

Relatório de Física Experimental III
2004/2005

Engenharia Física Tecnológica

JUNÇÃO PN

Trabalho realizado por:
Ricardo Figueira, nº53755;
André Cunha, nº53757
Tiago Marques, nº53775

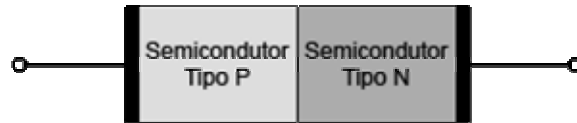
Grupo 1; 3ªfeira 16-20h

Lisboa, 17 de Maio de 2005

O objectivo do trabalho experimental aqui descrito consiste na determinação da característica corrente - tensão que não é mais do que a corrente I num circuito em função da voltagem V aplicada, ou seja a função $I(V)$, numa junção PN bem como a sua variação com a temperatura.

Desta forma, antes de iniciar qualquer análise ao trabalho em questão é conveniente explicitar o que é uma junção PN bem como algumas das suas propriedades e modo de funcionamento.

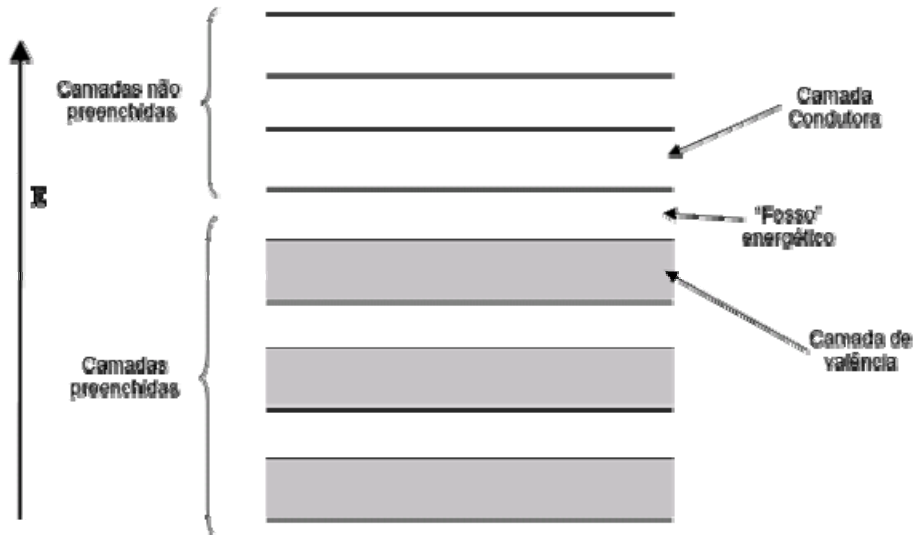
Ora, uma junção PN é formada pela combinação de semicondutores do tipo N e semicondutores do tipo P dispostos em contacto muito próximo como se pode ver no esquema do figura seguinte, que representa numa forma simplificada uma possível junção PN em circuito aberto:



O comportamento da junção PN é indissociável do conceito de semicondutor pelo que se torna imprescindível abordá-lo com algum relevo. Tal como o nome sugere, um semicondutor tem um comportamento ambíguo entre condutor e isolador.

Exemplificando, a temperaturas muito baixas podemos esperar que um semicondutor se comporte como um isolador enquanto a temperatura ambiente seja possuidor de uma condutividade eléctrica considerável.

Os isoladores e os semicondutores a temperatura absoluta nula ($T=0K$), microscopicamente têm as camadas de valência completamente preenchidas como se pode ver pelo gráfico seguinte:



Se os electrões existentes nas camadas de valência a partir de certa temperatura, possuírem energia suficiente para ultrapassar o “fosso” energético (E_G – “Energy Gap”) e transitarem para a camada condutora, então o material vai ter propriedades condutoras. Caso contrário se os electrões não conseguirem ultrapassar o “fosso” energético habitualmente denominado barreira de potencial, o material permanece isolador.

Assim sendo, a distinção entre isolador e semiconductor é de certa forma ambígua dado que teoricamente não existe uma linha definida entre ambos por isso pode-se adoptar a seguinte fronteira:

- Materiais com uma barreira de potencial entre as camadas condutoras e de valência inferior a $3eV$ são geralmente considerados semicondutores.
- Materiais com uma barreira de potencial superior ao valor anterior consideram-se geralmente isoladores.

Dada a ambiguidade atrás descrita, estas fronteiras são algo relativas do ponto de vista teórico, tendo sido traçadas com base no comportamento em situações mais práticas ligadas às inúmeras aplicações tecnológicas deste conceito.

Num material condutor, as camadas condutoras vão estar sempre preenchidas independentemente da temperatura do material possuindo sempre propriedades condutoras.

Os semicondutores mais usados actualmente são o silício e o germânio, elementos cujo número de electrões de valência é igual ao do Carbono (4) e cristalizam em estruturas tetraédricas de ligações covalentes semelhantes à do diamante. É no interior destas estruturas que se vai verificar o comportamento energético atrás descrito.

Para vencer o “fosso energético” ou barreira de potencial atrás descrito, os electrões podem adquirir energia de diferentes formas como por exemplo:

- O já referido aumento de temperatura do semiconductor, que irá provocar uma aumento na energia cinética das partículas no mesmo;
- Absorvendo fotões com energia superior ou igual à do “fosso” energético;
- Bombardeamento do semiconductor com partículas de alta energia;
- Dopando o semiconductor com impurezas munidas de propriedades específicas.

É neste último ponto conjugado com a variação da temperatura que reside a especificidade do comportamento de uma junção PN.

Tendo em conta os motivos supracitados, um semiconductor com estrutura cristalina pode ser dopado com impurezas que alterem as suas propriedades condutoras, desta forma as impurezas podem ser divididas em dois grupos antagónicos:

- Impurezas dadoras (P, As, ou Sb), isto é elementos com um nível de valência superior ao do elemento que constitui o semiconductor;

- Impurezas aceitadoras (B, In ou Al), isto é, elementos com um nível de valência inferior ao do elemento semiconductor.

No caso de uma recombinação da rede cristalina com átomos dos elementos citados no primeiro caso, a rede vai possuir um excesso de electrões. Aqui formou-se um semiconductor do tipo N.

Caso contrário, dopando o semiconductor com os elementos referidos no segundo caso, a rede vai ter “buracos” electrónicos e como tal vai constituir um semiconductor do tipo P.

Agora que já foi explicitado de forma simplificada, o comportamento dos constituintes de uma junção PN, tornam-se evidentes certas propriedades.

Na fronteira de contacto entre os semicondutores P e N, ou seja, na junção propriamente dita vamos ter um excesso de electrões no lado N e uma carência dos mesmos no lado P. Esta distribuição electrónica desigual vai provocar na junção uma difusão de electrões entre os dois semicondutores reduzindo assim a discrepância entre os semicondutores N e P.

Ainda assim, há que considerar que tais fenómenos ocorrem apenas na junção propriamente dita pelo que ao longo do semiconductor longe da junção a densidade de electrões (N_n) e “buracos” electrónicos (N_p) vai permanecer praticamente inalterada.

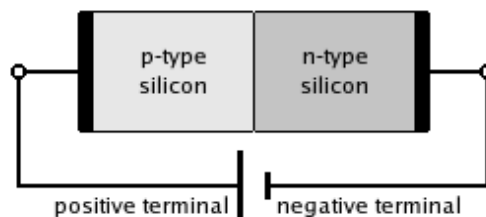
Por isto mesmo, à medida que a difusão ocorre, a transição de electrões entre os dois semicondutores vai sendo cada vez mais difícil o que pode ser traduzido por uma barreira de potencial. Quando o processo de difusão atinge o equilíbrio obtém-se as seguintes relações para cada um dos semicondutores N e P respectivamente:

$$\frac{Np_P}{Np_N} = e^{-\frac{q_p V}{K_B T}} \quad \text{e} \quad \frac{Nn_N}{Nn_P} = e^{-\frac{q_n V}{K_B T}},$$

Onde os índices P e N nas densidades indicadas anteriormente, identificam o semiconductor considerado e V a barreira de potencial atrás descrita.

Pela aplicação externa de uma diferença de potencial, estas propriedades permitem a obtenção de fenómenos interessantes.

Num circuito com a configuração seguinte:



Dado que no lado P vai aumentar a carência electrónica e no lado N o seu excesso, os “buracos” electrónicos do lado P vão ser atraídos para a fronteira na

junção tal como os electrões do lado N, isto vai facilitar a difusão electrónica na junção o que se vai traduzir numa diminuição da barreira de potencial.

Em termos práticos isto vai facilitar a passagem de corrente pela junção.

Para explicar a curva característica da corrente nesta situação recorreremos a 2 modelos distintos.

Numa primeira aproximação, temos que:

$$I = I_S \left(e^{\frac{q\Delta V}{K_B T \eta}} - 1 \right)$$

Onde ΔV é a queda de tensão nos terminais do díodo, q a carga do electrão ($1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ C), K_B a constante de Boltzmann ($1,380\ 6505 \times 10^{-23}$ J K⁻¹), T a temperatura da junção PN e η uma constante que depende do material da junção (no caso do silício, este valor é 2). A corrente I_S é dada por:

$$I_S = aT^3 e^{-\frac{E_g}{K_B T}}$$

Note-se que o valor de ΔV inclui uma diferença de potencial aos terminais da parte neutra da junção. Para representar este valor fisicamente, associa-se uma resistência (R) ao modelo considerado. Assim o valor da tensão vem portanto:

$$\Delta V = RI + V_D$$

Onde V_D é o valor da queda de tensão aos terminais do semiconductor desprezando a parte neutra.

No segundo modelo, o valor da corrente é dado por:

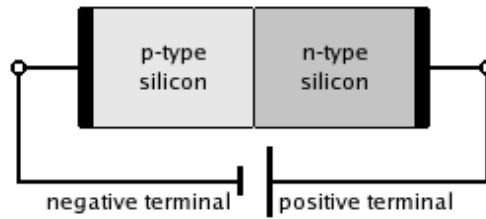
$$I = I_S \left(e^{\frac{q\Delta V}{K_B T}} - 1 \right) + I_R \left(e^{\frac{q\Delta V}{2K_B T}} \right)$$

onde I_S é o mesmo que o modelo anterior e $I_R = b(K_B T)^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{2K_B T}}$ (a e b constantes).

$V(I)$ vai ser dado por:

$$V(I) = RI + \frac{2K_B T}{q} \ln \left(\sqrt{\left(\frac{I_R}{2I_S} \right)^2 + \left(\frac{I}{I_S} + 1 \right)} - \left(\frac{I_R}{2I_S} \right) \right)$$

Num circuito com a configuração contrária:



Vai ocorrer o oposto, o terminal positivo vai contrariar o movimento dos electrões para a fronteira da junção no lado N e no lado P o terminal positivo vai influenciar os “buracos” electrónicos no lado P a afastarem-se da fronteira da junção. Desta forma, na fronteira da junção, a necessidade de electrões do lado P vai ser reduzida enquanto no lado N a densidade electrónica vai ser menor, isto vai dificultar a difusão electrónica na junção, aumentando a diferença de potencial.

Em termos macroscópicos isto vai ser traduzido num impedimento da passagem de corrente. Neste caso a corrente é dada por:

$$I = I_S = aT^3 e^{-\frac{E_g}{K_B T}}$$

Desta forma, tendo em conta as propriedades deste dispositivo, a junção PN está na base de toda a tecnologia actual dado que permite a implementação de algoritmos lógicos através de circuitos eléctricos pela passagem ou não de corrente.

Sem exagero pode-se afirmar que o boom tecnológico do século XX está directamente relacionado com a descoberta e manipulação das propriedades dos semicondutores.

Introdução Experimental

Experimentalmente, irá ser usado um díodo comercial 1N5332, que não é mais do que uma junção PN de silício. O díodo encontra-se numa caixa em contacto com um conjunto de resistências de aquecimento alimentadas por uma fonte de tensão auxiliar de valores compreendidos entre 0V e 30V. Através da manipulação do valor da fonte será possível alterar a temperatura do díodo cuja temperatura será medida através de um termómetro digital colocado na caixa.

Para a determinação da característica $V(I)$ propriamente dita, utiliza-se uma fonte de tensão em série com uma resistência limitadora de corrente. A corrente na junção PN vai ser medida através de um amperímetro e a tensão na junção PN através de um voltímetro entre os seus terminais.

Para diferentes temperaturas ajustáveis através das resistências de aquecimento, vai-se estudar o comportamento da junção para diferentes valores de corrente aplicada regulável através da resistência limitadora como será explicitado no procedimento experimental.

Posteriormente proceder-se-á uma análise dos dados recolhidos através de ajustes numéricos aplicando dois modelos teóricos distintos para tentar descrever o comportamento da situação experimental. Subsequentemente, poder-se-á discutir a validade dos mesmos perante o cenário experimental usado.

Equipamento

- 2 Fontes de tensão contínua;
- 1 Díodo 1n5332;
- 2 Resistências variáveis
- Conjunto de resistências de aquecimento;
- 3 Multímetros;
- Termómetro digital.

Procedimento Experimental

Começou-se por montar o circuito como indicado na Figura I.

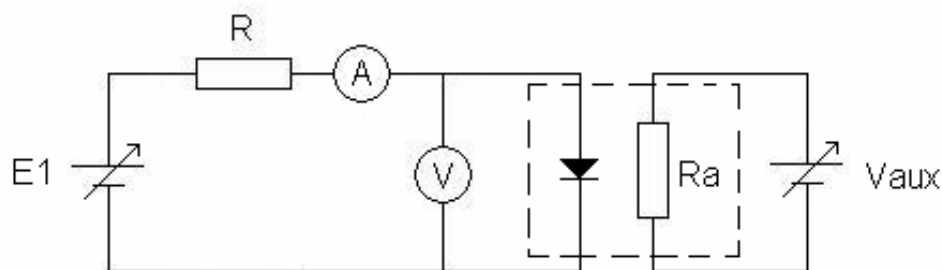


Figura 1: Esquema do circuito utilizado

Inicialmente, manteve-se a fonte auxiliar, que controla o aquecimento do sistema, com uma tensão (V_{aux}) de 0 V. Deste modo, a temperatura da junção PN é a temperatura ambiente. Com o valor da resistência (R_1) a 100 K Ω , variou-se a tensão da fonte de alimentação do circuito (E_1) de modo a que a junção seja percorrida por uma corrente (I) com valores entre 10 μ A e 100 μ A, em passos de 10 μ A. De seguida, alterou-se o valor da resistência para 20 K Ω e variou-se E_1 por forma a I assumir valores entre 100 μ A e 1 mA, em passos de 100 μ A. Alterou-se de novo R_1 , desta vez para 1 K Ω e procedeu-se ao método para correntes entre 1 mA e 20 mA em passos de 2 mA. Por último, realizou-se o mesmo procedimento, mas para uma resistência de 200 Ω e correntes entre 20 mA e 100 mA em passos de 10 mA. Durante estas medições é importante verificar que a temperatura da caixa do díodo permanece constante.

Após feitas todas as medições, aplicou-se uma tensão de 20 V às resistências de aquecimento usando a fonte auxiliar. Esperou-se até que a temperatura da caixa do díodo atingisse o equilíbrio e repetiu-se todo o ciclo de medições indicado em cima. Repetiu-se para várias tensões na fonte auxiliar (17,9 V; 12,6 V; 9 V) que correspondem a valores diferentes de temperatura. Com os valores obtidos preencheu-se a Tabela 1.

Análise de Resultados

Observou-se a representação gráfica a tensão aos terminais da junção em função da corrente percorrida pela mesma ($V(I)$) para as diferentes temperaturas de funcionamento da junção PN.

Nos modelos considerados, o díodo real é representado por um díodo em série com uma resistência, responsável pelas perdas (Figura 2).

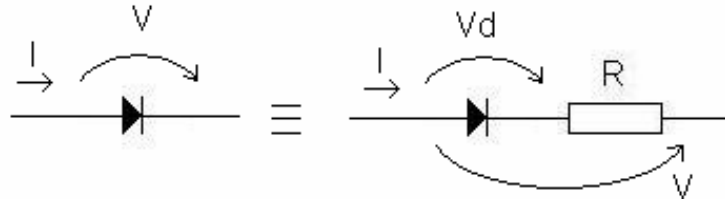


Figura 2: Esquema dos modelos de díodo considerados

Primeiro Modelo

De seguida, considerou-se o modelo mais simples do funcionamento da junção PN em que a corrente (I) é dada por:

$$I = I_s \cdot \left(\exp \left[\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T \cdot \eta} \right] - 1 \right).$$

Fez-se um ajuste dos dados $V(I)$ obtidos, para cada uma das temperaturas estudadas (Gráficos 1 a 5), à relação:

$$V = R \cdot I + b \cdot \ln(I) + c;$$

onde $b = \frac{\eta \cdot K \cdot T}{q}$, $c = -\frac{\eta \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln(I_s)$ e R é a resistência da parte neutra dos semicondutores. Com este ajuste foi possível obter os valores experimentais para R , b e c nas 5 temperaturas de funcionamento analisadas (Tabela 2).

Representou-se graficamente $R(T)$, $b(T)$ e $c(T)$. De seguida fez-se a regressão linear de $R(T)$ e $b(T)$ (Gráficos 6 e 7). Comparou-se o gráfico de $b(T)$ com o previsto teoricamente (Gráfico 8).

Fez-se ainda o ajuste de $c(T)$ (Gráfico 9), onde :

$$I_s = a \cdot T^3 \cdot \exp \left[\frac{-E_g}{K \cdot T} \right].$$

Com este último ajuste foi possível determinar o valor experimental de E_g .

Segundo Modelo

Considerou-se ainda um modelo mais elaborado do comportamento da junção de silício em que a corrente é dada por:

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left[\frac{q \cdot Vd}{K \cdot T}\right] - 1 \right) + I_R \cdot \exp\left[\frac{q \cdot Vd}{K \cdot T}\right].$$

De novo, fez-se um ajuste numérico dos dados obtidos, para as 5 temperaturas estudadas (Gráficos 10 a 14), à relação:

$$V = R \cdot I + \frac{2 \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\left[\left(\frac{I_R}{2 \cdot I_s} \right)^2 + \frac{I}{I_s} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{I_R}{2 \cdot I_s} \right).$$

Dos ajustes retiraram-se os valores de R, I_s, I_R para as 5 temperaturas.

Representou-se graficamente R(T) e fez-se a regressão linear dos dados (Gráfico 15). De seguida, efectuaram-se os ajustes de I_s(T) e I_R(T) às expressões teóricas (Gráficos 16 e 17):

$$I_s = \alpha \cdot T^3 \cdot \exp\left[\frac{-Eg}{K \cdot T}\right];$$

$$I_R = \alpha \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot \exp\left[\frac{-Eg}{K \cdot T}\right] \cdot \frac{T}{q}.$$

Com estes dois últimos ajustes foi possível estimar dois valores de Eg.

Uma vez que foram testados dois modelos distintos para o funcionamento da junção PN em questão, far-se-à uma discussão separada para cada caso. Mais tarde nas conclusões cruzar-se-ão os resultados.

1º Modelo Teórico

Numa primeira análise, através da observação dos gráficos $V(I)$, os resultados experimentais permitem um ajuste quase perfeito à expressão teórica. Desde ajuste foi possível determinar $R(T)$, $b(T)$ e $c(T)$ (Tabela 2).

Analisando a variação da resistência da parte neutra da junção, constatou-se que esta aumentava com a temperatura, tal como era esperado. De facto, para a gama de valores obtidos, pode-se mesmo dizer que esta variação aparenta ser linear, permitindo assim, proceder a uma regressão linear dos dados. Desta forma, obteve-se como declive da recta $0,00379 \pm 5,48076 \times 10^{-5} \Omega.K^{-1}$ e como ordenada na origem $-0,79497 \pm 1,871 \times 10^{-2} \Omega$. Uma vez que não tivemos acesso a valores tabelados, não foi possível comprovar a verosimilhança destes valores. Independentemente, o valor da ordenada na origem é claramente impossível, uma vez que implica uma resistência negativa quando $T = 0 K$ e, portanto, leva a concluir que a aproximação a uma recta é válida exclusivamente para um curto espaço de resultados. Paralelamente, a ordem de grandeza destas resistências é três vezes inferior à da menor resistência de carga utilizada no circuito, o que não contraria a validade dos resultados. Os erros da resistências são determinados durante o ajuste de $V(I)$ pelo programa *Origin*. Os desvios à precisão das resistências tomam valores entre 13,4% e 27,0%.

Relativamente ao parâmetro b , os resultados obtidos estavam muito longe dos esperados. Teoricamente, a relação de linearidade entre b e a temperatura deveria ser tal que o declive da recta seria $\frac{\eta \cdot K_B}{q}$, passando pela origem.

Porém, como se pode observar pelo gráfico 7, os pontos experimentais aparecem dispersos, sendo a regressão linear bastante forçada (não se adapta minimamente aos dados). O declive da recta é negativo e igual a $-3,28719 \times 10^{-5} \pm 1,31431 \times 10^{-5} V.K^{-1}$ sendo o esperado $1,72366 \times 10^{-4}$, representado no gráfico 8. Facilmente se constata que o valor experimental não está de acordo com o teórico, nem mesmo considerando a margem de erro. Determinou-se ainda o valor $0,05721 \pm 0,00449 V$ para a ordenada na origem que contraria igualmente a teoria. Tal facto, leva-nos a concluir que, embora os valores de b sejam da mesma ordem de grandeza dos previstos teoricamente, a validade do modelo em questão é bastante limitada.

Quanto ao valor de c , foi possível fazer um ajuste para determinar os parâmetros a e E_g . O ajuste adaptou-se bem aos pontos experimentais, obtendo-se para a $0,00285 \pm 0,00069$ (desvio à precisão de 24,2%) e para E_g $1,0274 \times 10^{-19} \pm 1,1393 \times 10^{-21} J$ (desvio à precisão de 1,11%). Como o valor teórico de E_g é $1,7942 \times 10^{-19} J$ para o silício, o resultado obtido apresenta um desvio à

exactidão de 42,74 %. Este desvio não se encontra coberto pela barra de erro experimental, o que, mais uma vez, nos leva a concluir que este modelo se encontra bastante afastado da junção real estudada.

2º Modelo Teórico

Ao se estudar o ajuste nos gráficos $V(I)$ com base no 2º modelo teórico (gráficos 10 a 14) este revelou-se não tão perfeito comparativamente com o modelo anterior, principalmente para os valores de maior intensidade quando submetidos às temperaturas mais elevadas. Da análise conjunta destes gráficos foi possível retirar $R(T)$, $I_s(T)$ e $I_r(T)$ (Tabela 3).

À semelhança da análise à variação da resistência da parte neutra feita com base no modelo anterior, também agora a resistência aumenta, no espaço de resultados considerado, de forma aparentemente linear com a temperatura, pelo que se procedeu novamente à regressão linear dos dados (Gráfico 15). Assim, obtiveram-se os valores $9,54 \times 10^{-3} \pm 1,08 \times 10^{-3} \Omega.K^{-1}$ para o declive e $-2,39249 \pm 0,36901 \Omega$ para a ordenada na origem. Novamente, embora estes valores não tenham sido confrontados com os valores teóricos, a ordenada na origem é à partida fisicamente impossível e portanto conclui-se que a dependência linear só é válida para um curto espectro de valores. Os valores de resistência da parte neutra mantêm-se mais pequenos que as resistências de carga, no entanto os mais elevados já só distam 2 ordens de grandeza da resistência de carga mais baixa. Os desvios à precisão das resistências tomam valores entre 10,1% e 47,6%.

No que toca a I_s , observa-se que este aumenta exponencialmente com a temperatura, corroborando a teoria. Desta forma, a expressão teórica fornecida adapta-se com grande precisão aos valores experimentais sendo possível determinar para E_g o valor $1,7953 \times 10^{-19} \pm 1,6455 \times 10^{-21} J$ (erro à precisão de 0,92 %). Quanto à constante a , obteve-se o valor $22,7301 \pm 6,58022$.

Relativamente a I_r , observa-se que também este aumenta com a temperatura sendo mais uma vez possível determinar os valores de E_g e da constante de proporcionalidade a , respectivamente, $1,1886 \times 10^{-19} \pm 2,7165 \times 10^{-21} J$ (desvio à precisão de 2,29 %) e $4,8085 \times 10^{-27} \pm 1,2281 \times 10^{-26}$ (a tem um erro associado superior ao próprio valor). Note-se, ainda, que como se pode observar neste gráfico, o ajuste já não é tão bom como no caso anterior nem sequer se encontra coberto pelas barras de erro. Este ponto irá ser discutido mais à frente nas conclusões.

Conclusões

A experiência decorreu sem qualquer tipo de problemas, tendo sido realizada em menos tempo que o previsto. Uma falha eléctrica, que durou bastante roubou-nos tempo de laboratório. Se tal não tivesse ocorrido teria sido possível realizar todo o ciclo de medições para, pelo menos, mais um valor de temperatura da junção.

Os erros experimentais considerados, são bastante reduzidos, uma vez que os valores medidos eram muito estáveis. Foi, portanto, considerado como erro a metade da menor divisão da escala dos aparelhos de medida. Esta estimativa de erro experimental muito optimista, levou a que grande parte dos resultados não cobrissem os valores teóricos com a margem de erro. Tal, pode ser constatado sobretudo nos gráficos de $V(I)$ do segundo modelo e de $I_R(T)$.

Não foram considerados erros por propagação, através das derivadas parciais, pois todas as grandezas calculadas com base nos valores experimentais são obtidas numericamente. O erro considerado, nestes casos, é o devolvido pelo programa depois de feito o ajuste em questão.

Em relação aos modelos testados, verificou-se que as curvas teóricas de $V(I)$ se ajustaram perfeitamente aos resultados experimentais. No entanto, o modelo é uma má aproximação pois, o gráfico de $b(T)$ obtido foi completamente diferente do esperado.

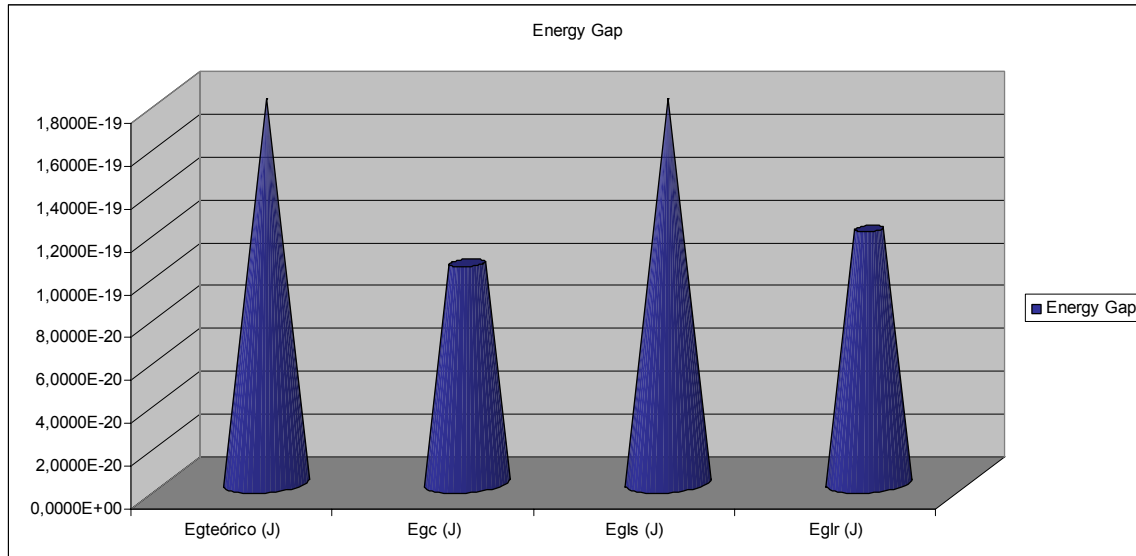
No segundo modelo, apesar dos ajustes das curvas teóricas se afastarem um bocado dos valores experimentais, sobretudo para correntes mais elevadas, os resultados obtidos foram bem mais satisfatórios que os do primeiro modelo.

Em ambos os modelos, o melhor ajuste que se conseguiu, foi o da temperatura ambiente, ou seja, quando a tensão auxiliar se encontrava desligada. Tal deve-se ao facto de a temperatura, neste caso, ser mais estável. Isto leva-nos a concluir que apesar de o termómetro indicar um valor estável durante as medições pode ter havido pequenas oscilações de temperaturas que foram imperceptíveis.

Ao se compararem as resistências da parte neutra do semiconductor em ambos os modelos, verifica-se que para as várias temperaturas os resultados são diferentes. Enquanto, para a primeira temperatura a diferença de resistências é relativamente reduzida, esta vai aumentando com a temperatura sendo, para o último valor de temperatura, a resistência dada pelo segundo modelo aproximadamente o dobro da do primeiro. Destes resultados é difícil tirar conclusões, uma vez que não existem valores nenhuns para comparação. No entanto, as resistências do segundo modelo serão mais verosímeis dado a melhor aproximação deste.

Em ambos os modelos foi possível estimar o fosso energético (E_g) para o elemento Si. Do primeiro modelo, através do ajuste de $C(T)$, retirou-se um valor, enquanto que no segundo modelo foi possível estimar duas vezes esta grandeza. Uma no ajuste de I_S e outro no de I_R . Os resultados obtidos

encontram-se sintetizados no diagrama seguinte, juntamente com o valor teórico.



Facilmente, se constata que o melhor valor obtido foi o retirado durante o ajuste de I_S (desvio à exactidão de 0,0591%), cobrindo o valor teórico com a margem de erro. De seguida, o segundo valor mais próximo é também retirado do segundo modelo, mas desta vez do ajuste do gráfico $I_R(T)$. Obteve-se neste caso um desvio exactidão bastante mais elevado de 33,8%. Este valor não cobre o valor teórico com a barra de erro experimental considerada. Tal deveu-se muito ao facto dos valores de I_R obtidos não serem muito bons, facto que pode ser constatado através do gráfico 17. Tal como foi dito anteriormente, este ajuste não se adaptou correctamente aos pontos experimentais, devendo, por isso, os resultados de serem vistos com alguma desconfiança. Por fim, o valor mais distante do teórico foi o obtido através do primeiro modelo, que apresenta um desvio à exactidão de 42,7%. Esta discrepância fica-se a dever à inadequação deste modelo para descrever correctamente a junção PN em questão.

Como fontes de erro é importante destacar as seguintes:

- Possibilidade do semiconductor em questão não ser de silício puro, contendo impurezas que alterem o fosso energético;
- A introdução de aparelhos de medida no circuito, bem como as próprias fontes de tensão podem alterar ligeiramente os valores medidos;
- Pequenas oscilações da temperatura podem ter ocorrido apesar da espera para se atingir um valor estável;

Bibliografia

- Aulas teóricas e protocolo do Professor Figueirinhas;
- www.wikipedia.org

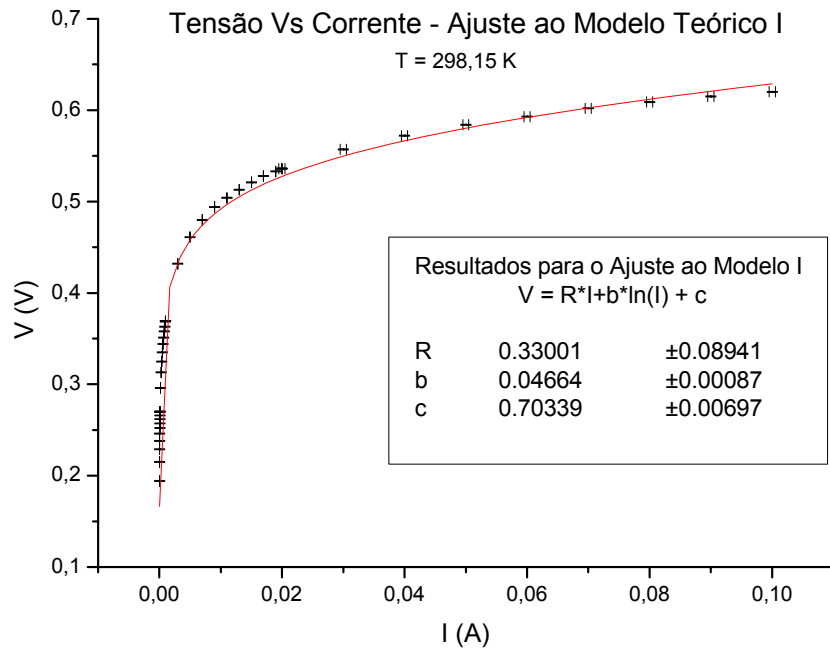


Gráfico 1: Ajuste do primeiro modelo para T=298,15K

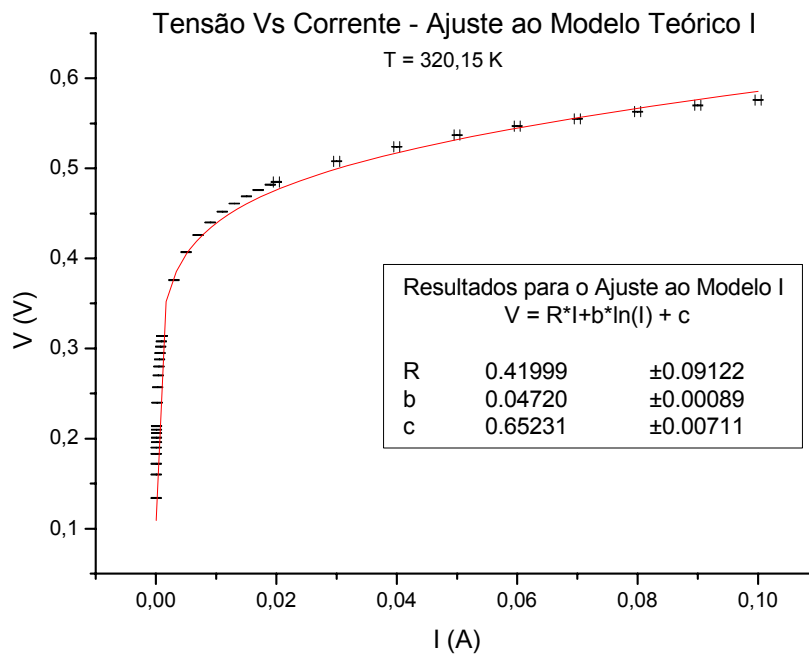


Gráfico 2: Ajuste do primeiro modelo para T=320,15K

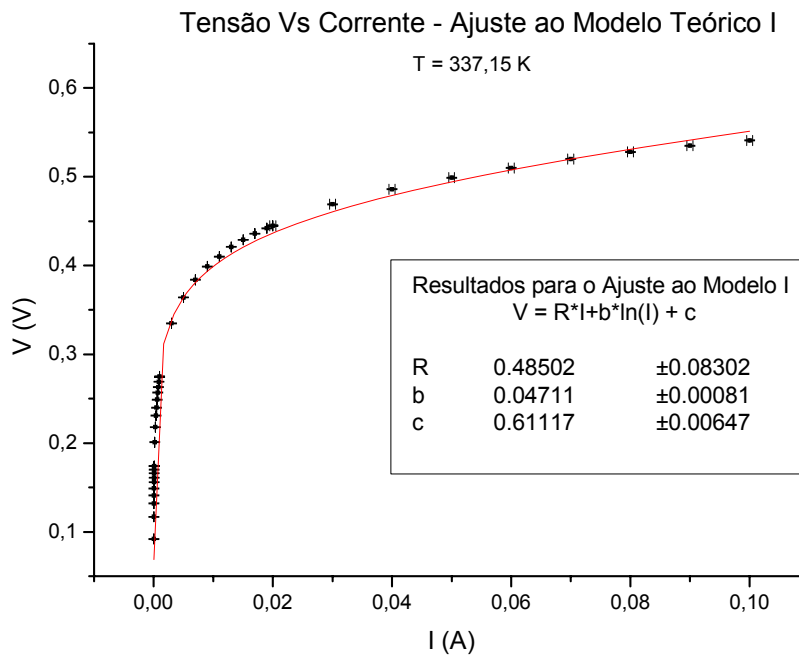


Gráfico 3: Ajuste do primeiro modelo para T=337,15K

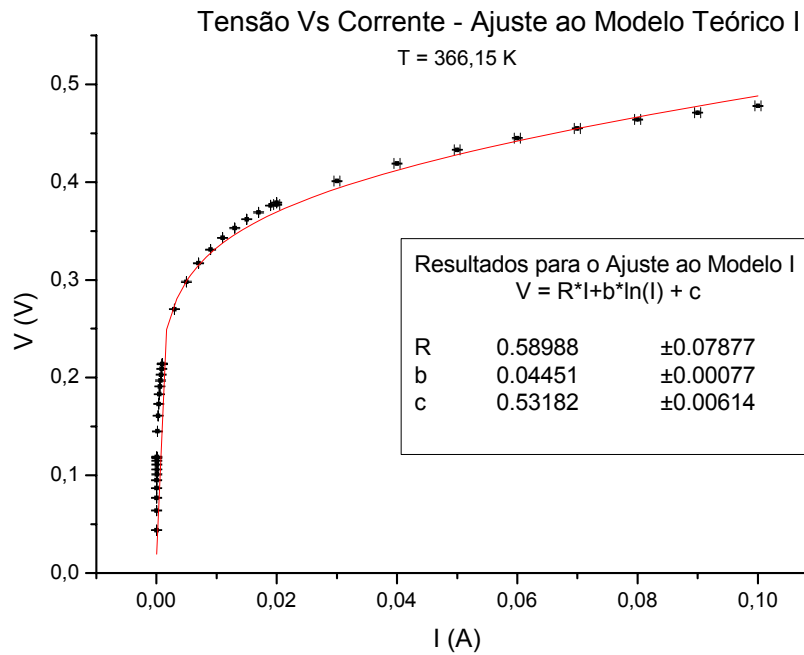


Gráfico 4: Ajuste do primeiro modelo para T=366,15K

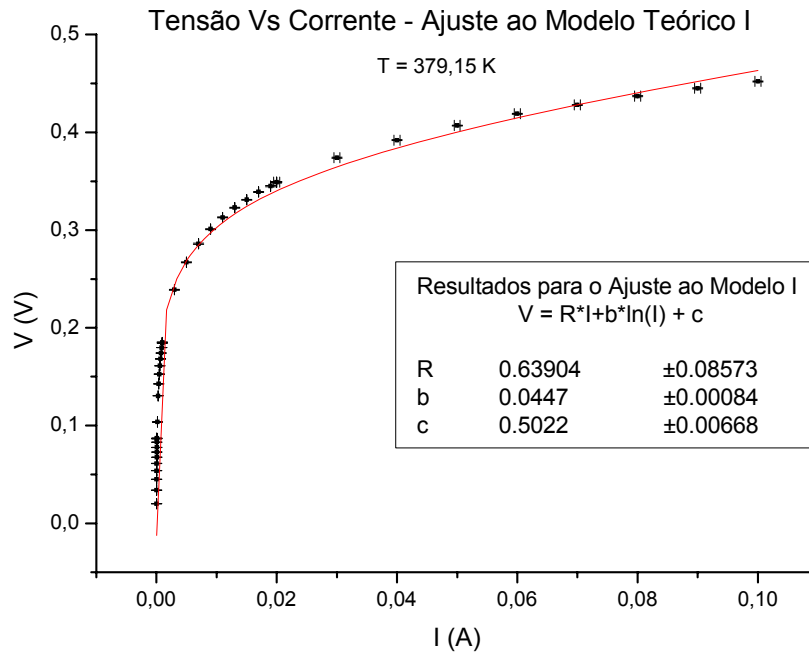


Gráfico 5: Ajuste do primeiro modelo para T=379,15K

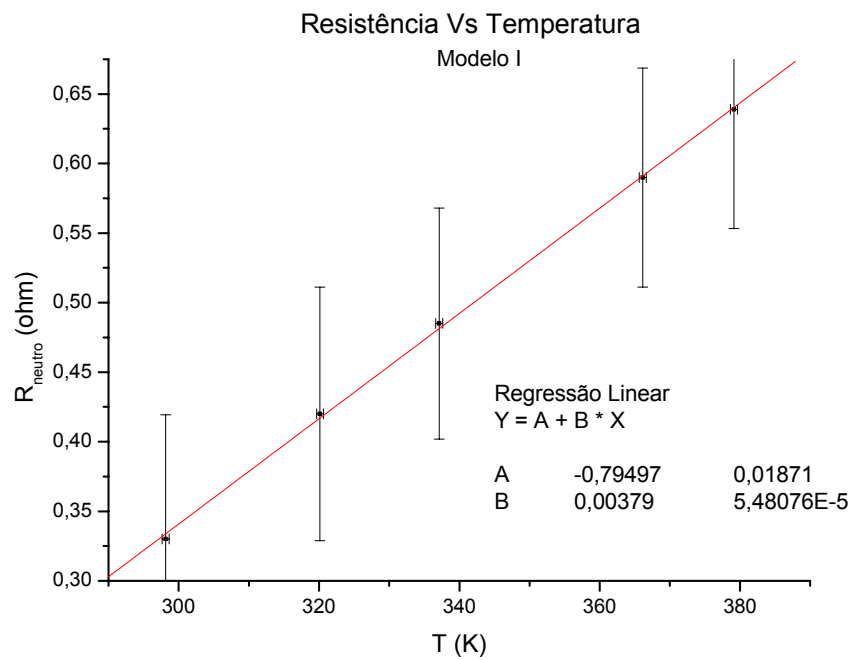


Gráfico 6: Resistência da parte neutra do semicondutor em função da temperatura para o 1º Modelo

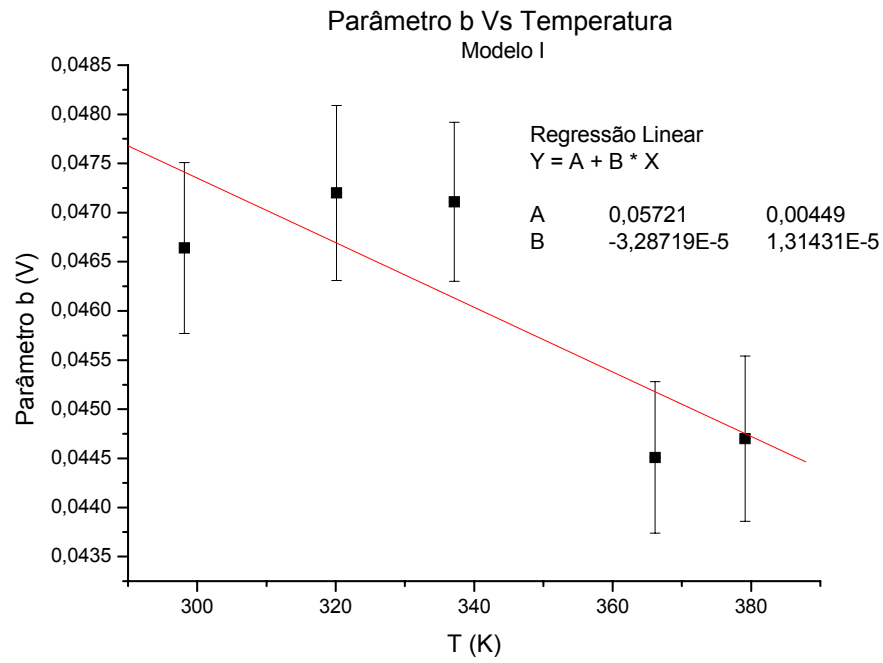


Gráfico 7: Parâmetro b em função da temperatura para o 1º Modelo

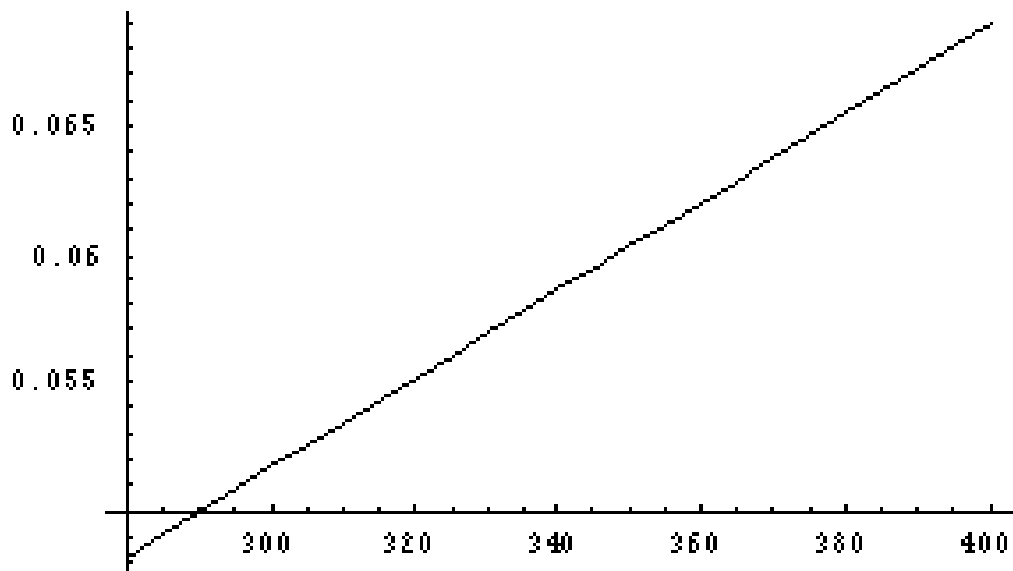


Gráfico 8: Recta teórica de b em função da temperatura

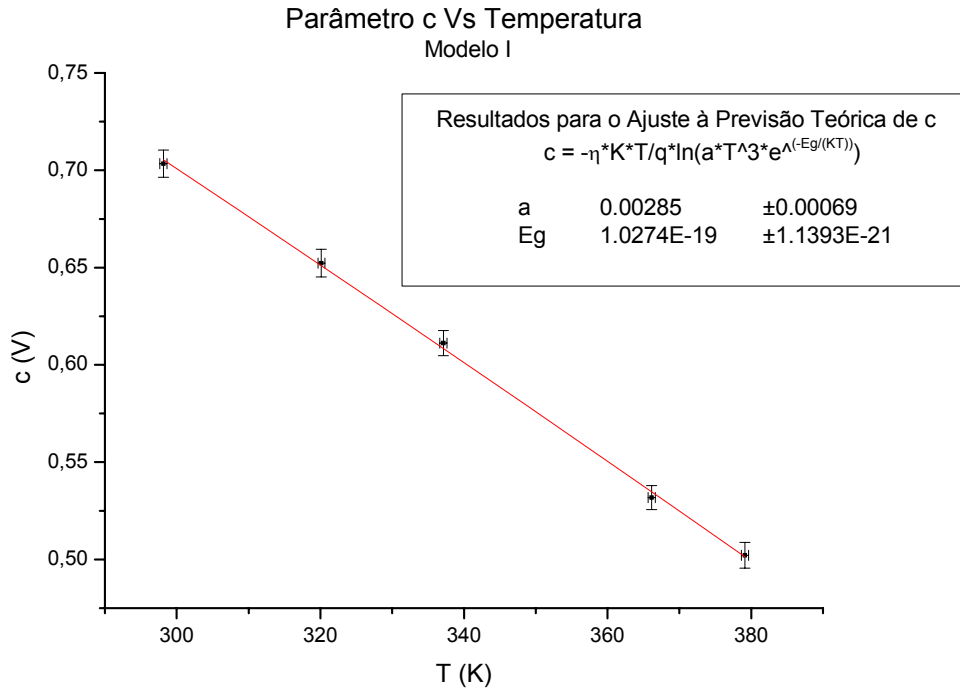


Gráfico 9: Parâmetro c em função da temperatura para o 1º Modelo

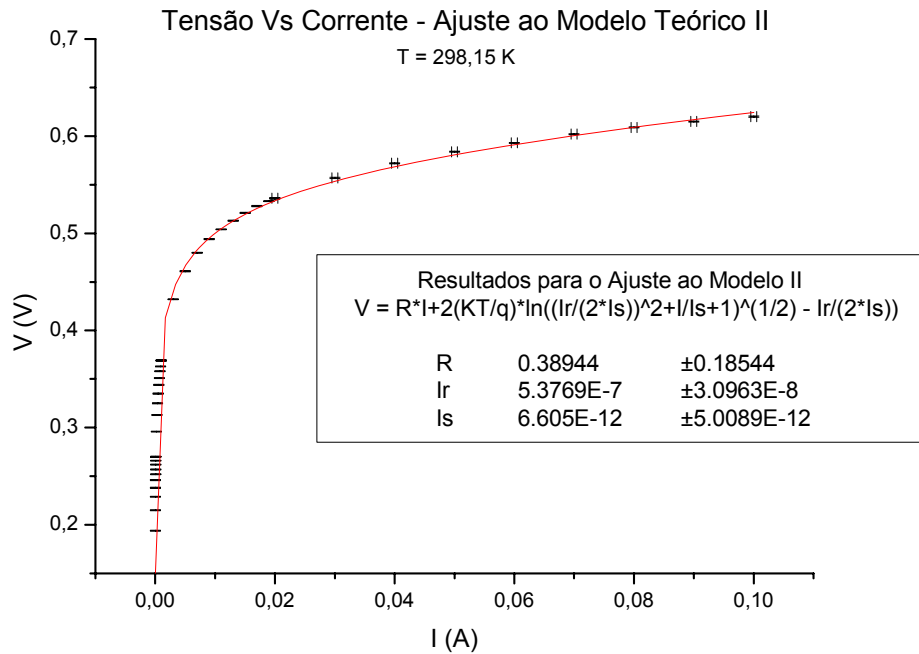


Gráfico 10: Ajuste do segundo modelo para T=298,15K

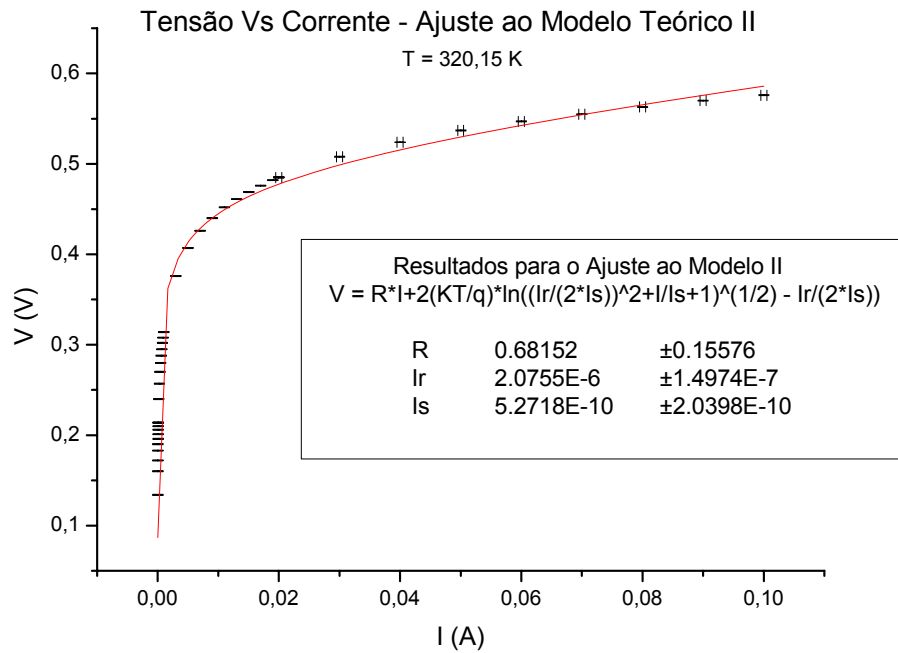


Gráfico 11: Ajuste do segundo modelo para T=320,15K

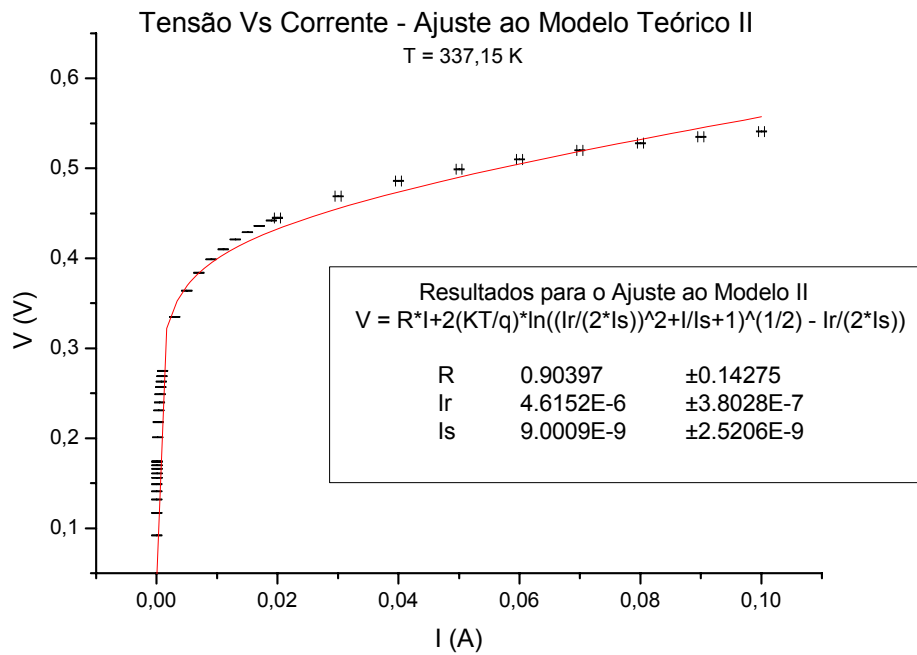


Gráfico 12: Ajuste do segundo modelo para T=337,15K

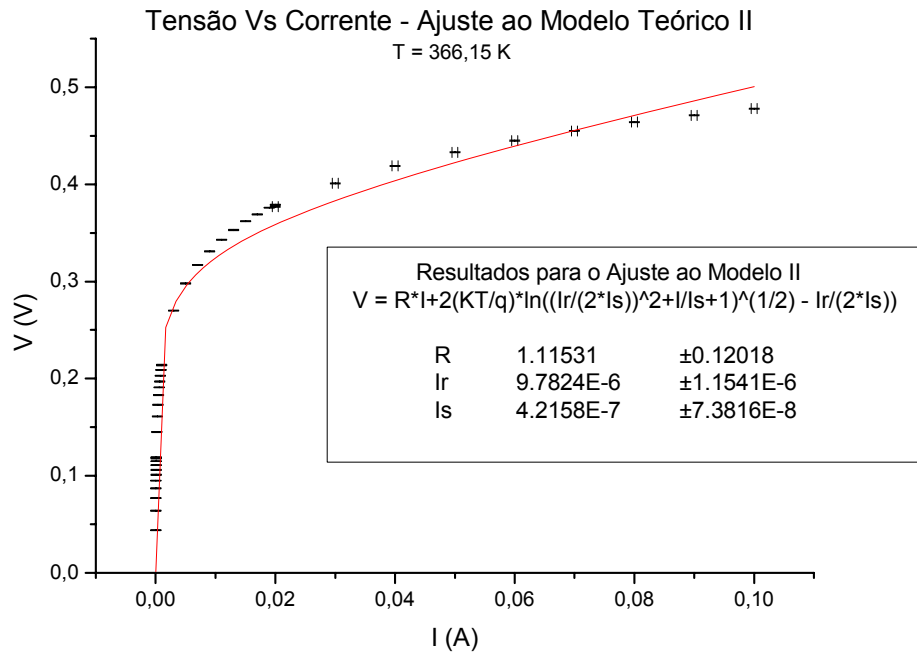


Gráfico 13: Ajuste do segundo modelo para T=366,15K

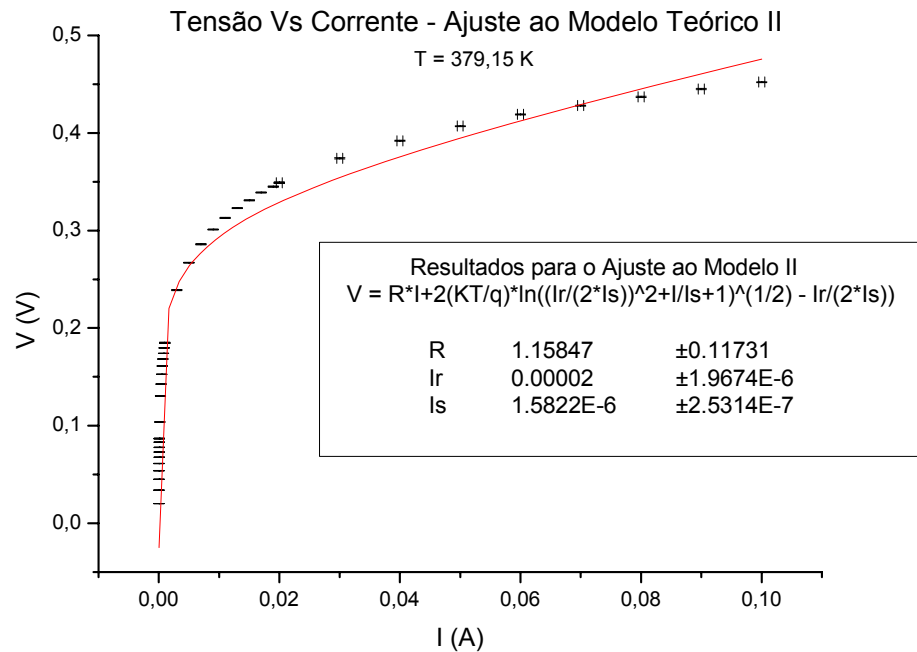


Gráfico 14: Ajuste do segundo modelo para T=379,15K

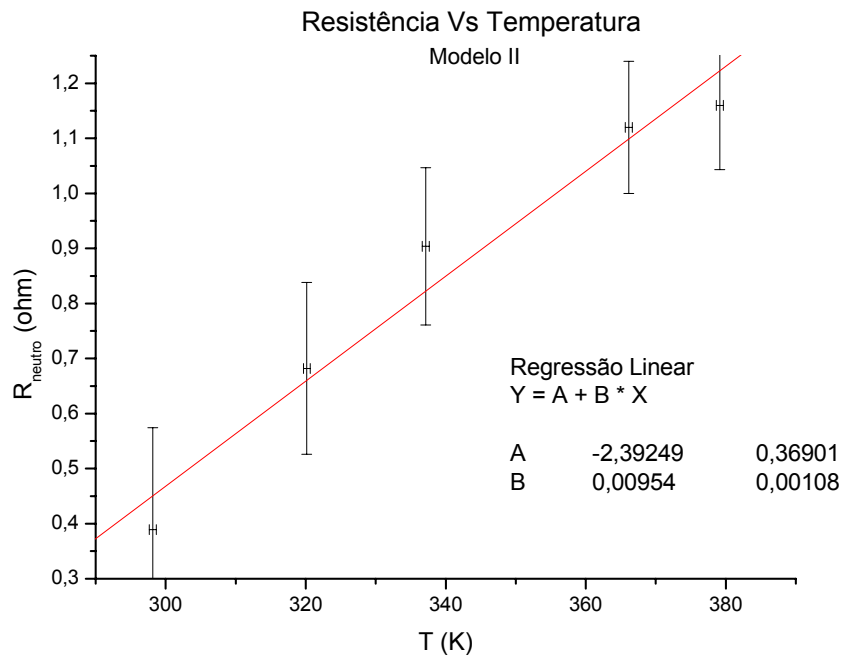


Gráfico 15: Resistência da parte neutra do semiconductor em função da temperatura para o 2º Modelo

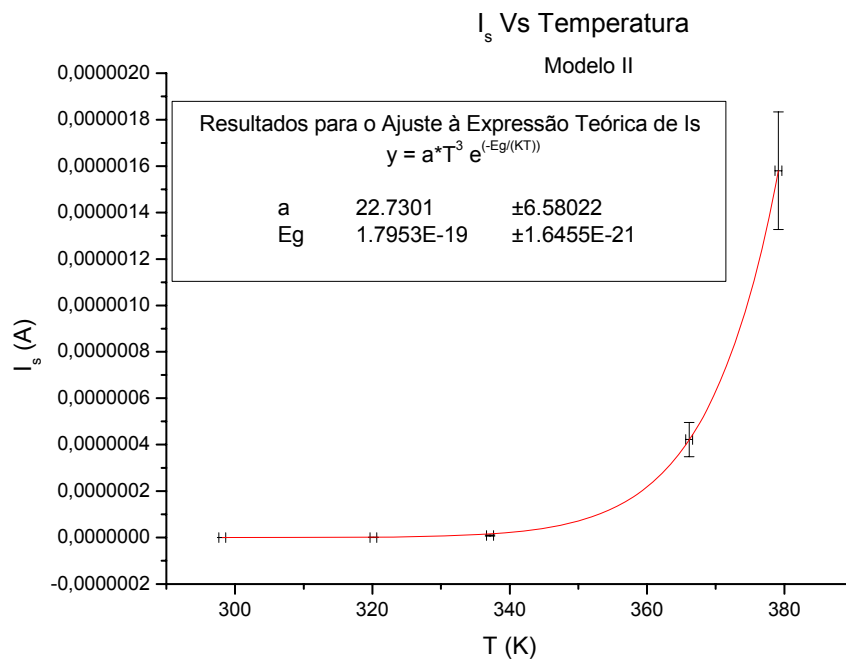


Gráfico 16: Valor de I_s no semiconductor em função da temperatura para o 2º Modelo

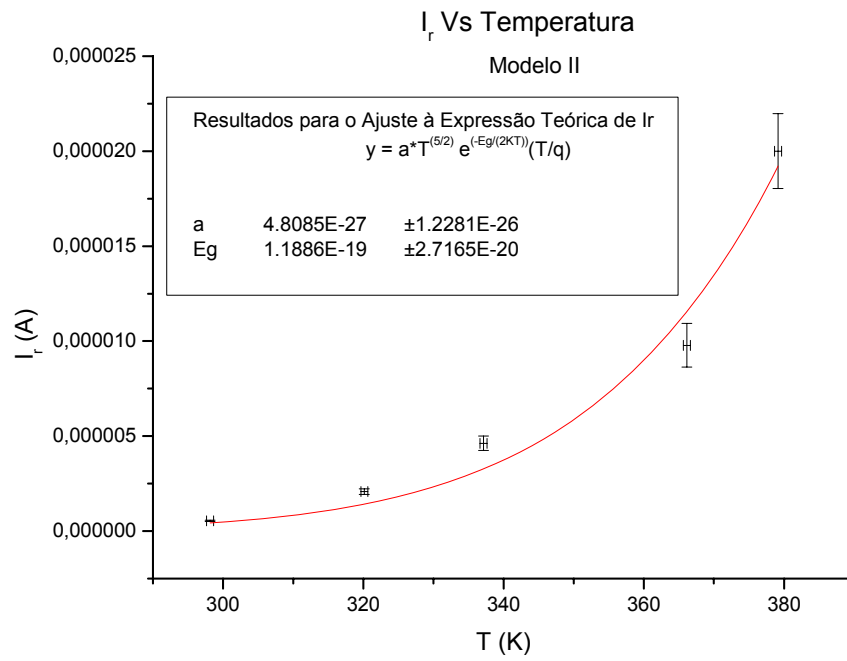


Gráfico 17: Valor de I_r no semiconductor em função da temperatura para o 2º Modelo

I (A)	ϵI (A)	R_1 (Ω)	ϵ_{R1} (Ω)	T = 25° (C)		T = 47° (C)		T = 64° (C)		T = 93° (C)		T = 106° (C)				
				Vaux = 0 V		Vaux = 9 V		Vaux = 12,6 V		Vaux = 17,9 V		Vaux = 20 V				
				V (V)	ϵ_V (V)	V (V)	ϵ_V (V)	V (V)	ϵ_V (V)	V (V)	ϵ_V (V)	V (V)	ϵ_V (V)			
1,0E-05	5,E-07	99900	50	0,194	0,0005	0,134	0,0005	0,092	0,0005	0,044	0,0005	0,0202	0,00005			
2,0E-05				0,215		0,160		0,117		0,064		0,0340				
3,0E-05				0,229		0,172		0,132		0,077		0,0452				
4,0E-05				0,238		0,183		0,141		0,087		0,0539				
5,0E-05				0,246		0,190		0,149		0,095		0,0613				
6,0E-05				0,252		0,196		0,156		0,101		0,0677				
7,0E-05				0,257		0,201		0,161		0,106		0,0729				
8,0E-05				0,262		0,206		0,166		0,111		0,0777				
9,0E-05				0,266		0,210		0,170		0,115		0,0832				
1,0E-04				0,270		0,214		0,174		0,119		0,0866				
1,0E-04		19900	50	0,270		0,214		0,174		0,118		0,118		0,118	0,0872	0,00005
2,0E-04				0,296		0,240		0,201		0,145		0,1038				
3,0E-04				0,313		0,257		0,218		0,161		0,1305				
4,0E-04				0,325		0,270		0,231		0,173		0,1427				
5,0E-04				0,335		0,280		0,240		0,183		0,1527				
6,0E-04				0,344		0,288		0,249		0,191		0,1613				
7,0E-04				0,351		0,295		0,257		0,197		0,1682				
8,0E-04				0,358		0,302		0,263		0,203		0,1742				
9,0E-04				0,363		0,308		0,269		0,209		0,1798				
1,0E-03				0,369		0,314		0,275		0,214		0,1848				
1,0E-03	997	0,5	0,369	0,314	0,275	0,214	0,214	0,214	0,185	0,0005						
3,0E-03			0,432	0,376	0,335	0,270	0,239									
5,0E-03			0,461	0,407	0,364	0,298	0,267									
7,0E-03			0,480	0,426	0,384	0,317	0,286									
9,0E-03			0,494	0,440	0,399	0,331	0,301									
1,1E-02			0,504	0,452	0,410	0,343	0,313									
1,3E-02			0,513	0,461	0,421	0,353	0,323									
1,5E-02			0,521	0,469	0,429	0,362	0,331									
1,7E-02			0,528	0,476	0,436	0,369	0,339									
1,9E-02			0,533	0,482	0,442	0,376	0,345									
2,0E-02	5,E-04	201	0,536	0,485	0,445	0,379	0,379	0,379	0,349	0,0005						
2,0E-02			0,536	0,485	0,445	0,377	0,349									
3,0E-02			0,557	0,508	0,469	0,401	0,374									
4,0E-02			0,572	0,524	0,486	0,419	0,392									
5,0E-02			0,584	0,537	0,499	0,433	0,407									
6,0E-02			0,593	0,547	0,510	0,445	0,419									
7,0E-02			0,602	0,555	0,520	0,455	0,428									
8,0E-02			0,609	0,563	0,528	0,464	0,437									
9,0E-02			0,615	0,570	0,535	0,471	0,445									
1,0E-01			0,620	0,576	0,541	0,478	0,452									

Tabela 1 - Registo dos valores de tensão para as diversas temperaturas e intensidades

T° (C)	ϵ_{T° (C)	R (Ω)	ϵ_R (Ω)	b (V)	ϵ_b (V)	c (V)	ϵ_c (V)
298,15	5,0000E-01	0,33001	0,08941	0,04664	0,00087	0,70339	0,00697
320,15	5,0000E-01	0,41999	0,09122	0,04720	0,00089	0,65231	0,00711
337,15	5,0000E-01	0,48502	0,08302	0,04711	0,00081	0,61117	0,00647
366,15	5,0000E-01	0,58988	0,07877	0,04451	0,00077	0,53182	0,00614
379,15	5,0000E-01	0,63904	0,08573	0,04470	0,00084	0,50220	0,00668

Tabela 2 - Registo dos valores calculados para o ajuste ao modelo I

T° (C)	ϵ_{T° (C)	R _{neutra} (Ω)	$\epsilon_{R_{neutra}}$ (Ω)	I _s (A)	ϵ_{I_s} (A)	I _r (A)	ϵ_{I_r} (A)
298,15	0,5	3,89E-01	1,85E-01	6,61E-12	5,01E-12	5,38E-07	3,10E-08
320,15	0,5	6,82E-01	1,56E-01	5,27E-10	2,04E-10	2,08E-06	1,50E-07
337,15	0,5	9,04E-01	1,43E-01	9,00E-09	2,52E-09	4,62E-06	3,80E-07
366,15	0,5	1,12E+00	1,20E-01	4,22E-07	7,38E-08	9,78E-06	1,15E-06
379,15	0,5	1,16E+00	1,17E-01	1,58E-06	2,53E-07	2,00E-05	1,97E-06

Tabela 3 - Registo dos valores calculados para o ajuste ao modelo I

Eg _{teórico} (J)	Eg _c (J)	ϵ_{Eg_c} (J)	Eg _{is} (J)	$\epsilon_{Eg_{is}}$ (J)	Eg _{ir} (J)	$\epsilon_{Eg_{ir}}$ (J)
1,7942E-19	1,0274E-19	1,14E-21	1,7953E-19	1,6455E-21	1,1886E-19	2,72E-20

Tabela 4 - Comparação dos vários Energy Gaps determinados com o valor teórico