux d'énergie aux environs du niveau de Fermi. L'accessibilité de nombreux états quantiques vides autour du niveau de Fermi explique la bonne conductivité électrique.

Pour les semiconducteurs, la structure électronique faisant apparaître une bande interdite (gap), les propriétés de transport en sont drastiquement modifiées. Comme cela vous a été présenté en cours, deux types de porteurs contribuent au transport : les électrons et les trous. Les premiers sont ceux qui peuvent, sous l'effet d'un champ électrique, migrer vers d'autres états quantiques dans la bande de conduction (électrons). Les seconds en font de même mais dans la bande de valence (trous électroniques).

Cas du Germanium

Le Germanium se situe dans la même colonne que le silicium et est donc tétravalent. Sa structure cristallographique est la même que celle du silicium (CFC). Elle est rappelée ci-dessous. Dans le cas des semiconducteurs, la conductivité électrique prend la forme suivante :

$$\sigma = C_n q_n \mu_n + C_p q_p \mu_p \quad (3)$$

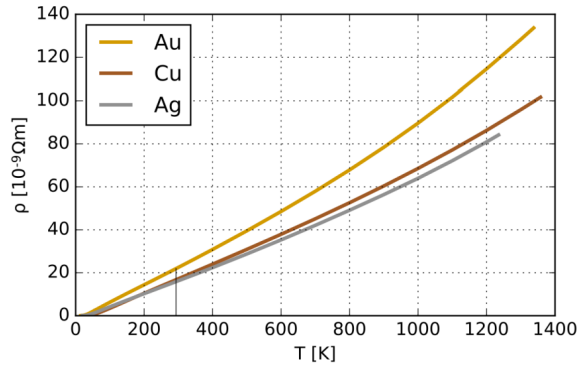


FIGURE 2 – : résistivité électrique de quelques métaux en fonction de la température.

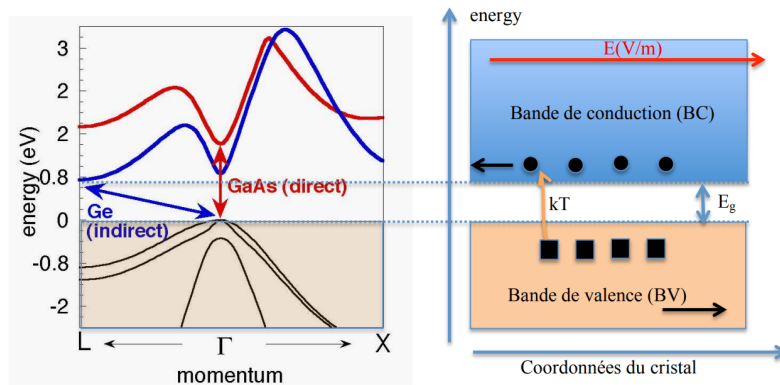


FIGURE 3 – (gauche) structure de bande électronique de deux semiconducteurs (GaAs et Ge). A $T=0K$, tous les électrons sont dans la bande de valence (zone grisée). Pour $T>0K$, les électrons de la BV peuvent être thermiquement promus dans la bande de conduction et peuvent ainsi contribuer à la conductivité électrique. (droite) représentation schématisée de la BV et de la BC accompagnées de quelques porteurs symbolisés par des ronds (électrons) et des carrés (trous).

Analyse Thermique des Semiconducteurs

Les électrons promus dans la bande de conduction disposent quant à eux de nombreux états quantiques vides qu'ils peuvent alors occuper lors de leur déplacement sous champ électrique. Ceci autorise alors le phénomène de conduction électrique. Cette promotion de porteurs (création de paires électron (BC)-trou (BV)) est un processus thermiquement activé qui se décrit bien dans le cas où la concentration en porteurs reste faible (cas des semiconducteurs non-dégénérés) selon une statistique de Maxwell-Boltzmann :

$$C_n = C_p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4)$$

Avec

$$N_c = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_c kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}, \quad N_v = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_v kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad (5)$$

Les masses effectives des électrons (m_c) et des trous (m_v) dans la bande de conduction et valence sont cruciales dans l'analyse des semiconducteurs. L'énergie E_g est l'énergie entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction, appelée aussi bande interdite ou « gap » en anglais.

La conductivité électrique d'un semiconducteur intrinsèque est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = q(\mu_c + \mu_v)N_cN_v \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = q\left(\frac{A_c}{T} + \frac{A_v}{T}\right)N_cN_v \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (6)$$

où σ est la conductivité électrique, q est la charge élémentaire, μ_c et μ_v sont les mobilités des électrons et des trous, respectivement, N_c et N_v sont les densités d'états dans la bande de conduction et de valence, et k est la constante de Boltzmann.

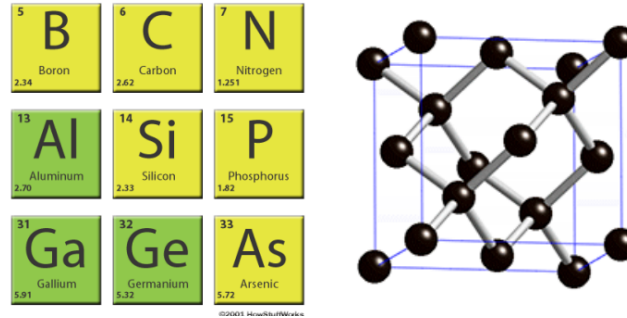


FIGURE 4 – Structure cristallographique

Contrairement à un métal dont la conductivité électrique diminue avec la température, celle d'un semiconducteur augmente avec la température selon une loi exponentielle. Dans le travail pratique proposé, il s'agira de déterminer la valeur de la bande interdite (E_g) en fonction des mesures de la résistance électrique en fonction de la température.

Travail expérimental

Pour réaliser l'étude expérimentale, vous disposez d'une chaîne de mesure entièrement automatisée constituée de :

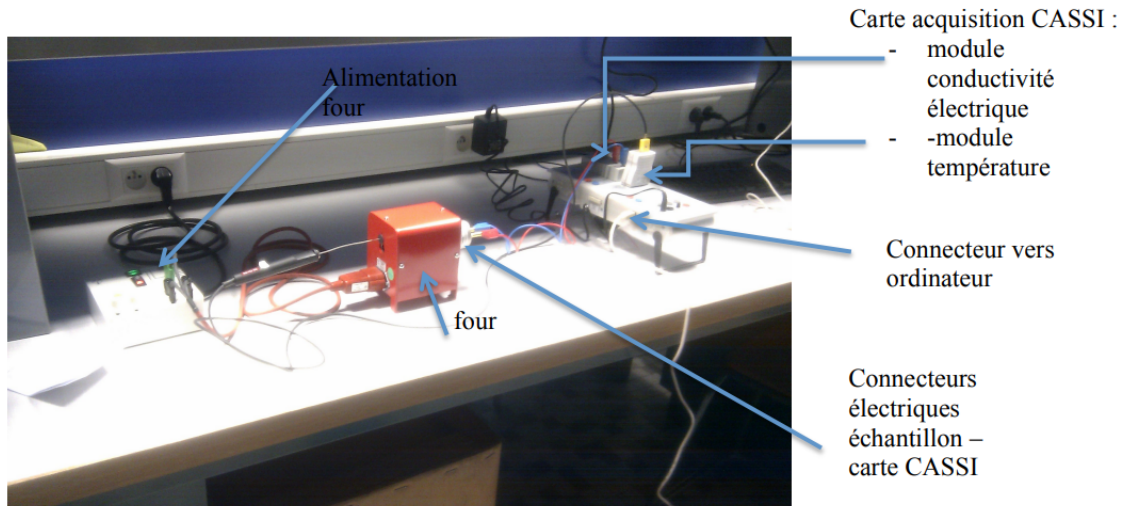


FIGURE 5 – Photographie du montage de mesure de conductivité électrique du semiconducteur Ge (carte acquisition CASSI).

Mode d'emploi du logiciel et de la carte CASSI pour l'acquisition des mesures de conductivité électrique du semiconducteur au Germanium (Ge).

Analyse

Pour déterminer la valeur de la bande interdite E_g du germanium à partir des mesures de la résistance électrique du semiconducteur en fonction de la température, nous pouvons utiliser le modèle d'Arrhenius. Ce modèle établit une relation

entre la résistance électrique (ou la conductivité) et la température, et est souvent utilisé pour caractériser les propriétés thermiques des semiconducteurs.

La formule du modèle d'Arrhenius est la suivante :

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

où : - $R(T)$ est la résistance à la température T , - R_0 est un facteur pré-exponentiel, - E_g est l'énergie de la bande interdite, - k_B est la constante de Boltzmann, - T est la température en Kelvin.

Pour estimer E_g , nous pouvons ajuster numériquement les données de résistance en fonction de la température à cette formule. Cela implique généralement de prendre le logarithme de la résistance et de réaliser une régression linéaire contre $\frac{1}{T}$ (inverse de la température). La pente de cette droite sera égale à $-\frac{E_g}{2k_B}$, à partir de laquelle nous pouvons calculer E_g .

La prochaine étape consiste à effectuer une régression linéaire sur le logarithme de la résistance en fonction de l'inverse de la température (en Kelvin). La pente de la droite obtenue nous donnera $-\frac{E_g}{2k_B}$, et de là, nous pourrions calculer la valeur de la bande interdite E_g pour le germanium.

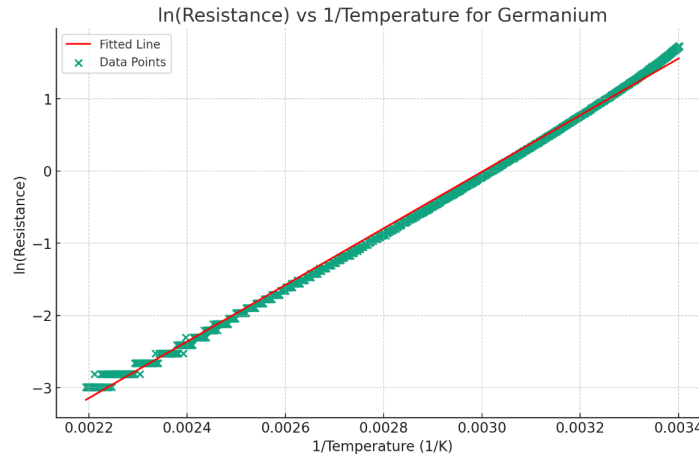


FIGURE 6 – Regression linéaire logarithmique de la résistance en fonction de l'inverse de la température

La régression linéaire sur le logarithme de la résistance en fonction de l'inverse de la température a donné les résultats suivants :

- Pente de la droite : 3918.11 K - Intercept : -11.76 - Coefficient de corrélation (r) : 0.999 (très proche de 1, indiquant un bon ajustement)

À partir de la pente de la droite, nous avons calculé l'énergie de la bande interdite (E_g) du germanium, qui est de 0.675 eV.

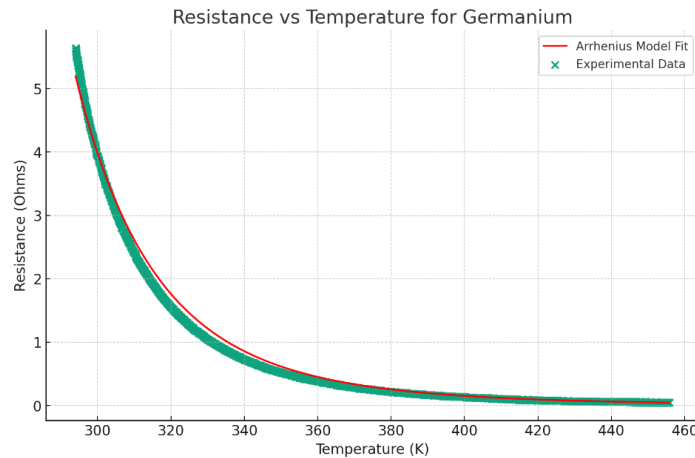


FIGURE 7 – Résistance et température pour le Germanium

L'ajustement numérique du modèle d'Arrhenius aux données expérimentales de résistance en fonction de la température a donné la valeur suivante pour le facteur pré-exponentiel $R = 8.48 \cdot 10^{-6}$ Ohm. Cette valeur de R représente la résistance à une température de référence dans le cadre de ce modèle. La valeur déjà estimée de E_g , nous pouvons maintenant utiliser le modèle d'Arrhenius pour prédire la résistance du germanium à différentes températures.

Conclusion

Ce TP m'a permis de mettre en pratique des concepts théoriques relatifs aux semi-conducteurs et à leur comportement thermique. L'utilisation du modèle d'Arrhenius pour analyser la résistance en fonction de la température a abouti à une estimation précise de l'énergie de la bande interdite du germanium. Cette approche a démontré l'importance de la compréhension théorique dans l'interprétation des données expérimentales et a offert une perspective pratique sur l'étude des matériaux semi-conducteurs dans des contextes réels.

Programmes Python

```
1 import pandas as pd
2
3 file_path = '/mnt/data/dtaTP1-EAD-2023.xls'
4 data = pd.read_excel(file_path)
5
6 data.head()
7
8 data_cleaned = data.iloc[:, [2, 4]]
9 data_cleaned.columns = ['Temperature_C', 'Resistance_Ohms']
10
11 data_cleaned['Temperature_K'] = data_cleaned['Temperature_C'] + 273.15
12
13
14 data_cleaned.head()
15
16 import matplotlib.pyplot as plt
17
18
19 plt.figure(figsize=(10, 6))
20
21
22 plt.scatter(data_cleaned['Inverse_Temperature_K'], data_cleaned['ln_Resistance'], label='Data Points')
23
24
25 plt.plot(data_cleaned['Inverse_Temperature_K'],
26          slope * data_cleaned['Inverse_Temperature_K'] + intercept,
27          color='red', label='Fitted Line')
28
29 plt.xlabel('1/Temperature (1/K)')
30 plt.ylabel('ln(Resistance)')
31 plt.title('ln(Resistance) vs 1/Temperature for Germanium')
32 plt.legend()
33 plt.grid(True)
34 plt.show()
35
36 from scipy.optimize import curve_fit
37
38
39 def arrhenius_model(T, R_0, E_g):
40     k_B = 1.380649e-23 # Boltzmann J/K
41     return R_0 * np.exp(E_g / (2 * k_B * T))
42
43 T_data = data_cleaned['Temperature_K']
44 R_data = data_cleaned['Resistance_Ohms']
45
46 E_g_fixed = E_g
47
48
49 popt, pcov = curve_fit(lambda T, R_0: arrhenius_model(T, R_0, E_g_fixed), T_data, R_data, p0=[1])
50
51 R_0_fitted = popt[0]
52
53 R_0_fitted
54
55
56 plt.figure(figsize=(10, 6))
57
```

```
58 plt.scatter(T_data, R_data, label='Experimental Data')
59
60 T_model = np.linspace(min(T_data), max(T_data), 500)
61 R_model = arrhenius_model(T_model, R_0_fitted, E_g_fixed)
62 plt.plot(T_model, R_model, color='red', label='Arrhenius Model Fit')
63
64 plt.xlabel('Temperature (K)')
65 plt.ylabel('Resistance (Ohms)')
66 plt.title('Resistance vs Temperature for Germanium')
67 plt.legend()
68 plt.grid(True)
69 plt.show()
```