

Identificação de Metal e de Semicondutor a partir do comportamento térmico

Laboratórios de Física 3 / DFA@FCUP

Conteúdo

1	Objetivos	2
2	Introdução	2
2.1	Metais	2
2.2	Banda proibida característica de um semicondutor	3
2.3	Medida de pequenas resistências com o medidor LCR	4
2.4	Medidas de temperatura	4
3	Preparação do Trabalho	6
4	Execução do trabalho	6
4.1	Montagem	6
4.2	Material	6
4.3	Procedimento Experimental	7
5	Questões:	8

1 Objetivos

Com este trabalho pretende-se:

- Estudar a dependência da resistividade de metais com a temperatura.
- Determinar o valor do coeficiente de variação relativa com a temperatura para um condutor metálico.
- Determinar o valor da largura da banda proibida de um semicondutor.
- Familiarização com técnicas de medida AC

2 Introdução

2.1 Metais

De acordo com o modelo de Drude, a condutividade elétrica DC de um metal é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{Ne^2\tau}{m} \quad (1)$$

sendo N a densidade volúmica de eletrões, e a carga elementar, m a massa do eletrão e τ o tempo de relaxação ou tempo médio entre colisões.

Num metal, a densidade volúmica de eletrões é pouco sensível às condições externas, tais como temperatura, e a condutividade depende sobretudo do tempo de relaxação, este sim dependente da temperatura. Experimentalmente verifica-se que, em metais simples como o Cu, Au, Ag, a resistividade elétrica ρ a altas temperaturas (normalmente acima de 100 K) aumenta linearmente com a temperatura, devido ao efeito das vibrações dos átomos da rede cristalina, diminuindo o tempo de relaxação. Para uma gama de temperaturas próxima de uma temperatura de referência T_0 (p. ex. a temperatura ambiente), pode-se escrever

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

onde ρ_0 é a resistividade à temperatura T_0 e α é o coeficiente de variação relativa com a temperatura.

Nos metais, os eletrões de valência movem-se facilmente e o número de portadores de carga N é grande. A resistividade em metais é dependente da mobilidade dos eletrões ($\mu = e\tau/m$). Para uma rede perfeita, os eletrões são acelerados por um campo elétrico com facilidade. Mesmo em materiais puros, as oscilações térmicas dos átomos afetam o movimento dos eletrões de condução, aumentando ligeiramente a resistividade. No entanto, materiais com impurezas, defeitos como deslocações, fronteiras de grão ou lacunas atômicas irão aumentar ainda mais a resistência a esses eletrões. O efeito combinado da parte térmica, impureza e defeitos na resistividade é dado pela regra de Matthiessen. Onde vem que :

$$\rho_{total} = \rho_{térmico} + \rho_{impurezas} + \rho_{defeitos} \quad (3)$$

Para elementos puros, a contribuição dos defeitos é da ordem de 0,1% do total, podendo chegar a 5% no caso de metais preparados sem tratamentos térmicos.

2.2 Banda proibida característica de um semiconductor

O díodo é o dispositivo electrónico obtido pela junção física de dois semicondutores de diferentes dopagens, um de tipo-n e outro de tipo-p.

Quando o díodo é polarizado com uma tensão positiva aplicada no lado da dopagem-n, polarização dita inversa, os eletrões do lado **n** e as lacunas do lado **p** serão afastados da região da junção, ver fig. 1, formando uma zona de depleção (de cargas) de espessura da ordem de 1 μm . Assim, em polarização inversa, o díodo não permite a passagem de correntes elétricas.

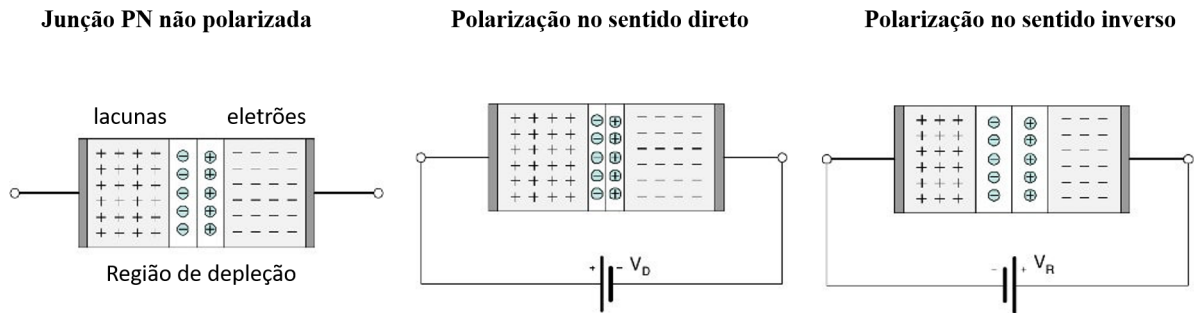


Figura 1: Esquema do mecanismo de funcionamento de uma junção p-n

No entanto, existe uma corrente em polarização inversa de muito baixa intensidade, da ordem de μA , devida a eletrões do lado **p** e lacunas no lado **n** que, por excitação térmica, conseguem saltar para a banda de condução do semiconductor. Este processo é mediado pela relação entre a energia térmica disponível no material, e a banda proibida (*band gap*) característica do semiconductor. Sendo a excitação térmica regida por uma distribuição de Maxwell-Boltzmann, é de esperar que a corrente em polarização inversa dependa fortemente de T , segundo essa mesma distribuição, na forma:

$$I = A \exp \left[-\frac{\Delta}{(k_B T)} \right] \quad (4)$$

em que A é uma constante, e Δ a energia correspondente à banda proibida do material. Note que o valor desta corrente não depende do valor da tensão inversa aplicada, mas a polarização é essencial para garantir a não passagem de outras componentes de corrente pela junção.

Assim, a medida da dependência da corrente inversa de um díodo com a temperatura permite determinar a largura da banda proibida característica do semiconductor. As correções a esta expressão simplificada dependerão sobretudo da taxa de dopagem do semiconductor, como pode verificar no livro de Ashcroft e Mermin [3, Cap.28].

2.3 Medida de pequenas resistências com o medidor LCR

Estamos mais que habituados a medir resistências com multímetros, instrumentos que se baseiam na injeção de correntes contínuas conhecidas e na consequente medida da diferença de potencial que se estabelece aos terminais do circuito resistivo a medir. Sabemos também que este método tem de ser cautelosamente aplicado quando a resistência a medir é muito baixa, de forma a que a resistência dos contactos da amostra não comprometa ou mascare a resistência a medir.

Quando se trabalha com sinais oscilatórios o comportamento activo dos componentes e circuitos é caracterizado de forma global pela sua impedância Z , definida como

$$Z = R + jX,$$

em que R é a sua resistência característica, responsável pela resposta passiva (em fase!), e X é a reactância do circuito, traduzindo a resposta dinâmica do circuito, e dependente das suas características activas (capacitivas e/ou indutivas), sendo

$$X = X_C + X_L = -\frac{1}{\omega C} + \omega L,$$

notando-se que $X_C < 0$ e $X_L > 0$.

O instrumento designado como LCR mede, como o seu nome indica, capacidades (tipicamente entre μF e pF), indutâncias (μH – mH) e/ou resistências (Ω – $\text{k}\Omega$). O instrumento tem dois indicadores de medida, devidamente assinalados. A necessidade de um segundo mostrador está relacionada com as medidas de reactância, as quais têm associado um factor de performance, conhecido como o factor de dissipação D , definido como:

$$D = \frac{\Re\{Z\}}{\Im\{Z\}} = \frac{R}{X}$$

O factor D , adimensional, é comum na caracterização de circuitos capacitivos. Já em circuitos indutivos utiliza-se o factor $Q = D^{-1}$. Estes factores caracterizam a pureza do componente medido. A medida de D permite verificar se um condensador se encontra em bom estado. Note que um D muito elevado implica que $R \gg Z_C$, o que indica que o seu comportamento é maioritariamente resistivo, logo que ele não se encontra em bom estado. Já no caso do factor Q calculado para as indutâncias, apenas nos permite distinguir diferentes desempenhos de indutores em circuitos.

Para mais informações, pode consultar a ref [6].

2.4 Medidas de temperatura

- termopares (nesta experiência): junção entre dois metais diferentes (efeito termoelétrico de Seebeck, e seu inverso (de Peltier))
- termistores: semicondutores, resistência variável com temperatura
- bolómetros/termopilhas

Referências

- [1] Feynman, Leighton e Sands, "The Feynman Lectures on Physics" vol. 3, Addison-Wesley Longman, 1970.
- [2] Charles Kittel, "Introduction to Solid State Physics" 8th edition, cap. 8, Wiley, 2004.
- [3] Neil W. Ashcroft, N. David Mermin, "Solid State Physics", caps. 28 e 29, Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [4] C. J. Smithells, "Metals Reference Book" 8th edition, Elsevier, 2004.
- [5] John Wulff: "The Structure and Properties of Materials", Wiley, 1964.
- [6] https://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf

3 Preparação do Trabalho

1. É muito importante que tenha noção da dinâmica temporal de processos que envolvem controlo de temperatura. A condução e dissipação térmica são processos com características temporais distintas! Em particular, a dissipação de calor nos materiais é um processo lento, fortemente dependente das características dos materiais e das suas dimensões.
 - a) No caso de medidas com variação de temperatura, a temperatura da amostra deverá variar lenta ou rapidamente? que considerações devem ser tidas em conta para definir o ponto de medida de temperatura face à distribuição do campo de temperaturas na amostra? como garantir condições óptimas de medida? o meio envolvente deve ser um rápido ou lento dissipador de calor (qual o impacto na medida)?
 - b) Proponha um modelo físico simples que descreva a evolução temporal da temperatura de um pequeno volume, inicialmente à temperatura T_0 , que é imerso num banho térmico à temperatura T . Identifique mecanismos de trocas de energia térmica entre volumes e assuma que conhece as constantes que regem esses mecanismos.
 - c) Que cuidados irá adoptar na execução experimental do estudo de variações **com a temperatura** para que:
 - i. impeça danos nas amostras por exposição a calor excessivo
 - ii. garantir a fiabilidade das medidas «térmicas».
2. Identifique o princípio de funcionamento de um instrumento de medida LCR (indutância, capacitância e resistências).
3. Identifique técnicas/instrumentos para medida da temperatura, e em particular, como funciona um termopar (efeito termoeléctrico).
4. Estimar o valor esperado para a resistência à temperatura ambiente para um fio de cobre com 1 mm de espessura, 10 cm de comprimento; reflita sobre valores de corrente vs tensão que são necessários para medir este fio com um multímetro de bancada, tendo em conta que a sensibilidade do voltímetro será da ordem de 1 mV.
5. Perceber o conceito de banda proibida.

4 Execução do trabalho

4.1 Montagem

Na figura 2 encontra-se um esquema da montagem experimental.

4.2 Material

- Gobelé

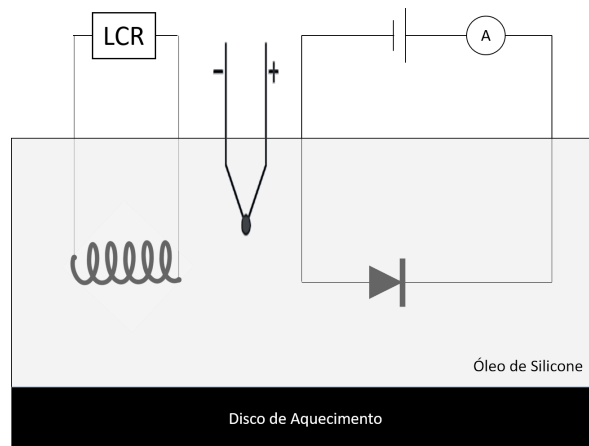


Figura 2: Esquema da montagem

- Óleo de silicone
- ponte de resistência em corrente alternada (LCR meter), funcionando como um ohmímetro a ≈ 1 kHz.
- Fonte de tensão polarizada DC com ± 15 V;
- Multímetro
- Termómetro digital
- montagem experimental constituída por um enrolamento de fio metálico e um diodo semicondutor mergulhados em óleo de silicone.
- Placa de aquecimento

4.3 Procedimento Experimental

Note que é importante anotar no seu caderino de laboratório todos os passos experimentais e o seu momento de execução, bem como caracterizar de que forma é feito o aquecimento e arrefecimento do gobelé porta-amostras! Tal irá ajudar posteriormente a contextualizar as medidas e os resultados obtidos.

1. Monte o circuito de medida de acordo com a Figura 2 e verifique que os aparelhos se encontram em condições corretas de funcionamento, nomeadamente a respetiva sensibilidade. Verifique o posicionamento da ponta do termopar e a escala do termómetro digital.
2. Estabeleça a polarização inversa do diodo (aplique 15 V).
3. Verifique que os instrumentos estão nas escalas corretas para determinar com precisão os valores da resistência do metal R_{metal} .
4. Comece a aquecer lentamente o óleo e registe, em função da temperatura crescente, os valores de R_{metal} e I_{Diodo} .

5. Quando chegar a cerca de 70 °C, desligue o disco e após algum tempo, sem deixar ultrapassar os 100 °C, retire cuidadosamente recorrendo as pegas térmicas, o gobelé do disco para a placa de cortiça.
6. Registe os agora os valores de R_{metal} e I_{Diodo} em temperaturas decrescentes.
7. Represente convenientemente a variação de R_{metal} e I_{Diodo} com a temperatura, numa ou mais formas gráficas, de modo a verificar as relações esperadas.
8. Analise a concordância entre os valores obtidos em temperaturas crescentes e decrescentes.
9. Faça uma análise dos erros experimentais

5 Questões:

- Qual o interesse em realizar medidas com o LCR meter, em corrente alternada?
- Verificar o comportamento das medidas entre a subida e a descida da temperatura em ambos os casos. Verificou algum tipo de anomalia?
- A partir de valores de referência devidamente identificados, faça as suas previsões para a identificação do semicondutor e do metal.
- Porque razão é utilizado o óleo de silicone?