

Identificação de Metal e de Semicondutor a partir do comportamento térmico

Luís Almeida

November 5, 2020

Laboratório de Física III

Número mecanográfico: 201805294

Turma: PL3

Data de entrega: 6/11/2020

Data de Realização: 24/10/2020

Abstract

O trabalho realizado teve como principal objetivo a determinação experimental da largura de banda proibida de um dado semicondutor, Δ , e o coeficiente de variação relativa com a temperatura de um dado condutor metálico, α . O valor obtido para α foi de $[(4.03 \pm 0.04) \times 10^{-3}] K^{-1}$, para o aquecimento, e de $[(3.87 \pm 0.02) \times 10^{-3}] K^{-1}$ para o arrefecimento. O valor obtido para Δ foi de $(1.17 \pm 0.01)eV$, para o aquecimento, e de $(1.41 \pm 0.05)eV$, para o arrefecimento.

1 Objetivos

- Estudo da resistividade dos metais na sua dependência com a temperatura;
- Determinação experimental da largura de banda proibida de um semicondutor e o coeficiente de variação relativa com a temperatura num condutor metálico;
- Técnicas de medição AC- familiarização e uso;

2 Introdução teórica

2.1 Resistividade elétrica de metais

A resistividade elétrica de diferentes metais está relacionada com a mobilidade dos seus eletrões, isto é, quão facilmente estes se conseguem mover através da estrutura do material. Para metais simples verifica-se, experimentalmente, que, dada uma temperatura de referência T_0 e numa gama de valores próximos desta, existe uma relação linear entre a resistividade elétrica e a variação de temperatura, que podemos escrever como:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (1)$$

Em que α é o coeficiente de variação relativa devido à temperatura e ρ_0 é a resistividade à temperatura de referência T_0 .

Esta relação existe, pois, mesmo em metais com uma rede atómica perfeita, ou materiais puros de forma mais geral, o movimento de eletrões é afetado por oscilações térmicas.

É de notar que, para materiais não perfeitos, ou seja, com defeitos¹ e/ou impurezas, a resistência sofre um aumento ainda maior. É, assim, necessário levar estes efeitos em conta quando se faz o estudo da resistividade.

Uma maneira sintética de descrever o impacto combinado destes diferentes efeitos na resistividade é através da regra de Matthiessen:

$$\rho_{total} = \rho_{térmico} + \rho_{defeitos} + \rho_{impurezas} \quad (2)$$

A contribuição dos defeitos varia bastante, podendo chegar a cerca de 5% para metais não tratados térmicamente, ou ser da ordem dos 0,1% para elementos puros.

2.2 Semicondutores- Banda proibida característica

O díodo é, essencialmente, um dispositivo eletrónico que viabiliza o controlo da corrente elétrica de um circuito, dependendo da sua polarização. É constituído por dois semicondutores de dopagens diferentes, um de tipo-p outros de tipo-n.

¹lacunas atómicas, fronteiras de grão ou deslocações, por exemplo

O díodo tem dois tipos distintos de polarização, direta, quando se aplica uma tensão positiva no lado da dopagem-p², e inversa, quando, como o nome sugere, se aplica uma tensão positiva no lado contrário, ou seja, no lado da dopagem-n.

No estado de polarização direta gera-se uma corrente contínua no circuito, em polarização inversa, o fluxo de eletrões é cortado, sendo a única corrente existente devido a impurezas dos materiais ou a excitação térmica dos eletrões. Como tal, esta corrente é, geralmente, da ordem dos μA .

Verifica-se que a corrente gerada devido à excitação térmica dos eletrões é regida por uma distribuição de Maxwell-Boltzmann e, como tal, tem uma dependência muito grande em T . Deste modo, podemos escrever, simplificando de forma extrema o modelo experimental³, que a corrente é dada pela seguinte expressão:

$$I = Ae^{-\frac{\Delta}{K_B T}} \quad (3)$$

Onde A é uma constante associada à temperatura ambiente, K_B é a constante de Boltzmann e Δ é a banda proibida (também conhecida por *band gap*) do material.

Este fenómeno ocorre pois os eletrões no tipo-p e as lacunas do tipo-n ganham energia térmica suficiente para “saltar” para a banda de condução do semicondutor e geram uma corrente.

Experimentalmente, é possível determinar Δ usando a sua dependência exponencial com a temperatura.

3 Procedimento experimental

3.1 Equipamento

Nesta experiência, é utilizado o seguinte equipamento:

- Gobelé;
- Óleo de silicone;
- Placa de aquecimento;
- Termómetro digital;
- Pegas térmicas;
- Base de cortiça;
- Díodo semicondutor e enroalmento de um fio metálico ambos submersos no óleo de silicone;

²Este lado do díodo é constituído por lacunas, sendo o lado de dopagem-n constituído por eletrões

³Para aproximar o modelo do que acontece realmente seria necessário fazer correções relativamente à taxa de dopagem do contudor, entre outras.

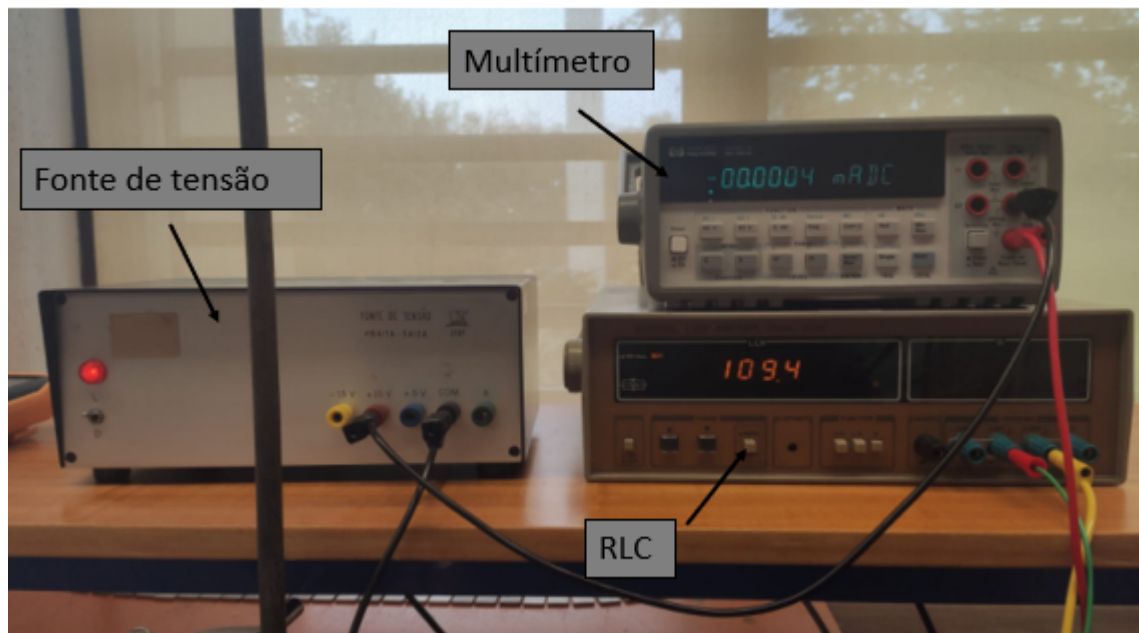


Figure 1: Fonte de tensão e equipamentos de medição usados

- Fonte de tensão fixa polarizada (DC) com $\pm 15V$;
- LCR meter no modo ohmímetro a $\approx 1kHz$;
- Multímetro no modo amperímetro;
- Cabos de ligação;

3.1.1 Grandezas, medidas e escalas

Na experiência foram registradas, em simultâneo, três grandezas distintas: a temperatura do óleo de silicone, o valor da resistência do enrolamento metálico e a intensidade da corrente no díodo semiconductor.

A temperatura do óleo foi registrada em graus Celsius.

Os valores da corrente, $I_{Díodo}$, foram registrados na escala dos μA com valores na ordem do 10^{-4} , os da resistência, R_{Metal} , em Ω com valores da ordem das centenas e os da temperatura, T , em graus Celcius na ordem das dezenas.

Teoricamente, as incertezas associadas aos instrumentos de medição usados corresponde ao último algarismo visível na escala, sendo este o critério usado para determinar a incerteza associada à medição da temperatura e da resistência. Contudo, na medição da intensidade da corrente verificou-se uma incerteza

maior, que variou no decorrer da experiência entre os esperados $\pm 10^{-5}$ e os $\pm 10^{-4} \mu A^4$.

Table 1: As grandezas registadas e as respetivas incertezas

| | T | R_{Metal} | I_{Diodo} |
|------------|---------|-------------|-------------------------------|
| Incertezas | ± 1 | $\pm 0, 1$ | $\pm 10^{-5}$ a $\pm 10^{-4}$ |
| Unidades | $[C]$ | $[\mu A]$ | $[\Omega]$ |

3.2 Montagem e indicações de segurança

Para realizar a atividade foi necessário montar dois circuitos elétricos, um para o registo da variação da resistência e outro para a variação da corrente. Ambos estes circuitos foram submersos no gobelé, juntamente com o termómetro digital, para o registo da temperatura. Tentou-se ajustar a placa, sobre a qual os circuitos foram montados, para que esta cobrisse, na totalidade, a boca do gobelé, reduzindo, assim, qualquer efeito de transmissão térmica do óleo para o ar.

Na montagem dos circuitos foi tida particular atenção, ao fazer as ligações com os cabos, à polarização do díodo, pois este fator é essencial para a realização com sucesso da experiência.

Foi tido, também, especial cuidado com as ligações elétricas feitas, de modo a evitar contacto direto entre os cabos e a placa de aquecimento/gobelé, uma vez que, estando estes a temperaturas elevadas durante parte da experiência, poderiam causar danos térmicos ou afetar os valores obtidos.

Sempre que se interagiu com o gobelé foram usadas luvas de proteção, novamente devido as elevadas temperaturas, e registada a hora para, posteriormente, se poder verificar se esta interação afetou os resultados.

3.3 Passo a passo do procedimento experimental

3.3.1 Preparação

Na preparação da experiência, tal como é feito para todas as atividades, o protocolo foi lido com atenção, de forma a, não só saber o que fazer do ponto de vista funcional, mas, sobretudo, para obter um conhecimento mais aprofundado sobre o fenómeno físico em estudo e criar uma base sólida para, posteriormente, analisar criticamente os resultados obtidos.

Criou-se uma folha de cálculo de Excel para registo dos dados, contendo tabelas e gráficos já prontos a utilizar, permitindo, dessa forma, detetar, em tempo real, qualquer tipo de abnormalidade nos resultados, e efetuar as eventuais correções ao circuito ou à execução.

⁴Os valores das incertezas estão indicados graficamente através das barras de erros e encontra-se registados explicitamente nas tabelas, apresentadas em anexo.

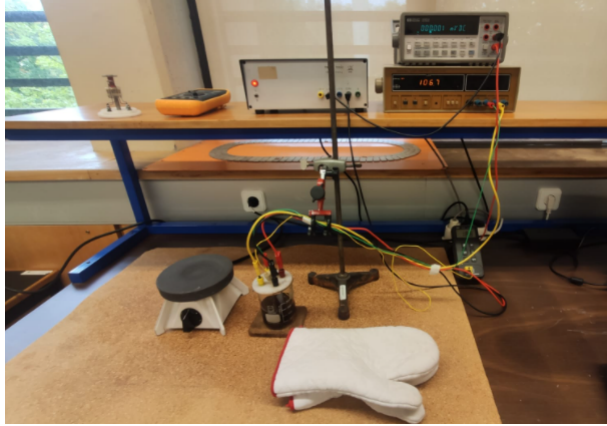


Figure 2: Montagem experimental

Adicionalmente, responderam-se as questões de preparação propostas no protocolo que serão exploradas na análise dos resultados experimentais em ⁵.

3.3.2 Execução

Primeiramente, realizou-se uma inspeção cuidadosa de todos os materiais a usar na experiência, dando particular atenção aos aparelhos de medição e às escalas dos mesmos. Nestes processo, detetou-se que um dos cabos de ligação estava danificado, contudo não parecia afetar a sua funcionalidade sendo o dano puramente estético.

Procedeu-se à montagem do aparato experimental com descrito na secção 3.2.

Começou-se a recolha de valores por volta das 9 : 00 horas registrando-se a temperatura ambiente do óleo como sendo de $17^{\circ}C$ ⁶. A partir desse momento, registaram-se valores de R_{Metal} e I_{Diodo} de 2 em 2 graus Celsius, passando esta recolha a ser de 1 em 1 para valores elevados de T no aquecimento, e valores baixos desta mesma grandeza no arrefecimento, em ambos os casos devido ao longo tempo de espera entre a variação de $1^{\circ}C$. Durante o aquecimento, a fonte térmica esteve no seu menor grau de aquecimento possível, para a subida da temperatura ser gradual.

É de referir que, num período inicial, uma interação com um dos docentes tornou difícil o registo de valores, havendo, por isso, uma lacuna de aproximadamente $10^{\circ}C$ (entre os 19° e $29^{\circ}C$) nos dados obtidos. Logo após o início do processo de arrefecimento (Temperaturas entre os $90^{\circ}C$ e $95^{\circ}C$), ocorreram algumas flutuações térmicas no óleo e, consequentemente, flutuações nos valores registados de R_{Metal} .

⁵As respostas às perguntas podem ser consultadas na íntegra no logbook

⁶Note-se que, no final da experiência, a temperatura ambiente tinha subido para os $21^{\circ}C$, algo relevante para a análise de resultados.

Por outro lado, um facto que persistiu por toda a experiência foi a elevada incerteza do âmpérimetro usado. Para valores baixo da temperatura, a incerteza do aparelho oscilava entre os $\pm 8 \times 10^{-5} \mu A$ e os $\pm 10^{-4} \mu A$, oscilação esta que só ficou dentro da esperada, $\pm 10^{-5} \mu A$, quando o crescimento da corrente se tornou exponencial por volta dos $70^\circ C$, voltando a oscilar entre os $\pm 2 \times 10^{-5} \mu A$ e os $\pm 4 \times 10^{-5} \mu A$ perto dos valores mais altos da temperatura registados, por volta dos $88^\circ C$. Existe também a suspeita que este aparelho esteja mal calibrado pois, para valores baixos da temperatura, obtiveram-se valores negativos de corrente, algo que não aparenta ter sentido, uma vez que, para tais valores térmicos, a corrente do circuito seria, em teoria, nula.

Uma vez que a experiência consiste somente em registar valores durante o aquecimento do aparato experimental, para além destas duas observações, não ocorreram incidentes de maior na realização da mesma.

4 Resultados experimentais

4.1 Exposição de resultados

Nesta secção serão apresentados os valores obtidos para a I_{Diodo} e R_{Metal} em função da temperatura, para o processo de aquecimento e de arrefecimento. Escolheu-se apresentar os dados de ambas as grandezas num mesmo gráfico, de forma a permitir uma comparação visual imediata entre os dois regimes experimentais. As tabelas com os valores obtidos encontram-se em 7.

No gráfico 3 verifica-se visualmente o esperado, temos um aumento linear da resistência com a temperatura. É de notar uma diferença marcada na ordenada da origem das duas linearizações feitas, análise deste facto, bem como uma discussão detalhada do declive e outros detalhes, será feita na secção seguinte.

No gráfico 4 temos também o comportamento esperado, ou seja, um crescimento exponencial a partir de uma dada temperatura. No entanto, como já referido, os valores têm uma incerteza muito grande (como se pode ver pelas barras de erro) e para valores baixos da temperatura verificamos correntes negativas para ambos os processos, algo que não faz sentido fisicamente e, por conseguinte, serão excluídos na análise dos dados.

4.2 Discussão de resultados

Com vista a fazer uma análise apropriada dos resultados experimentais, realizou-se um tratamento aos dados obtidos, que são descritos nas respetivas subsecções.

4.2.1 Resistitidade em função da temperatura

Relativamente aos valores da resistência do metal em função da temperatura, ilustrados em 3, decidiu-se normalizar os valores relativamente à temperatura ambiente R_0 , que nada mais é que a resistência do metal em uso à temperatura ambiente, T_0 . É importante notar que, durante o aquecimento, tomou-se $R_0 = (105,9 \pm 0,1)\Omega$ e, posteriormente, durante o arrefecimento, tomou-se

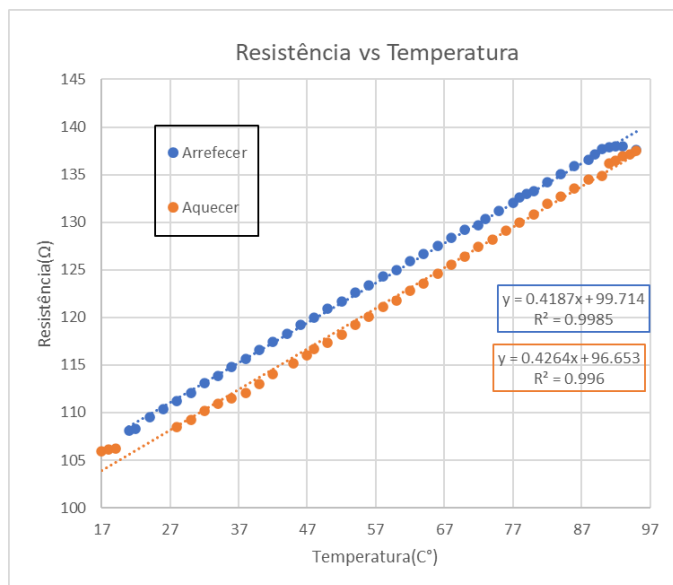


Figure 3: Resistência do metal em função da temperatura

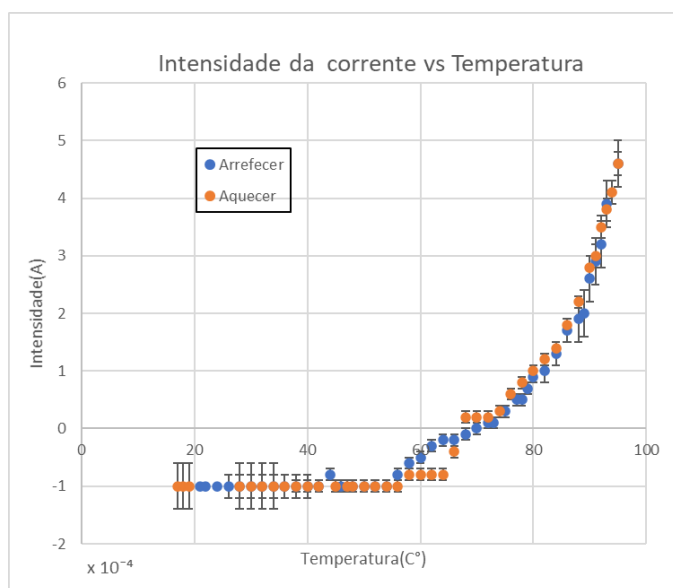


Figure 4: Intensidade da corrente do diodo em função da temperatura

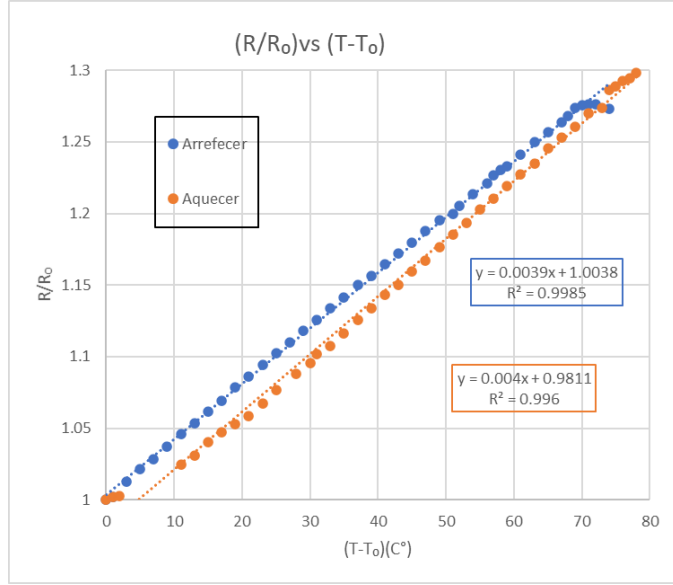


Figure 5: Normalização da resistência do metal em função da temperatura

$R_0 = (108, 1 \pm 0, 1)\Omega$ devido à variação da temperatura ambiente do laboratório, como referido em 3.3.2.

Assim, a equação 1 foi normalizada da seguinte forma⁷:

$$\frac{R(T)}{R_0} = 1 + \alpha(T - T_0) \quad (4)$$

Esta normalização tem um propósito duplo, por um lado, permite ter outro parâmetro de avaliação da qualidade dos resultados, a proximidade do valor da ordenada na origem ao valor teórico de 1 e, por outro lado, evita a necessidade de fazer cálculos de conversão, pois a vasta maioria das fontes com valores tabelados estão normalizados precisamente desta forma, para uma temperatura ambiente de $T_0 = 20^\circ C$.

Apresentam-se, assim, o gráfico contendo os dois conjuntos de valores em simultâneo com a normalização aplicada. No eixo das abscissas temos, então, $(T - T_0)$ e nas ordenadas $\frac{R}{R_0}$.

Imediatamente, verificamos que, tal como em 3, há uma diferença notável entre as ordenas na origem entre o processo de arrefecimento e aquecimento, certa de 0,023, valor duas ordens de grandeza maior que a incerteza calculada para ambos os ajustes. Contudo, analisando estes valores de incerteza, $\pm 0,002$ e $\pm 0,001$, para o aquecimento e arrefecimento respetivamente, verificamos que são, em percentagem, muito pequenos relativamente à ordem de grandeza dos valores de b obtidos, estando esta claramente subestimada. Se assumirmos uma

⁷Escolheu-se alterar a notação usada na equação 1 por uma questão de coerência com aquela usada nos gráficos e no protocolo, isto é, $R(T) \equiv \rho(T)$.

| | | | | | | | |
|------------|--------------------|--------|------------|------------|--------------------|--------|------------|
| m | 0.00403 | 0.981 | b | m | 0.00387 | 1.004 | b |
| Δm | 4×10^{-5} | 0.002 | Δb | Δm | 2×10^{-5} | 0.001 | Δb |
| R^2 | 0.9960 | 0.0061 | Δy | R^2 | 0.9984 | 0.0035 | Δy |

(a) Resumo dos parâmetros de ajuste do gráfico 5 para o aquecimento

incerteza de uma ordem de grandeza superior, verificamos que ambos os valores estão de acordo com o esperado teoricamente, 1. É razoável assumirmos uma incerteza maior pois, esta experiência tem um erro sistemático associado muito grande, dado que a temperatura do metal em estudo é tida como a temperatura do óleo, que por sua vez é tida como uniforme por todo o volume, ora, estas aproximações são muito grosseiras relativamente ao que de facto se verifica fisicamente. Conversamente, estas aproximações explicam também o porquê de os declives não coincidirem dentro das respetivas incertezas.

Por outro lado, verificamos, também, haver um comportamento não linear para valores altos de temperatura, no arrefecimento. Estes resultados são devido a um erro de execução experimental. Na verdade, quando se removeu o circuito da fonte de calor, este, por lapso, foi colocada diretamente na bancada, e não no suporte indicado, isto causou oscilações da temperatura registadas pelo sensor, que rapidamente estabilizaram. Podemos ver, também, uma gama de temperaturas em que não temos valores durante o aquecimento, cuja causa foi explicada em 3.3.2. Esta lacuna não aparenta ter um impacto significativo no declive do ajuste, e foi, consequentemente, ignorada.

Por fim, apresentamos os valores obtidos para o coeficiente de variação térmica, que, devido à normalização feita, correspondem, simplesmente, aos declives dos ajustes lineares do gráfico 5:

| | |
|--------------------------|---|
| $\alpha_{Aquecimento}$ | $(4.03 \pm 0.04) \times 10^{-3} K^{-1}$ |
| $\alpha_{Arrefecimento}$ | $(3.87 \pm 0.02) \times 10^{-3} K^{-1}$ |

Dentro desta gama de valores temos vários metais possíveis: Zinco (**Zn**, $\alpha = 0,00370$), Prata (**Au**, $\alpha = 0,00380$), Cobre (**Cu**, $\alpha = 0,00386$), ou Platina (**Pt**, $\alpha = 0,00392$) entre outros. Estes valores de referência são determinados para uma temperatura ambiente $20^\circ C$, assim, se tomarmos $\alpha_{Arrefecimento}$, onde a temperatura ambiente é próxima desse valor, podemos supor que o metal usado seja o cobre como, aliás, já tinha sido sugerido por um dos docentes.

4.2.2 Corrente em função da Temperatura

Para a análise dos dados relativos à corrente do díodo procedeu-se a uma linearização do gráfico 4, para, deste modo, se poder determinar o valor da banda proibida, Δ . Deste modo, linearizou-se a equação 3, tal que:

$$\ln [I(T)] = -\frac{\Delta}{K_B T} + \ln(A) \quad (5)$$

Como referido na subsecção 4.1, foram excluídos os valores negativos de corrente registados para temperaturas baixas, não só por, provavelmente, serem resultado de uma má calibração do aparelho de medição, mas, também, porque

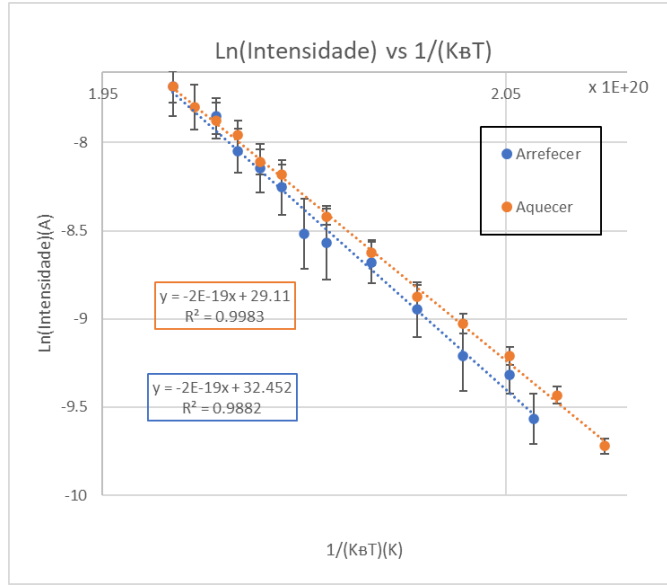


Figure 6: Linearização da intensidade da corrente do díodo em função da temperatura (com valores negativos excluídos)

| | | | | | | | |
|------------|-------------------------|--------|------------|------------|-------------------------|--------|------------|
| m | -1.87×10^{-19} | 29 | b | m | -2.25×10^{-19} | 37 | b |
| Δm | 2×10^{-21} | 1 | Δb | Δm | 8×10^{-21} | 2 | Δb |
| R^2 | 0.9983 | 0.0289 | Δy | R^2 | 0.9837 | 0.1097 | Δy |

(a) Resumo dos parâmetros de ajuste do gráfico 6 para o aquecimento

só estamos interessados no comportamento da corrente quando esta entra em crescimento exponencial, o que só ocorre para temperaturas a partir dos $\approx 70^\circ C$.

De notar que a incerteza dos valores obtidos é bastante elevada, em particular para o processo de arrefecimento, como se pode ver pelas barras de erro. A diferença entre os declives obtidos nos parâmetros de ajuste pode ser explicada devido a este fator, juntamente com os erros sistemáticos explorados na análise feita em 4.2.1

Por fim, apresentamos os valores obtidos para a banda proibida, já convertidos para eV^8 , unidade usual mais usual:

| | |
|--------------------------|---------------------|
| $\Delta_{Aquecimento}$ | $(1.17 \pm 0.01)eV$ |
| $\Delta_{Arrefecimento}$ | $(1.41 \pm 0.05)eV$ |

Fazendo uma inspeção à literatura e tabelas de valor de referência, verificou-se que é usual usar $E_g = \frac{\Delta}{2}$ para o valor da banda proibida, assim sendo, e com vista a tentar identificar o tipo de díodo usado, apresentam-se também os valores usando essa convenção:

⁸Também se tomou o valor positivo para Δ , dado que o sinal $-$, surge somente devido à fórmula usada.

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| $E_{g-Aquecimento}$ | $(0.584 \pm 0.005)eV$ |
| $E_{g-Arrefecimento}$ | $(0.70 \pm 0.03)eV$ |

Dentro da gama de valores obtidos para E_g , encontramos diversos semicondutores candidatos, tais como: Germânio (**Ge**, $E_g = 0,67eV$), Nitreto de índio (**InN**, $E_g = 0,7eV$) e Antimoneto de gálio, (**GaSb**, $E_g = 0,726eV$). Dado que estes valores são, também, obtidos a $20^\circ C$ e considerando a generalidade de díodos usualmente usados no laboratório assumimos o material tratar-se do Germânio.

5 Conclusão

Pode-se, com confiança, afirmar que os objetivos propostos foram cumpridos com sucesso.

Foi possível fazer um estudo da resistividade de metais, verificando a dependência com a temperatura prevista teoricamente, reproduzindo-se as curvas experimentais esperadas.

Foram determinados dois valores distintos para o coeficiente de resistividade térmica, $\alpha_{Aquecimento} = [(4.03 \pm 0.04) \times 10^{-3}] K^{-1}$ e $\alpha_{Arrefecimento} = [(3.87 \pm 0.02) \times 10^{-3}] K^{-1}$, com uma percentagem de incerteza de 1% e 0,5% respetivamente, supondo-se o metal usado o cobre.

Determinaram-se, também, dois valores para a banda proibida, $\Delta_{Aquecimento} = (1.17 \pm 0.01)eV$ e $\Delta_{Arrefecimento} = (1.41 \pm 0.05)eV$, com uma percentagem de incerteza de 3,6% e 0,9% respetivamente, supondo-se o material constituinte do díodo usado o Germânio.

6 Referências

1. Laboratório de Física III, Protocolo Atividade 1, Identificação de Metal e de Semicondutor a partir do comportamento térmico (2020/2021)
2. Resistivity and Temperature Coefficient at 20 C (Visualizado e informação retirada dia 1/11/2020 às 7:38)
3. Wikipedia-Band gap (Visualizado e informação retirada dia 1/11/2020 às 8:40)
4. Smithells, C. J.; *Metals Reference Book*, 7ª edição, Butterworth-Heinman, 1998.

7 Anexos

7.1 Fórmula da incerteza

Fórmula para o cálculo da incerteza de uma equação genérica:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Temos que a propagação de y é dada por:

$$\Delta y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \Delta x_n^2$$

Aplicou-se esta equação as diferentes expressões no relatório, para determinar as incertezas apresentadas.

7.2 Dados experimentais

Neste secção apresentam-se os valores usados para criar as representações gráficas para as diferentes grandezas estudadas:

| $(T \pm 1)C^\circ$ | $(R_{Metal} \pm 0, 1)\Omega$ | $(I_{diodo})mA$ | Incerteza de I_{diodo} |
|--------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------|
| 17 | 105.9 | -0.0001 | 0.00008 |
| 18 | 106.1 | -0.0001 | 0.00008 |
| 19 | 106.2 | -0.0001 | 0.00008 |
| 28 | 108.5 | -0.0001 | 0.00008 |
| 30 | 109.2 | -0.0001 | 0.00008 |
| 32 | 110.2 | -0.0001 | 0.00008 |
| 34 | 110.9 | -0.0001 | 0.00008 |
| 36 | 111.5 | -0.0001 | 0.00004 |
| 38 | 112.1 | -0.0001 | 0.00004 |
| 40 | 113 | -0.0001 | 0.00004 |
| 42 | 114 | -0.0001 | 0.00002 |
| 45 | 115.2 | -0.0001 | 0.00002 |
| 47 | 116 | -0.0001 | 0.00002 |
| 48 | 116.7 | -0.0001 | 0.00002 |
| 50 | 117.3 | -0.0001 | 0.00002 |
| 52 | 118.2 | -0.0001 | 0.00002 |
| 54 | 119.2 | -0.0001 | 0.00002 |
| 56 | 120.1 | -0.0001 | 0.00002 |
| 58 | 121.1 | -0.00008 | 0.00002 |
| 60 | 121.8 | -0.00008 | 0.00002 |
| 62 | 122.8 | -0.00008 | 0.00002 |
| 64 | 123.6 | -0.00008 | 0.00002 |
| 66 | 124.6 | -0.00004 | 0.00002 |
| 68 | 125.5 | 0.00002 | 0.00002 |
| 70 | 126.4 | 0.00002 | 0.00002 |
| 72 | 127.4 | 0.00002 | 0.00002 |
| 74 | 128.2 | 0.00003 | 0.00002 |
| 76 | 129.1 | 0.00006 | 0.00002 |
| 78 | 130 | 0.00008 | 0.00002 |
| 80 | 130.8 | 0.0001 | 0.00002 |
| 82 | 131.9 | 0.00012 | 0.00002 |
| 84 | 132.7 | 0.00014 | 0.00002 |
| 86 | 133.5 | 0.00018 | 0.00002 |
| 88 | 134.5 | 0.00022 | 0.00002 |
| 90 | 134.9 | 0.00028 | 0.00004 |
| 91 | 136.2 | 0.0003 | 0.00004 |
| 92 | 136.5 | 0.00035 | 0.00004 |
| 93 | 136.9 | 0.00038 | 0.00004 |
| 94 | 137.1 | 0.00041 | 0.00004 |
| 95 | 137.1 | 0.00046 | 0.00004 |

Tabela 2: Registo dos valores de T , R_{Metal} e I_{Diodo} para o aquecimento

| $(T \pm 1)C^\circ$ | $(R_{Metal} \pm 0.1)\Omega$ | $(I_{Diodo})mA$ | Incerteza de I_{diodo} |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------|
| 95 | 137.6 | 0.00046 | 0.00008 |
| 93 | 138 | 0.00039 | 0.00008 |
| 92 | 138 | 0.00032 | 0.00008 |
| 91 | 137.9 | 0.00029 | 0.00008 |
| 90 | 137.7 | 0.00026 | 0.00008 |
| 89 | 137.1 | 0.0002 | 0.00008 |
| 88 | 136.6 | 0.00019 | 0.00008 |
| 86 | 135.9 | 0.00017 | 0.00004 |
| 84 | 135.1 | 0.00013 | 0.00004 |
| 82 | 134.2 | 0.0001 | 0.00004 |
| 80 | 133.3 | 0.00009 | 0.00002 |
| 79 | 133 | 0.00007 | 0.00002 |
| 78 | 132.6 | 0.00005 | 0.00002 |
| 77 | 132 | 0.00005 | 0.00002 |
| 75 | 131.2 | 0.00003 | 0.00002 |
| 73 | 130.3 | 0.00001 | 0.00002 |
| 72 | 129.7 | 0.00001 | 0.00002 |
| 70 | 129.2 | 0 | 0.00002 |
| 68 | 128.4 | -0.00001 | 0.00002 |
| 66 | 127.5 | -0.00002 | 0.00002 |
| 64 | 126.7 | -0.00002 | 0.00002 |
| 62 | 125.9 | -0.00003 | 0.00002 |
| 60 | 125 | -0.00005 | 0.00002 |
| 58 | 124.3 | -0.00006 | 0.00002 |
| 56 | 123.4 | -0.00008 | 0.00002 |
| 54 | 122.6 | -0.0001 | 0.00002 |
| 52 | 121.7 | -0.0001 | 0.00002 |
| 50 | 120.9 | -0.0001 | 0.00002 |
| 48 | 120 | -0.0001 | 0.00002 |
| 46 | 119.2 | -0.0001 | 0.00002 |
| 44 | 118.3 | -0.00008 | 0.00002 |
| 42 | 117.4 | -0.0001 | 0.00002 |
| 40 | 116.6 | -0.0001 | 0.00002 |
| 38 | 115.6 | -0.0001 | 0.00002 |
| 36 | 114.8 | -0.0001 | 0.00004 |
| 34 | 113.9 | -0.0001 | 0.00004 |
| 32 | 113.1 | -0.0001 | 0.00004 |
| 30 | 112.1 | -0.0001 | 0.00004 |
| 28 | 111.2 | -0.0001 | 0.00004 |
| 26 | 110.4 | -0.0001 | 0.00004 |
| 24 | 109.5 | -0.0001 | 0.00002 |
| 22 | 108.3 | -0.0001 | 0.00002 |
| 21 | 108.1 | -0.0001 | 0.00002 |

Tabela 3: Registo dos valores de T , R_{Metal} e I_{Diodo} para o arrefecimento

| $(T \pm 1)C^{\circ}$ | $(\ln(I_{Diodo}))\text{mA}$ | Incerteza de $(\ln(I_{Diodo}))$ |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 2.12311E+20 | -10.81977828 | 0.5 |
| 2.11073E+20 | -10.81977828 | 0.5 |
| 2.0985E+20 | -10.81977828 | 0.5 |
| 2.08641E+20 | -10.41431318 | 0.3 |
| 2.07446E+20 | -9.721165996 | 0.2 |
| 2.06264E+20 | -9.433483923 | 0.1 |
| 2.05096E+20 | -9.210340372 | 0.1 |
| 2.03941E+20 | -9.028018815 | 0.08 |
| 2.02799E+20 | -8.873868135 | 0.07 |
| 2.0167E+20 | -8.622553707 | 0.06 |
| 2.00553E+20 | -8.421883012 | 0.05 |
| 1.99449E+20 | -8.180720955 | 0.07 |
| 1.98901E+20 | -8.111728083 | 0.07 |
| 1.98356E+20 | -7.957577403 | 0.06 |
| 1.97814E+20 | -7.875339305 | 0.05 |
| 1.97276E+20 | -7.799353398 | 0.05 |
| 1.9674E+20 | -7.684284068 | 0.04 |

Tabela 4: Registo dos valores da linearização de I_{Diodo} e de T para o aquecimento

| $(T \pm 1)C^{\circ}$ | $(\ln(I_{Diodo}))\text{mA}$ | Incerteza de $(\ln(I_{Diodo}))$ |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1.9674E+20 | -7.684284068 | 0.09 |
| 1.97814E+20 | -7.849363819 | 0.1 |
| 1.98356E+20 | -8.047189562 | 0.1 |
| 1.98901E+20 | -8.145629635 | 0.1 |
| 1.99449E+20 | -8.254828927 | 0.2 |
| 1.99999E+20 | -8.517193191 | 0.2 |
| 2.00553E+20 | -8.568486486 | 0.2 |
| 2.0167E+20 | -8.679712121 | 0.1 |
| 2.02799E+20 | -8.947976108 | 0.2 |
| 2.03941E+20 | -9.210340372 | 0.2 |
| 2.05096E+20 | -9.315700888 | 0.1 |
| 2.05679E+20 | -9.567015316 | 0.1 |
| 2.06264E+20 | -9.903487553 | 0.2 |
| 2.06853E+20 | -9.903487553 | 0.2 |
| 2.08042E+20 | -10.41431318 | 0.3 |
| 2.09244E+20 | -11.51292546 | 1 |
| 2.0985E+20 | -11.51292546 | 1 |

Tabela 5: Registo dos valores da linearização de I_{Diodo} e de T para o arrefecimento