

Junção PN

Gonçalo Quinta nº 65680, Fernando Rodrigues nº66326, Teresa Jorge nº65722 e Vera Patrício nº65726

Laboratório de Complementos de Electromagnetismo e Termodinâmica
Mestrado Integrado em Engenharia Física Tecnológica 2009/2010
Instituto Superior Técnico (IST)

(Dated: 30 de Junho de 2010)

Foram estudados dois modelos que prevêm a relação entre a tensão e a corrente aos terminais de um díodo. Concluiu-se que apenas o segundo modelo estudado, que tem em consideração a recombinação dos electrões na junção PN, é aplicável. Para esse modelo foi obtido um valor de E_g de cerca de 1.2 (eV), como esperado.

I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E EXPERIÊNCIA REALIZADA

Neste trabalho foi estudado o funcionamento de uma junção PN, mais precisamente foram testados dois modelos para a relação entre a tensão aos seus terminais V_d e a corrente que a atravessa. O primeiro modelo é descrito pela equação seguinte

$$I = I_s(e^{\frac{qV_d}{KT\eta}} - 1) \quad (1)$$

q - carga do electrão; K - constante de Boltzman; T - temperatura (K); η - parâmetro de ajuste ao tipo de material (silício: 2; germânio: 1)

Tomando logaritmos, obtém-se a expressão linearizada

$$V_d = \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \frac{KT\eta}{q} \quad (2)$$

O parâmetro I_s é chamado de corrente inversa de saturação [2] e é proporcional à temperatura pela relação

$$I_s \propto T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (3)$$

em que E_g é a energia que separa a banda de condução da banda de valência do material. Quanto maior for este valor, maior energia será necessária para promover os electrões de valência a electrões de condução.

Uma vez que $\frac{I}{I_s} \gg 1$, será feita a aproximação

$$\ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) \approx \ln\left(\frac{I}{I_s}\right) \quad (4)$$

de modo a facilitar o estudo deste modelo.

O segundo modelo tem em consideração as perdas electrónicas ocorridas por recombinação de electrões na separação do material p e n, sendo que a corrente neste modelo é descrita pela equação

$$I = I_s(e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1) + I_r(e^{\frac{qV_d}{2KT}} - 1) \quad (5)$$

q - carga do electrão; K - constante de Boltzman; T - temperatura (K)

O parâmetro I_r depende também da temperatura,

$$I_r \propto T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{2KT}} \quad (6)$$

Para testar estes modelos foi utilizado um díodo - que é constituído por uma junção PN de silício - cujo esquema equivalente está representado na Figura 1:

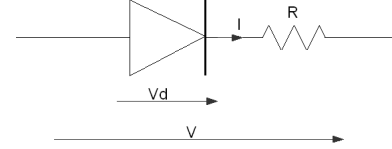


Figura 1. Modelo de díodo

A equação que relaciona as tensões no díodo é:

$$v = RI + v_D \quad (7)$$

À luz do primeiro modelo, a equação anterior tomará a forma

$$v = RI + \ln(I) \frac{KT\eta}{q} - \ln(I_s) \frac{KT\eta}{q} \quad (8)$$

que será simplificada para

$$v = RI + \ln(I)b(T) + c(T) \quad (9)$$

onde

$$b(T) = \frac{KT\eta}{q} \quad \text{e} \quad c(T) = -\ln(I_s) \frac{KT\eta}{q} \quad (10)$$

Quanto ao segundo modelo, seguindo a mesma linha de raciocínio que anteriormente, é possível chegar à conclusão que a tensão aos terminais do díodo é dada por

$$v = RI + 2 \frac{KT}{q} \ln\left(\sqrt{\left(\frac{I_r}{I_s}\right)^2 + \frac{4(I + I_s + I_r)}{I_s}} - \frac{I_r}{2I_s}\right) \quad (11)$$

Para testar a validade destas equações faz-se percorrer o díodo por sucessivas correntes (desde 10 μA a 0.1 A), mantendo a temperatura deste constante, e medidos os vários pares de valores de tensão e corrente de resposta nos terminais do mesmo, sendo estes valores ajustados às equações anteriores. Estes ensaios serão repetidos para 5 temperaturas diferentes, sendo também verificada a dependência da temperatura dos diferentes parâmetros de ajuste obtidos: R , b e c para o primeiro modelo e R , I_s e I_r para o segundo.

II. RESULTADOS

Devido ao grande número de dados obtidos, estes são apenas apresentados nas figuras 2 a 7 da secção seguinte.

III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados obtidos, assim como o ajuste desses dados às equações (9) e (11) (à esquerda e à direita, respectivamente), encontram-se nas figuras 2 a 7. Alguns dos parâmetros não têm explicitamente um erro associado porque foram fixos durante o processo de ajuste, para se obter um melhor ajuste aos outros parâmetros.

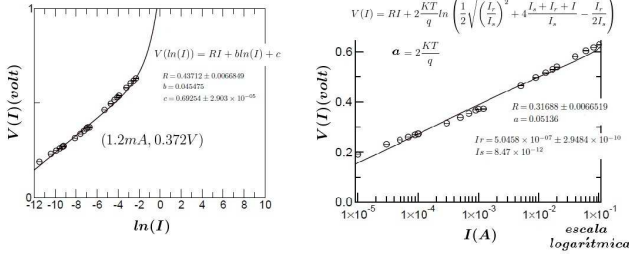


Figura 2. T = 298 K

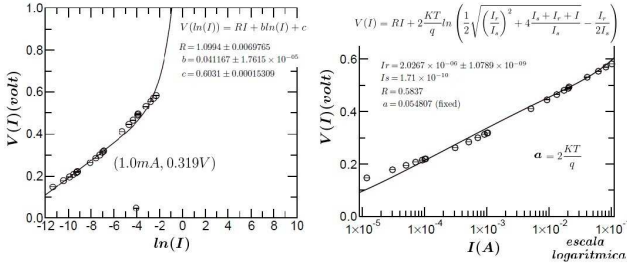


Figura 3. Esquerda: T = 318 K

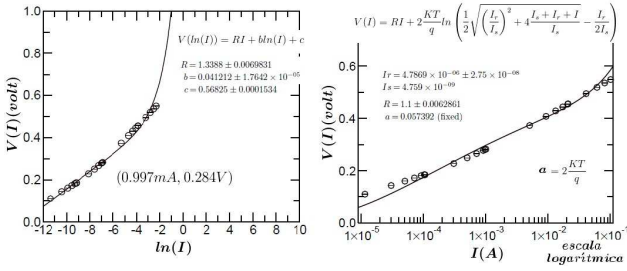


Figura 4. Esquerda: T = 333K

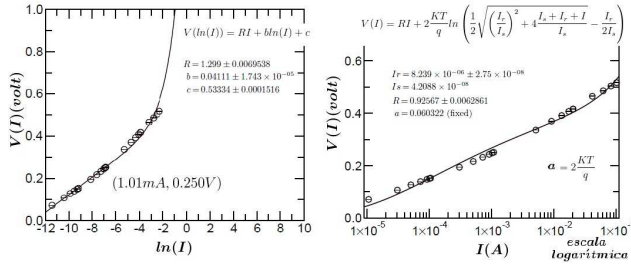


Figura 5. Esquerda: T = 350K

Os parâmetros obtidos em cada modelo foram ajustados em função da temperatura. Os valores de resistências encontrados estão na figura 8. Para o primeiro modelo, o

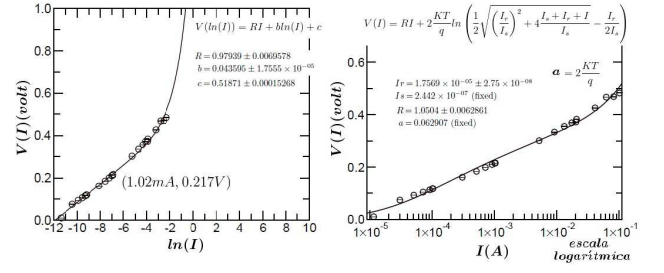


Figura 6. Esquerda: T = 365K

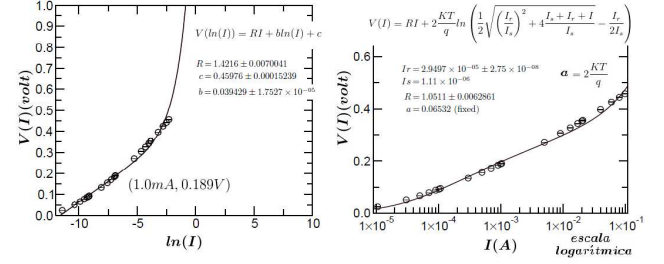


Figura 7. Esquerda: T = 379K

parâmetro b(T) encontra-se na figura 9 e o c(T) na figura 10(ver equação (10)). Já os parâmetros do segundo modelo, I_s e I_r , encontram-se na figura 11 e 12, respectivamente. Estes primeiros ajustes foram feitos com valores de E_g independentes. Foi feito também um ajuste conjunto, já que o valor de E_g tem que ser único, estando esse ajuste na figura 13.

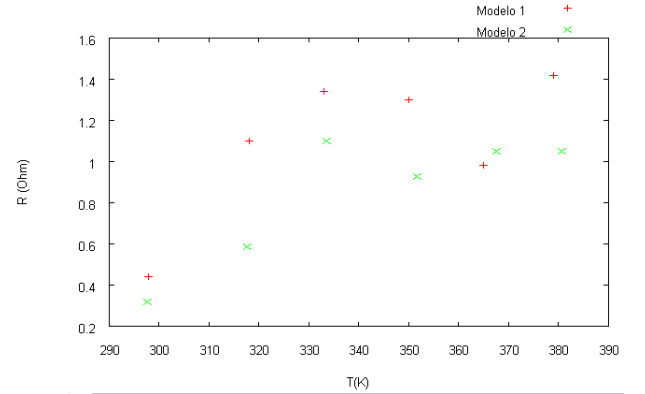
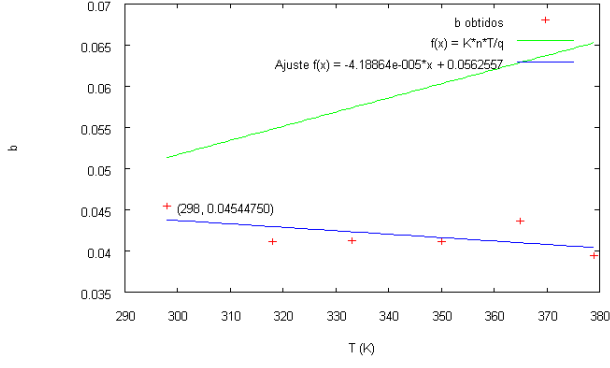
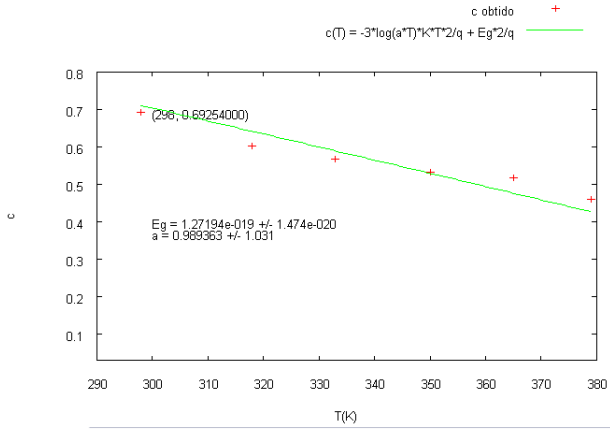
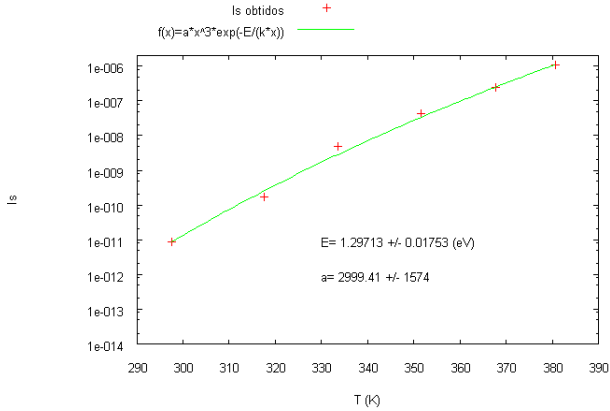


Figura 8. Resistências para ambos os modelos

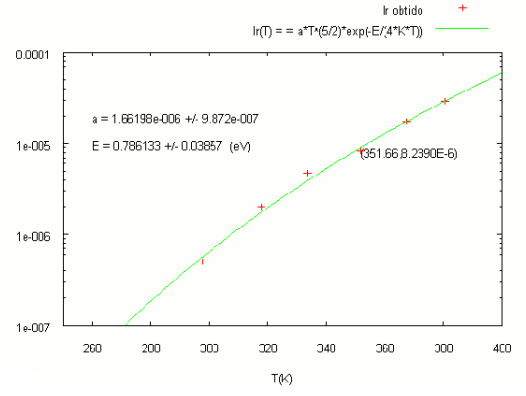
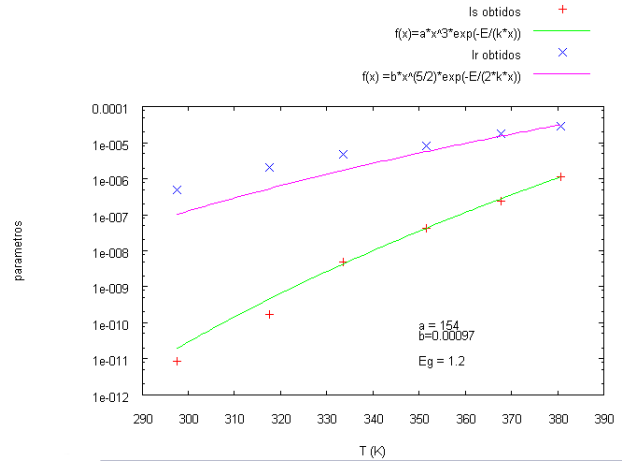
Convertendo o valor de E_g obtido com o parâmetro c para electrões-Volt têm-se $E_g = (0.795 \pm 0.092)$ eV.

IV. CONCLUSÃO E CRÍTICAS

Para o ajuste ao primeiro modelo considerado, equação (9), foi necessário converter as correntes em logaritmos de corrente, para facilitar a identificação do melhor ajuste para o maior número de pontos. Concluiu-se que esta aproximação não descreve adequadamente o modelo utilizado, já que os valores de b resultantes do ajuste pouco têm a ver com os esperados (figura 9), seguindo mesmo

Figura 9. $b(T)$ Figura 10. $c(T)$ (E_g em [J])Figura 11. $I_s(T)$

uma tendência oposta à teórica, já que diminuiu com a temperatura. No entanto, a partir do parâmetro c do mesmo modelo foi possível obter uma Energia de hiato de (0.795 ± 0.092) eV, muito próxima do valor a que se chegou através da outra abordagem. Já para o ajuste da expressão 11 optou-se pela representação logarítmica do eixo das correntes. Realizaram-se vários ajuste, pois com três parâmetros livres existem muitos pontos de estabilidade. Curiosamente, a combinação de parâmetros que apresentava o melhor ajuste aos pontos apresentava um

Figura 12. $I_r(T)$ Figura 13. Ajuste conjunto de I_s e I_r com o mesmo valor de E_g

I_r negativo, algo sem significado físico. Assumiu-se que o factor I_r teria necessariamente que ser positivo. Durante o ajuste forçou-se um valor para o I_s , valor esse calculado com base na energia de gap esperada, deixando apenas os outros parâmetros livres.

Foram feitos ajustes separados para ambos os parâmetros, de onde se obtêm energias de gap com valores bastante diferentes. Para o I_s obtém-se o esperado 1.2eV (parâmetro fixado) e para o I_r obtém-se um melhor ajuste para $E_g = 0.79$ eV.

No entanto a energia de gap é única para a mesma junção, por isso foi feito um ajuste simultâneo para ambos os parâmetros. Verificou-se que o valor 1.2 eV origina um bom ajuste simultâneo para ambas as rectas.

Analisando os mesmo resultados da experiência com os diferentes modelos, foi possível confirmar que o segundo modelo, o que sugere a recombinação dos pares de electrões na superfície de separação dos materiais p e n, descreve melhor a realidade que o primeiro pois os valores de I_s e I_r sofrem variações consistentes com as previstas teoricamente. Mas devido aos muitos limites impostos no ajuste do modelo, não é possível dizer se é absolutamente uma boa descrição da realidade.

O valor máximo das resistências foi limitado durante ambos os ajustes uma vez que se previa que este fosse pequeno. Para os dois modelos, em cada conjunto de dados,

embora a resistência encontrada não seja a mesma, está na mesma ordem de grandeza, e tem um valor pequeno, tal como o esperado. Nos dois casos, existe uma certa tendência para o aumento da resistência com o aumento da temperatura mas, devido aos poucos dados obtidos

e à sua possível inexactidão, não foi proposta nenhuma função que explicasse a dependência de R com a temperatura. É de notar que, a menos de um ponto, para ambas as aproximações a variação da resistência com a temperatura parece seguir aproximadamente a mesma curva.

[1] *Introdução à Física* by J. D. Deus, *et al.*, McGraw-Hill, 2000

[2] *Introdução aos Circuitos Eléctricos e Electrónicos* by

M. de Medeiros Silva, Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª edição, 2009