

# 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: 8 de Junho de 2010)

Foram estudados dois modelos que prevêm a relação entre a tensão e a corrente aos terminais de um díodo. Conclui-se que apenas o segundo modelo considerado, 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)xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.

## 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);  $\eta$  - 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 proporcionalmente com a temperatura, da forma

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

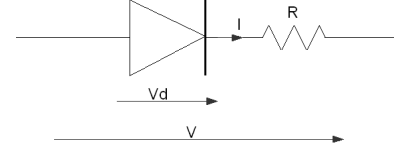


Figura 1. Modelo de díodo

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:

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 são aplicadas sucessivas tensões ao díodo, mantendo a temperatura constante e medidas a tensão e a corrente de resposta nos terminais do díodo, 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, de modo a se produzir um melhor ajuste aos outros parâmetros.

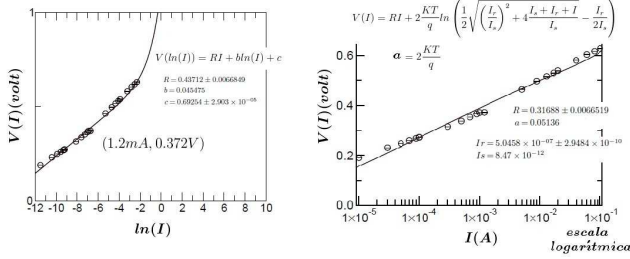


Figura 2.  $T = 298 \text{ K}$

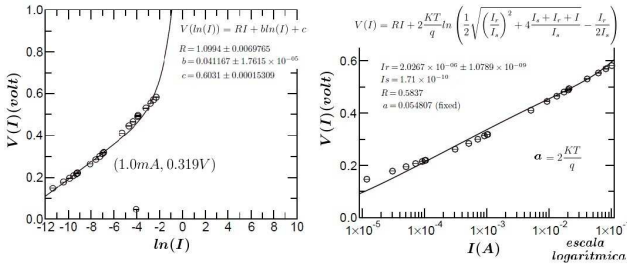


Figura 3. Esquerda:  $T = 318 \text{ K}$

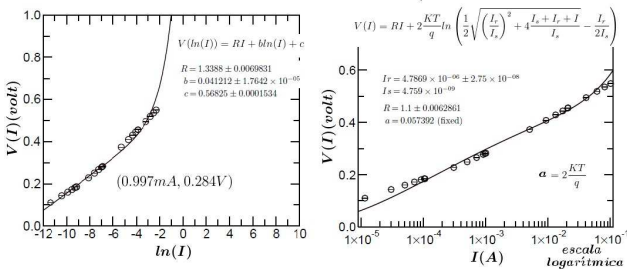


Figura 4. Esquerda:  $T = 333 \text{ K}$

Os parâmetros obtidos em cada modelo foram ajustados em função da temperatura. Os valores de resistências encontrados encontram-se na figura 8. Para o primeiro modelo, o parâmetro  $b(T)$  encontra-se na figura 8 e o  $c(T)$  (ver equação (10)). Já os parâmetros do segundo modelo,  $I_s$  e  $I_r$ , encontram-se na figura 9 e 10, 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 11.

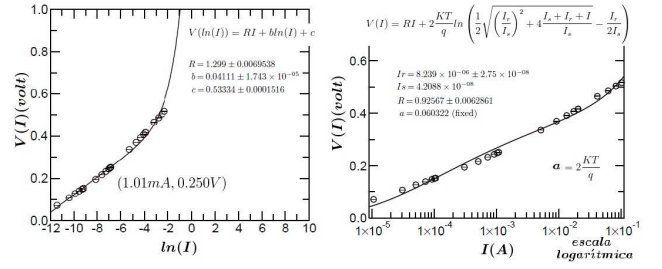


Figura 5. Esquerda:  $T = 350 \text{ K}$

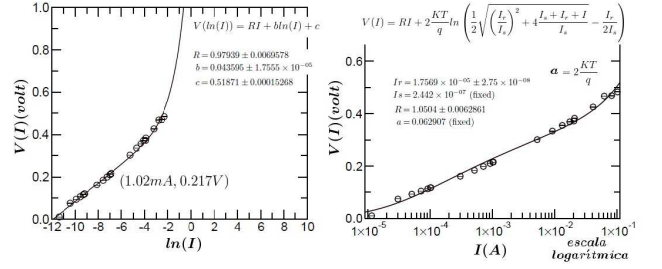


Figura 6. Esquerda:  $T = 365 \text{ K}$

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

## IV. CONCLUSÃO E CRÍTICAS

### AJUSTE DAS EQUAÇÕES 9 E 11.

Os dados recolhidos apresentavam uma tendência logarítmica, para facilitar o ajuste da expressão 9 foi necessário converter as correntes em logaritmos de corrente para que fosse mais fácil identificar o melhor ajuste ao maior número de pontos. Para o ajuste da expressão 11 optou-se pela representação logarítmica do eixo das correntes. Realizaram-se vários ajuste, pois com três parâmetros livres existiam muitos pontos de estabilidade. A combinação de parâmetros que apresentava o melhor ajuste aos pontos apresentava um  $I_r$  negativo, algo não previsto pelo modelo pois indicaria que em vez de recominação existia mais quebra de ligações e a energia de gap seria negativa. Assim foi necessário estimar teoricamente quais os valores dos parâmetros que dariam o valor esperado para a energia de gap, estas estimativa foi feita para o  $I_r$ . Mesmo pedindo a vários programas (Lince e Gnuplot) para ajustarem a expressão (11) em torno desses valores havia diferenças entre os valores esperados e os valores aproximados pelo programa da ordem dos  $10^2$ . Assim resolveu-se fixar o valor de  $I_r$  no valor esperado e deixar os outros parâmetros ajustar livremente.

Para ambos os casos o parâmetro de ajuste da resistência foi limitado pois previa-se uma resistência interna do diódo baixa. Assim:

Os valores encontrados para as resistências internas do diódo foram pequenos, estando de acordo na ordem de grandeza para ambas as abordagens. 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

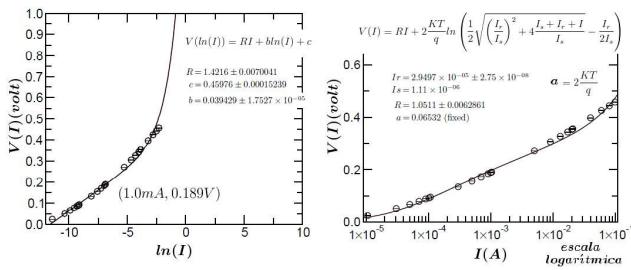


Figura 7. Esquerda:  $T = 379K$

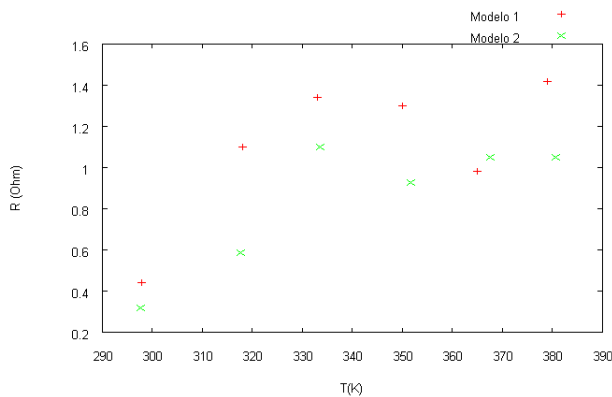


Figura 8. Resistências para ambos os modelos

$R$  com a temperatura. Observe-se que para a maioria dos pontos a diferença entre valores de resistência do modelo 1 e modelo 2 são muito próximas. ....Isto sugere que, de facto, existe uma dependência entre a resistência e a temperatura e confirma a relação de proximidade entre modelos.....

A primeira aproximação ao funcionamento da junção, equação (9) não descreve adequadamente o modelo utilizado, já que os valores  $b$  resultantes do ajuste pouco têm a ver com os esperados (figura 9), seguindo mesmo uma tendência oposta ao que era esperado, já que diminuiu com a temperatura. No entanto, a partir do parâmetro  $c$  do mesmo modelo foi possível obter uma Energia de hiato de  $(0.795 \pm 0.092)$  eV, muito próxima do valor a que se chegou através da outra abordagem.

Já para a segunda aproximação, equação (11), a variação de  $I_s$  e  $I_r$  com a temperatura pode ser explicada pela teoria considerada. No entanto, os valores de energia chegados são bastante dispares, o que não devia ocorrer. A NÃO SER QUE NA ZONA DE RECOMBINAÇÃO A DIFERENÇA DE ENERGIAS ENTRE NÍVEIS SEJA REALMENTE MAIS BAIXA (PK? PARA ALEM DE NOSSO SENHOR ASSIM O QUERER TALVEZ TENHA A VER COM

UMA MAIOR CONCENTRAÇÃO DE ELECTRÕES, OU MAIOR DOPAGEM...) E QUE O MODELO CONSIGA DE ALGUMA MANEIRA UM TANTO MÁGICA DISTINGIR AS DUAS ZONAS. SE FOSSE ASSIM PODEMOS CONSIDERAR O 0.7 UMA ESPECIE DE VALOR MÉDIO (OU VALOR MAIS FREQUENTE, LOGE DA JUNÇÃO PROPRIAMENTE DITA) E POR ISSO É QUE O OUTRO MODELO, QUE NÃO FUNCIONA, MIRACULOSAMENTE CHEGOU

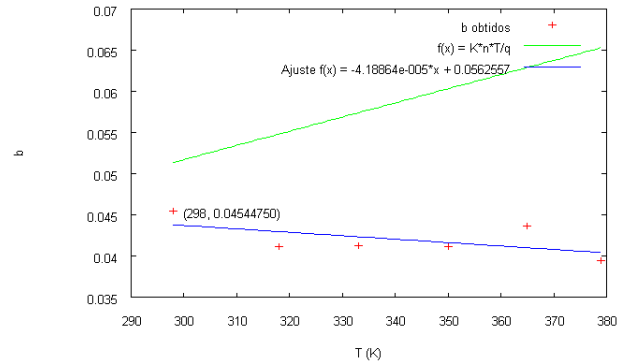


Figura 9.  $b(T)$

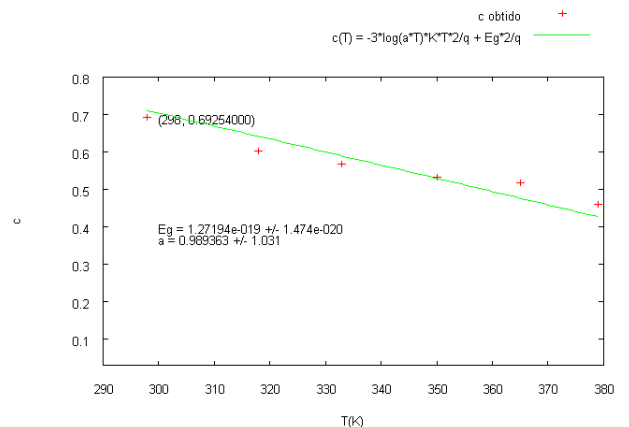


Figura 10.  $c(T)$  ( $E_g$  em [J])

AO MESMO VALOR.

Não é possível comparar as constantes de proporcionalidade de  $I_s$  (denominadas a nos ajustes) uma vez que uns ajustes foram feitos para electões volt e outros em joules (OU É POSSIVEL FAZER A CONVERSÃO? É QUE ACHO QUE NÃO DAVA NADA DE JEITO...)

É POR ISTO TUDO QUE EU ADOREI FAZER ESTE RELATÓRIO:)

[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

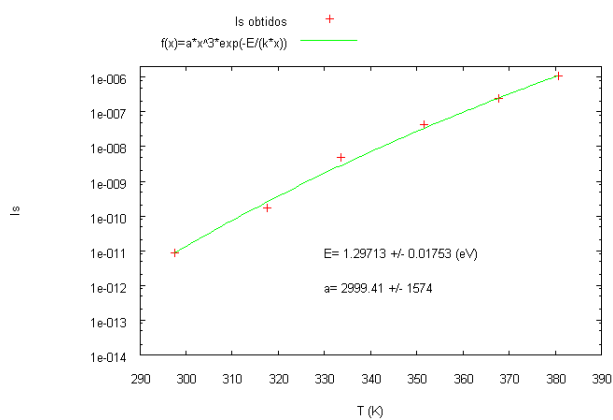


Figura 11.  $I_s(T)$

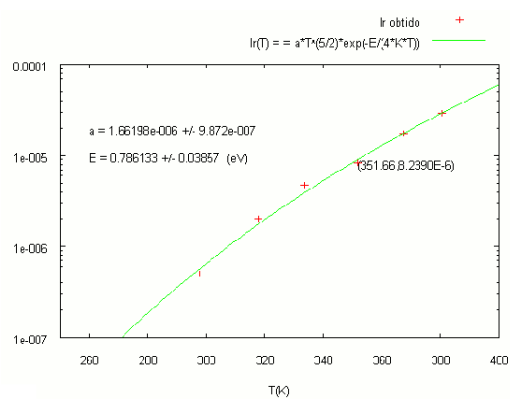


Figura 12.  $I_r(T)$

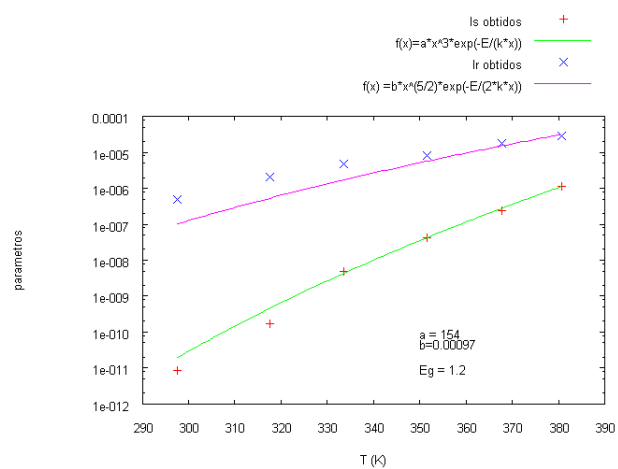


Figura 13. Ajuste conjunto de  $I_s$  e  $I_r$  com o mesmo valor de  $E_g$