

Estudo da Junção PN

Ana Sofia Camões de Sousa 96508 | Duarte Miguel de Aguiar Pinto e Morais Marques 96523

Isabel Maria Jaló Alexandre 96537 | Martim da Costa Graça Marques Ferreira 96554

IST | MEFT | Laboratório de Eletromagnetismo e Termodinâmica

Prof^o João Luís Maia Figueirinhas | Prof^a Maria Raquel Nunes Pereira Crespo

Grupo 5C | Ano letivo 2020/2021

27 de maio de 2021

Resumo

Neste trabalho, foi estudado o comportamento de uma junção PN de silício polarizada direta e inversamente, tendo-se considerado dois modelos teóricos distintos. Com base na característica tensão-corrente do díodo, foi possível calcular a energia de *gap* do silício para o modelo mais simples, $E_G = (6.24 \pm 0.08) \times 10^{-20} \text{ J} \approx 0.39 \text{ eV}$, e para o modelo mais complexo, $E_G = (1.46 \pm 0.02) \times 10^{-19} \text{ J} \approx 0.91 \text{ eV}$. Os valores obtidos têm, respetivamente, desvios de 66% e 20% face ao valor esperado de 1.14 eV . Verificou-se que o segundo modelo explicaria melhor o comportamento do díodo, mas, não sendo suficientemente satisfatório, desenvolveu-se um terceiro modelo mais apropriado, tendo em conta uma resistência de *shunt* em paralelo com o díodo ideal.

1 Introdução [2]

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento duma junção PN de silício polarizada, pretendendo-se, nomeadamente, determinar a característica tensão-corrente desta a diversas temperaturas e a sua energia de *gap*, E_G . Serão utilizados, à partida, 2 modelos descritivos do comportamento desta, um mais simples e outro mais complexo. Considerou-se $k_B = 1.38064852 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ (constante de Boltzmann) e $q = 1.60217662 \times 10^{-19} \text{ C}$ (carga elementar) [3].

Semicondutores e Junções PN

Os materiais semicondutores são cristais compostos (sobre-tudo) por elementos do grupo 14 (com 4 eletrões de valência) da tabela periódica caracterizados por terem uma energia de *gap* (diferença entre a energia máxima de um eletrão na banda de valência e a energia mínima de um eletrão na banda de condução) da ordem do eletrão-volt, entre o típico de um isolante e o de um metal. Podem ser de dois tipos: intrínsecos ou extrínsecos. Os semicondutores intrínsecos são aqueles em que todas as lacunas e eletrões livres que existem se devem a quebras de ligações covalentes no material, pelo que a concentração de eletrões livres é igual à de buracos. Os extrínsecos, por sua vez, são semicondutores em que uma destas concentrações é maior do que a outra, sendo este desequilíbrio devido à presença de impurezas na estrutura cristalina, genericamente elementos dos grupos 13 ou 15, que têm menos ou mais um eletrão de valência do que os átomos da rede. Os semicondutores extrínsecos dizem-se mais ou menos dopados consoante a sua concentração de impurezas for maior ou menor. Uma junção PN é um sistema composto por duas secções de dois semicondutores extrínsecos diferentes: um com maior concentração de lacunas do que de eletrões (dito de tipo P) e outro para o qual o inverso seja verdade (dito de tipo N).

Modelo Simples

Polarização direta

Segundo este modelo, o díodo é equivalente a um díodo ideal em série com uma resistência R , sendo a corrente que atravessa o díodo dada por:

$$I = I_S(e^{\frac{qV_D}{\eta k_B T}} - 1) \quad (1)$$

Em que V_D é a tensão na região de transição do díodo e η é um parâmetro do díodo, o fator de idealidade ($\eta \in [1, 2]$). Sabendo que I_S varia com a temperatura de acordo com a expressão 3 e definindo a função b segundo a equação 2, chega-se à expressão 4 para a tensão entre os terminais do modelo da junção PN (Figura 1).

$$b(T) = \frac{\eta k_B T}{q} \quad (2) \quad I_S(T) = aT^3 e^{\frac{-E_G}{k_B T}} \quad (3)$$

$$V = RI + V_D = R(T)I + b(T) \ln \left(\frac{I}{I_S(T)} + 1 \right) \quad (4)$$

Polarização inversa

Como se pode ver na equação 1, se $V_D \ll 0$, tem-se que

$$I \approx -I_S \quad (5)$$

já que $e^{\frac{qV_D}{\eta k_B T}}$ fica muito próximo de 0.

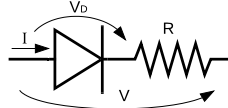


Figura 1: Modelo da junção PN

Modelo Complexo

Polarização direta

Para o modelo mais complexo, considera-se ainda um díodo ideal em série com uma resistência, mas com uma dependência adicional da corrente em I_R , dado por 8, obtendo-se a expressão 9 para a tensão entre os terminais da junção PN.

$$I = I_S(e^{\frac{qV_D}{k_B T}} - 1) + I_R(e^{\frac{qV_D}{2k_B T}} - 1) \quad (6)$$

$$I_S(T) = aT^3 e^{\frac{-E_G}{k_B T}} \quad (7) \quad I_R(T) = bT^{\frac{5}{2}} e^{\frac{-E_G}{2k_B T}} \quad (8)$$

$$V = RI + V_D =$$

$$= R(T)I + \frac{2k_B T}{q} \ln \left(\sqrt{\left(\frac{I_R(T)}{2I_S(T)} \right)^2 + \left(1 + \frac{I_R(T) + I}{I_S(T)} \right)} - \frac{I_R(T)}{2I_S(T)} \right) \quad (9)$$

Polarização inversa

De forma semelhante ao que se verifica no modelo simples, no modelo complexo, quando $V_D \ll 0$, as exponenciais que aparecem na expressão 6 tornam-se muito próximas de 0, pelo que se tem:

$$I \approx -I_S - I_R \quad (10)$$

Variação de R com a temperatura [1][4]

Para metais, a Lei de Wiedemann-Franz estabelece que a condutividade σ do material (a temperaturas "normais") é inversamente proporcional à temperatura ($\sigma \sim \frac{1}{T}$). Sendo a condutividade o inverso da resistividade ρ , a qual, por sua vez, é diretamente proporcional à resistência R , pela Lei de Pouillet ($R = \rho \frac{l}{A}$, sendo l o comprimento e A a área de secção reta do material), tem-se que a resistência nos metais é diretamente proporcional à temperatura. Pelo contrário, para semicondutores intrínsecos (semicondutores "puros", i.e., sem dopagem significativa), a resistividade e, portanto, a resistência elétrica diminui exponencialmente com a temperatura, de acordo com uma expressão da forma $R \sim e^{c/T}$. Por outro lado, para os semicondutores extrínsecos (i.e., dopados), a variação da resistência com a temperatura é mais complexa, começando por diminuir para temperaturas próximas do zero absoluto, devido ao crescente movimento dos portadores de carga. Já na presença de uma grande quantidade de portadores de carga libertados, estes perdem mobilidade e a resistência sobe, comportando-se o material como um metal; para elevadas temperaturas, o comportamento passa a ser semelhante ao de um semicondutor intrínseco. Devido às temperaturas nas quais este trabalho se realizará, dever-se-ão ter em conta as duas últimas situações mencionadas. De forma a se obter um modelo simples que descreva a evolução da resistência com a temperatura, faz-se uma combinação linear dos dois tipos de comportamento, obtendo-se

$$R(T) = aT + be^{\frac{c}{T}} \quad (11)$$

sendo a , b e c constantes associadas ao material e às temperaturas consideradas.

2 Montagem

As montagens utilizadas para estudar os dois tipos de polarização do díodo são bastante semelhantes, como se observa nas Figuras 2 e 3. Ambas as montagens contêm um díodo em contacto com um sistema de aquecimento. Esse sistema

apresenta um sensor de temperatura que permite, a partir da unidade de controlo de temperatura, regular a temperatura do díodo. Em ambas as montagens, o díodo está em série com um conjunto de resistências e com uma fonte de alimentação. Na polarização direta, o díodo está adicionalmente em série com um amperímetro e em paralelo com um voltímetro. Na polarização inversa, estão presentes dois voltímetros, um em paralelo com a fonte de alimentação e outro em paralelo com as resistências.

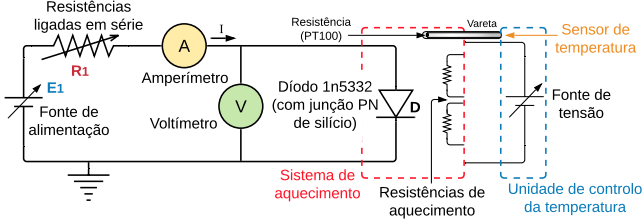


Figura 2: Esquema elétrico e de blocos da montagem experimental para polarização direta do díodo

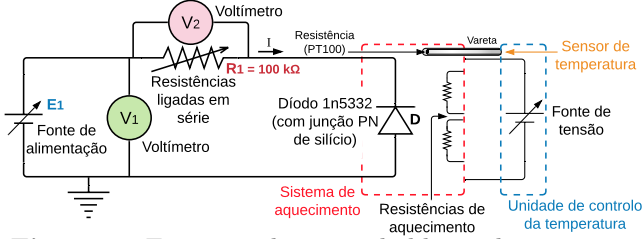


Figura 3: Esquema elétrico e de blocos da montagem experimental para polarização inversa do díodo

3 Procedimento

3.1 Polarização direta

Começou-se por montar o circuito representado na Figura 2. Foi ajustada a temperatura do controlador para $T = 21.4^\circ\text{C}$ e selecionada a resistência $R_1 = 100\text{ k}\Omega$. Após a temperatura atingir o equilíbrio, foi variada a tensão no gerador, registando-se os valores da corrente no amperímetro e da tensão no voltímetro. Foi ainda registada a temperatura em cada medição. Ao todo, foram recolhidos 10 conjuntos de dados. Foram ainda considerados mais três valores para R_1 , sendo estes $20\text{ k}\Omega$, $1\text{ k}\Omega$ e $200\text{ }\Omega$, tendo sido recolhidos 10, 11 e 9 conjuntos de valores, respetivamente.

De seguida, foram selecionadas quatro temperaturas diferentes, superiores à temperatura ambiente, no controlador. Repetiu-se o processo descrito acima para cada temperatura.

3.2 Polarização inversa

Foi montado o circuito representado na Figura 3. A resistência foi fixada a $R_1 = 100\text{ k}\Omega$. Permaneceu fixa no controlador a última temperatura considerada para a polarização direta. Foi então variada a tensão no gerador, registando-se os valores da tensão aos seus terminais e aos terminais das resistências. De seguida, foram selecionadas quatro temperaturas diferentes, de forma decrescente, e próximas às consideradas anteriormente, repetindo-se o processo descrito para cada uma. Foi necessário empregar métodos de arrefecimento que promovessem a circulação de ar e colocar o aparato onde está incluído o díodo numa posição vertical.

4 Dados recolhidos e análise

O valor considerado para cada temperatura corresponde à média dos valores recolhidos, sendo a incerteza o maior desvio a esta ou a resolução do aparelho, 0.1°C , se superior. É importante mencionar que as designações T_d e T_i dizem respeito às temperaturas utilizadas com a polarização direta e inversa do díodo, respetivamente; embora se tenha procurado obter valores iguais, tal não foi possível.

4.1 Polarização direta

Os dados recolhidos foram analisados de forma a determinar os parâmetros R , b e I_S , para o modelo mais simples, e R , I_S e I_R , para o modelo mais complexo, para cada temperatura. Isto foi realizado com recurso às equações 4 e 9, respetivamente. Os resultados encontram-se figurados em 4. De seguida, foram representados os parâmetros em função da temperatura, em 5a e 5b, para o modelo mais simples, e 6a e 6b para o modelo mais complexo, sendo realizados ajustes através das equações 2, 3, 7

e 8, respetivamente. A evolução de R com a temperatura pode ser observada nas Figuras 7a e 7b.

Todos os ajustes apresentados foram realizados no *fitteia*, que utiliza o método dos mínimos quadrados.

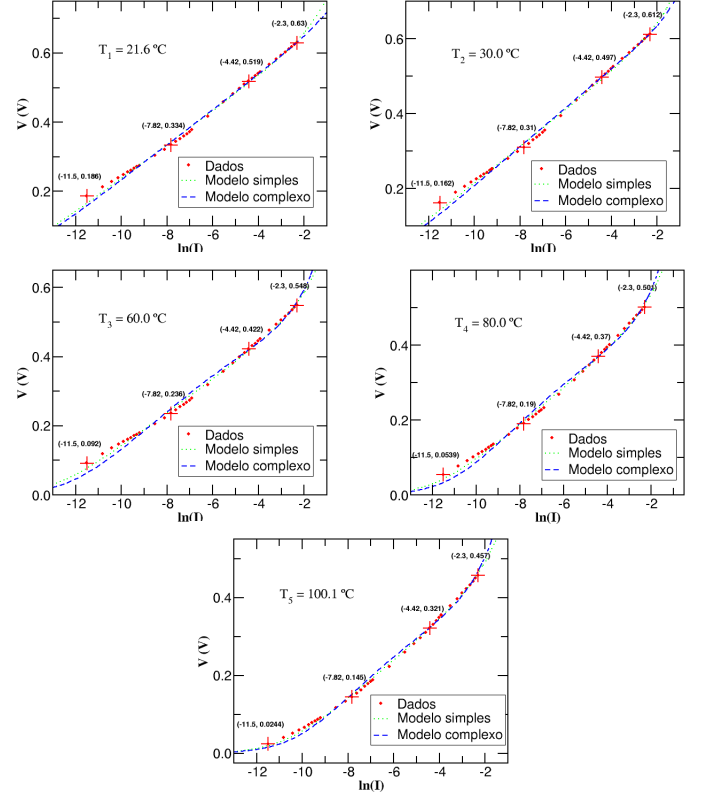


Figura 4: Dados recolhidos e ajustes efetuados para as cinco temperaturas distintas com polarização direta do díodo

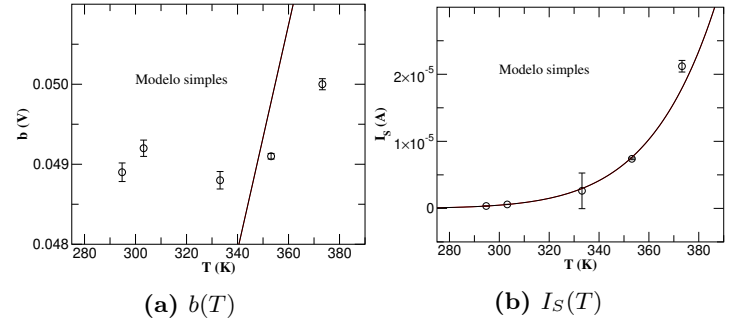


Figura 5: Evolução dos parâmetros b e I_S com a temperatura e ajustes efetuados

Para os ajustes de 5a e 5b, obteve-se $\eta = 1.634 \pm 0.001$, $a = (6 \pm 2) \times 10^{-8}\text{ AK}^{-3}$ e $E_G = (6.24 \pm 0.08) \times 10^{-20}\text{ J} \approx 0.39\text{ eV}$. Observando a Figura 4, verifica-se que ambos os modelos parecem ajustar-se significativamente bem aos dados, sendo até difícil diferenciá-los. No entanto, é óbvio, pelo ajuste da Figura 5a, que o modelo simples não é o mais fidedigno. Tendo em conta que E_G do silício é aproximadamente 1.14 eV às temperaturas consideradas [2], para este modelo tem-se um desvio à exatidão de 66%.

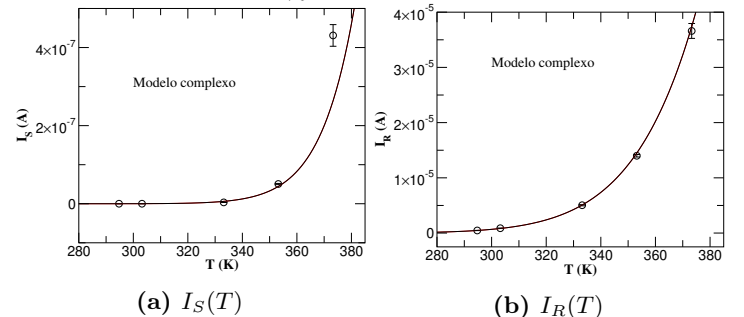


Figura 6: Evolução dos parâmetros I_S e I_R e ajustes efetuados

Para 6a e 6b, obteve-se $a = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-2} \text{ AK}^{-3}$, $b = (2.1 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ AK}^{-\frac{5}{2}}$ e $E_G = (1.46 \pm 0.02) \times 10^{-19} \text{ J} \approx 0.91 \text{ eV}$. Os ajustes para o modelo mais complexo são muito mais precisos, sendo que, neste caso, se obteve um desvio à exatidão significativamente mais baixo, de cerca de 20%, relativamente ao valor de E_G . Apesar deste melhor resultado, o desvio à exatidão é ainda um pouco elevado, o que pode sugerir que mesmo o modelo mais complexo não caracteriza da melhor forma o comportamento do díodo.

4.1.1 Variação da resistência R com a temperatura

Com os valores da resistência da parte neutra do modelo da junção PN, obtidos com o modelo simples e com o modelo complexo, obtiveram-se os *plots* apresentados nas Figuras 7a e 7b. Recorrendo à equação de ajuste 11, foram obtidos os parâmetros apresentados na Tabela 1.

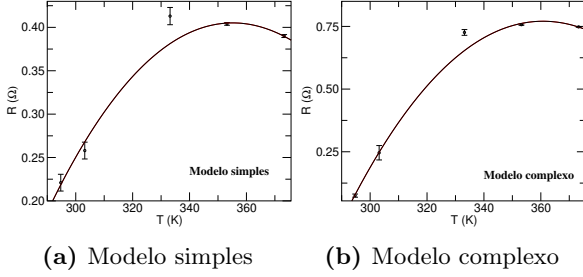


Figura 7: Evolução do valor de R com a temperatura

	Modelo Simples	Modelo Complexo
$a (\times 10^{-2} \Omega K^{-1})$	-3.316 ± 0.004	-1.0584 ± 0.0005
$b (\times 10^1 \Omega)$	3.203 ± 0.004	10.381 ± 0.005
$c (\times 10^2 K)$	-3.434 ± 0.004	-3.536 ± 0.001

Tabela 1: Valores obtidos para os parâmetros de ajuste da equação 11 com ambos os modelos

Tendo em conta os ajustes apresentados acima, verifica-se que a simples equação 11 deduzida anteriormente representa bastante bem a evolução de $R(T)$, o que revelará que a resistência em causa será composta por um material semiconductor extrínseco, com impurezas. O parâmetro c foi muito semelhante para ambos os modelos, embora os valores de a e b sejam ligeiramente diferentes. Nestes ajustes, é clara também a evolução linear do valor da resistência para as menores temperaturas, sendo a influência do comportamento exponencial mais notório para temperaturas superiores.

4.2 Polarização inversa

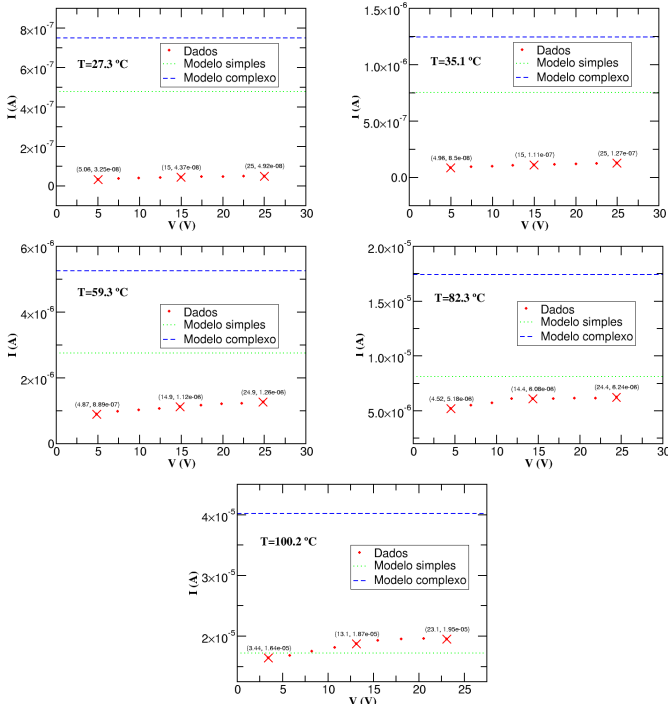


Figura 8: Dados recolhidos e valores teóricos para as diferentes temperaturas da corrente I em função de $V = V_1 - V_2$ com o díodo em polarização inversa

Com recurso aos parâmetros determinados na secção anterior, foram calculados os valores de corrente esperados tendo em conta as equações 5 e 10 e comparados com os valores experimentais, como figura em 8; é importante mencionar, porém, que há que considerar os simétricos dos valores nestas equações, uma vez que, na montagem para a polarização inversa do díodo, a corrente I possui o sentido oposto à corrente que vai do ânodo para o cátodo do díodo, como está representado na Figura 3. Logo, os valores teóricos da corrente I da montagem em 3 são, na verdade, I_S e $I_S + I_R$ para os modelos simples e complexo, respetivamente.

Nestes ajustes, é aparente uma clara discrepância entre os valores esperados e os resultados obtidos, sendo estas diferenças mais significativas para o modelo complexo. No caso do modelo simples, estas discrepâncias são cada vez menores à medida que a temperatura aumenta.

4.2.1 Correção do modelo do díodo

Nos gráficos da Figura 8, facilmente se verifica uma clara discrepância entre os valores medidos e os valores teóricos dos dois modelos considerados. Além disso, fazendo o gráfico dos dados obtidos numa escala adequada (tal como se apresenta na Figura 10), depreende-se que a variação da corrente com a tensão é aproximadamente linear. Tendo isto em conta, propôs-se como alteração simples dos modelos do díodo considerados a introdução de uma resistência de *shunt* em paralelo com o díodo ideal [5], tal como se apresenta na Figura 9 para a polarização inversa do díodo. Analisando esta figura, facilmente se chega à seguinte relação:

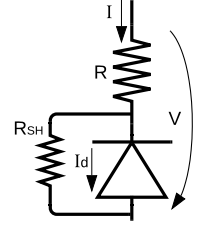


Figura 9: Modelo do díodo alterado

$$V = RI + R_{SH}(I - I_d) \Leftrightarrow I = \frac{R_{SH}I_d + V}{R_{SH} + R} \quad (12)$$

Sendo R_{SH} o valor da resistência de *shunt* e I_d a corrente que atravessa o díodo ideal. Utilizando os valores (V, I) apresentados graficamente na Figura 8, assim como os valores da resistência R obtidos para cada temperatura, determinaram-se, por ajustes gráficos com a equação 12, os resultados apresentados na Tabela 2 e na Figura 10.

É importante referir que, de forma a obter os resultados acima mencionados, a partir da equação 12, foram considerados os valores de R determinados na secção anterior para os modelos simples e complexo, embora as temperaturas de medição nessa parte da experiência fossem ligeiramente diferentes; estas diferenças foram consideradas pouco significativas. Por fim, na Tabela 2, apenas se apresenta uma coluna para R_{SH} e outra para I_d porque os respetivos valores obtidos para os modelos simples e complexo foram os mesmos. Pela mesma razão, na Figura 10 é apenas apresentado um gráfico para cada temperatura T_i .

T_i (°C)	R_{SH} (Ω)	I_d (A)
27.3 ± 0.2	$(1.23 \pm 0.08) \times 10^9$	$(3.02 \pm 0.08) \times 10^{-8}$
35.1 ± 0.1	$(4.9 \pm 0.1) \times 10^8$	$(7.83 \pm 0.08) \times 10^{-8}$
59.3 ± 0.5	$(5.5 \pm 0.2) \times 10^7$	$(8.36 \pm 0.08) \times 10^{-7}$
82.3 ± 0.4	$(2.12 \pm 0.02) \times 10^7$	$(5.226 \pm 0.008) \times 10^{-6}$
100.2 ± 0.4	$(5.7 \pm 0.2) \times 10^6$	$(1.606 \pm 0.008) \times 10^{-5}$

Tabela 2: Resultados da correção do modelo do díodo em polarização inversa para as diferentes temperaturas T_i

Representando graficamente os valores obtidos para R_{SH} em função da temperatura (figura 10), foi notória uma aparente evolução exponencial decrescente. Deste modo, tal como foi apresentado na secção 1, esta resistência terá propriedades típicas de um semiconductor intrínseco, tendo sido feito um ajuste à equação $R(T) = be^{\frac{c}{T}}$ e obtidos os parâmetros $b = (2.2 \pm 0.4)10^{-2} \Omega$ e $c = (7.31 \pm 0.06)10^3 K$.

Quanto à polarização direta do díodo, a correção apresentada nesta secção, para a polarização inversa, não deverá alterar significativamente os valores obtidos, visto que os valores das correntes I envolvidas são bastante superiores; no caso da polarização inversa, sendo as correntes I muito baixas, há uma influência mais notória da resistência de *shunt*.

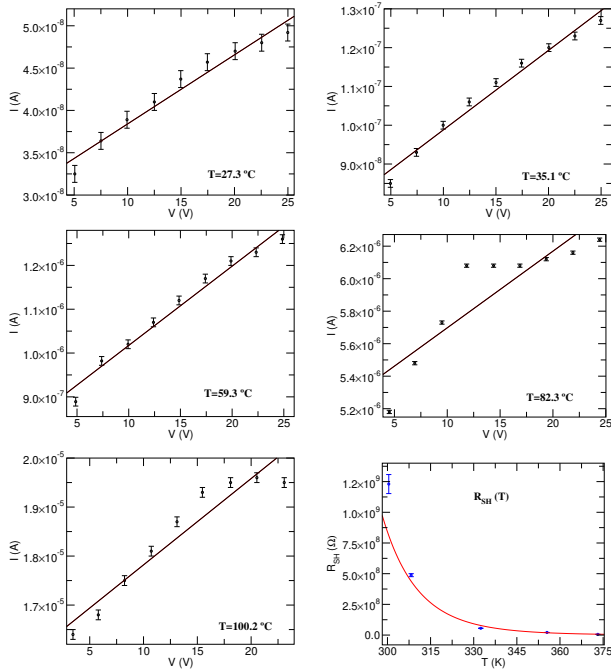


Figura 10: Ajustes das medidas obtidas com o díodo em polarização inversa à equação 12 e evolução de R_{SH} com a temperatura

5 Discussão dos resultados

5.1 Polarização direta

Nos gráficos da Figura 4, verifica-se que tanto o modelo simples como o complexo se ajustam bem aos dados experimentais, havendo, porém, maiores desvios para os menores valores de corrente e tensão. Estes desvios são, porém, ligeiramente inferiores para o modelo complexo.

Quanto ao gráfico da Figura 5b, também houve um bom ajuste aos dados experimentais. Contudo, para o gráfico de $b(T)$, houve uma clara discrepância, revelando que a relação de proporcionalidade direta dada na equação 2 não se verifica. Por outro lado, os ajustes a I_S e I_R do modelo complexo foram bastante bons. Na base da sua formulação, o modelo simples tem apenas em conta um fator de idealidade η , o qual é uma boa aproximação a considerar se se puderem negligenciar as recombinações de buracos e elétrons na região de transição [6]. Por outro lado, o modelo complexo possui, na sua formulação, parcelas diferentes relativas a $\eta = 1$ e $\eta = 2$, de forma a ter em conta os estados de condução que podem existir na banda proibida (por exemplo, no silício), um fator que, tendo em conta os melhores resultados do modelo complexo, não pode ser desprezado para o díodo utilizado. Os bons ajustes com o modelo complexo, aliados ao valor de η obtido com o modelo simples, indicam que o material se encontra, de facto, dopado (possuindo diferentes elementos na sua constituição). Aliás, através dos ajustes de $R(T)$, apresentados na Figura 7, verificou-se que a simples equação 11 descreve devidamente a evolução verificada para os valores obtidos. É de notar, na Figura 7, um afastamento do ponto central, correspondente à temperatura $T = (60.0 \pm 0.4)^\circ\text{C}$, face às curvas de ajuste, o que indicará que, próximo deste valor de temperatura, ocorrerá uma certa transição entre o comportamento de um metal e o de um semiconductor intrínseco.

5.2 Polarização inversa

Através dos ajustes apresentados na Figura 8, verificou-se que a corrente a atravessar o modelo da junção PN não se manteve constante para cada valor de temperatura, tendo variado com a tensão V , ao contrário do que era previsto pelos modelos teóricos. A correção apresentada com a resistência de *shunt* descreveu, no geral, estes valores de forma bastante satisfatória. Porém, tal como se verifica na Figura 10, estes ajustes foram piores para os maiores valores de temperatura. Embora R_{SH} tenha diminuído com a temperatura, a corrente I_d a atravessar o díodo ideal também aumentou, aproximando-se mais dos valores teóricos I_S ou $I_S + I_R$ considerados inicialmente, o que indicará que esta correção torna-se menos válida para maiores

temperaturas. Aliás, nos *plots* da Figura 8, havia-se verificado que os resultados teóricos (sobretudo para o modelo simples) eram cada vez mais próximos dos valores experimentais quanto maior a temperatura. Sendo que I_d aumenta com a temperatura e se aproxima dos valores teóricos, isto indica, então, que a quantidade de corrente que atravessa R_{SH} vai-se tornando menos significativa. Tendo em conta o comportamento exponencial de $R_{SH}(T)$, logo, típico de um semiconductor intrínseco, seria já de esperar que a condutividade fosse altamente dependente da temperatura e de eventuais impurezas presentes, sendo possivelmente necessário um modelo mais complexo.

6 Conclusão e crítica

Como pretendido, a realização deste trabalho experimental permitiu analisar e caracterizar uma junção PN. Analisou-se a característica tensão-corrente a diferentes temperaturas para os dois tipos de polarização do díodo utilizando dois modelos distintos e estimou-se a energia de *gap* do silício.

Relativamente à característica tensão-corrente, observando a Figura 4, verifica-se que ambos os modelos considerados parecem ajustar-se relativamente bem aos dados, mas, como já foi referido, tendo em conta os ajustes dos parâmetros é possível concluir que o modelo complexo é mais adequado para estudar o díodo em polarização direta, tendo-se obtido, neste caso, um valor de 0.91 eV para a energia de *gap* do silício.

Ao contrário do esperado, a corrente na polarização inversa não permaneceu constante com a tensão, tendo-se apresentado um modelo corretivo com uma resistência de *shunt* para justificar e quantificar estas discrepâncias.

É de apontar que a temperatura do díodo foi registada conjuntamente com os outros valores, ao longo da atividade, pois se observou que esta não se mantinha constante ao longo do tempo, principalmente para temperaturas mais elevadas. Os valores de tensão e corrente também oscilavam. Porém, quando necessário, as incertezas foram ajustadas de forma a ter em conta essas oscilações. Por outro lado, verificaram-se discrepâncias na leitura do sensor de temperatura, especialmente no caso da montagem 3, constatando-se que arrefecia mais rapidamente do que o aparato circundante, o que pode ter sido uma fonte de erros na determinação da temperatura do díodo.

Revelou-se então ser complicado arrefecer o díodo na polarização inversa para as temperaturas utilizadas para a polarização direta. Utilizaram-se temperaturas próximas, no entanto, as discrepâncias podem ter afetado a análise da polarização inversa, onde foram utilizados valores determinados na polarização direta.

Por vezes, não foi possível esperar que o sistema estabilizasse por completo, o que pode ter afetado os resultados.

Para uma análise mais exaustiva seria interessante considerar outros modelos que permitissem obter, por exemplo, uma energia de *gap* mais exata. Obtiveram-se bons ajustes para a evolução de R com a temperatura, no entanto, considerando outro modelo seria talvez possível aproximar o ajuste ao ponto intermédio que, como já foi referido pode apresentar uma maior discrepância por estar na região de transição de comportamento de um metal para um semiconductor intrínseco.

Por fim, alguns ajustes à montagem seriam benéficos para um melhor estudo da junção PN. O maior obstáculo encontrado foi o ajuste da temperatura, principalmente para arrefecer o díodo. Tal arrefecimento teria sido mais fácil se existisse um sistema de refrigeração na montagem e se o sensor de temperatura não apresentasse diferenças em relação à temperatura do díodo.

Referências

- [1] *Electrical resistivity and conductivity*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity.
- [2] *Guia Experimental e Apresentações (página da cadeira)*.
- [3] *List of physical constants*. URL: <http://tfel.sourceforge.net/physical-constants.html>.
- [4] *Semiconductor Resistance*. URL: <https://physics.stackexchange.com/questions/363612/variation-of-resistance-with-temperature-in-semiconductors>.
- [5] *Shunt Resistance*. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>.
- [6] *The junction diode*. URL: <http://leachlegacy.ece.gatech.edu/ece3040/notes/chap02.pdf>.