

DIODO SEMICONDUTOR

INTRODUÇÃO

Materiais semicondutores são a base de todos os dispositivos eletrônicos. Um semicondutor pode ter sua condutividade controlada por meio da adição de átomos de outros materiais, em um processo chamado de dopagem. Em geral, os dopantes são inseridos em camadas no cristal semicondutor e, assim, diferentes dispositivos podem ser construídos dispondo-se adequadamente as camadas com os diferentes dopantes.

Um diodo semicondutor consiste numa junção de uma camada de semicondutor tipo n com outra de semicondutor tipo p . Num semicondutor tipo n , os portadores de carga — ou seja, as partículas que participam da condução elétrica — são elétrons livres, enquanto, num semicondutor tipo p , são buracos livres, de carga positiva. Em semicondutores dopados, os elétrons e os buracos são provenientes dos átomos dopantes. Na junção de um material tipo n com um tipo p , os elétrons próximos à junção difundem da região n para a p , enquanto os buracos difundem no sentido oposto. Quando esses elétrons e buracos se encontram, eles recombinam-se, deixando, na interface, uma região com os íons positivos e negativos dos dopantes. Essa região é desprovida de portadores de carga e é chamada região de depleção. Os íons criam um campo elétrico, nessa região, que impede a continuidade da difusão de elétrons e de buracos. Essa situação está representada na Figura 1a.

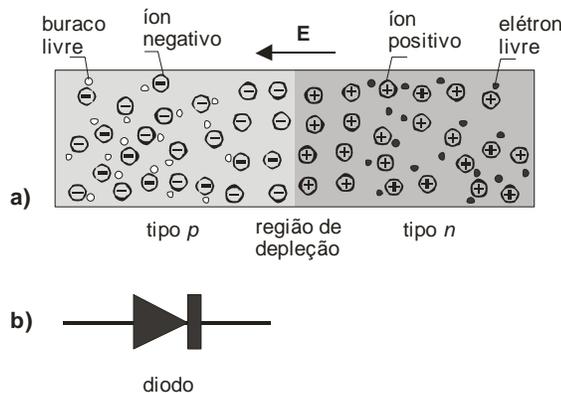


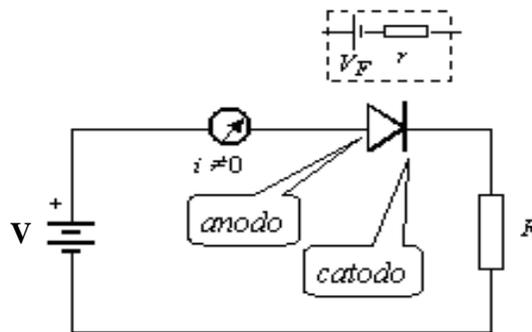
FIGURA 1 - Em (a) representa-se a junção de um semicondutor tipo p com um tipo n . Elétrons e buracos difundem-se através da interface, deixando apenas os íons dos dopantes nessa região. Esses íons produzem um campo elétrico que impede a continuidade do processo de difusão. Em (b) representa-se o símbolo de um diodo

Ao ser conectada a uma fonte de força eletromotriz, uma junção $p-n$ permite o fluxo de corrente apenas em um sentido — da região p para a região n . Considere a situação em que um

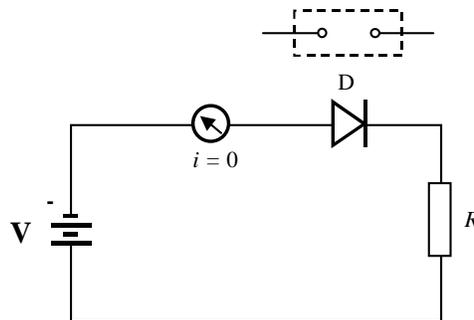
diodo está conectado a uma fonte de forma que a região tipo p está em um potencial mais alto que a tipo n . Essa configuração é chamada de polarização direta. A fonte, continuamente, injeta elétrons na região n , ao mesmo tempo em que remove outros elétrons — ou, equivalentemente, injeta buracos — na região p . Nessa situação, o campo elétrico da fonte tem sentido oposto ao campo dos íons na região de depleção. Essa região, então, estreita-se, facilitando o fluxo de cargas através da interface.

Por outro lado, diz-se que um diodo está com polarização reversa quando a região tipo p está em um potencial menor que a tipo n . Nesse caso, a região de depleção alarga-se, reduzindo, então, a corrente através do diodo.

A parte (a) da Figura 2 ilustra a situação em que o diodo é polarizado diretamente (anodo positivo em relação ao catodo). Na polarização direta com uma tensão superior à tensão V_F , chamada de tensão de corte, haverá corrente no circuito. Quando polarizado reversamente, como ilustrado na parte (b) da Figura 2, (anodo negativo em relação ao catodo), o diodo não permite a circulação de cargas, comportando-se como uma chave aberta.



(a) Polarização direta



(b) Polarização reversa

FIGURA 2 - Quando um diodo está alimentado com polarização direta, como em (a), pode haver uma corrente no circuito. Em polarização reversa, como em (b), o diodo comporta-se como uma chave aberta e não há corrente

O gráfico da corrente em um diodo semiconductor em função da tensão aplicada está esboçado na Figura 3.

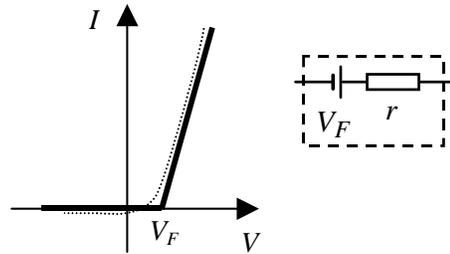


FIGURA 3 - Curva característica do diodo: em polarização reversa ($V < 0$ no gráfico), a corrente é praticamente nula; quando polarizado diretamente com $V > V_F$, o aumento da corrente segue aproximadamente uma reta, e o diodo pode ser considerado um resistor de pequena resistência em série com uma fonte de tensão

Teoricamente, a dependência $I(V)$ de um diodo é dada pela equação de Ebers-Moll:

$$I = I_s \cdot [\exp(V / \eta V_T) - 1] \quad (1)$$

que, para $V > 0,1$ V, pode ser aproximada por

$$I \approx I_s \cdot \exp(V / \eta V_T) \quad (2)$$

em que I_s é uma pequena corrente, aproximadamente constante, que aparece em polarização reversa e η é o chamado “fator de idealidade” que depende da fabricação do diodo (tipo de material, dopagem etc.). V_T é uma constante de origem térmica dada por

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{1,38 \times 10^{-23}}{1,60 \times 10^{-19}} T \rightarrow V_T = \frac{T}{11600}$$

em que k é a constante de Boltzmann, q é a carga do elétron e T é a temperatura absoluta (Kelvin). Assim, à temperatura ambiente ($27^\circ\text{C} \approx 300$ K), $V_T \approx 26$ mV.

Diodo emissor de luz

Há diversos dispositivos formados a partir de uma junção $p-n$. Um exemplo muito comum são os LED's, ou diodos emissores de luz (*light emitting diodes*). Em junções construídas com materiais como arseneto de gálio (GaAs) ou nitreto de gálio (GaN), as recombinações de elétrons e

buracos causam a emissão de radiação eletromagnética na faixa de frequência do visível (ou próximas a ela). Este efeito é denominado eletroluminescência e é utilizado nos LED's, que podem ser fabricados para emitir radiação em diferentes cores, desde o infravermelho ao ultravioleta.

O símbolo e a pinagem típica de um LED estão ilustrados na Figura 4.

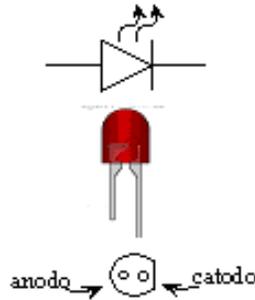


FIGURA 4 - Símbolo e pinagem de um *light* LED: a parte superior mostra como ele é simbolizado, e a parte inferior mostra o diodo visto por baixo com a caracterização do anodo e do catodo.

A energia dos fótons emitidos por eletroluminescência é dada por $E = hf$, sendo f a frequência da radiação emitida e h a constante Planck. Esta energia é proporcional à tensão de corte do diodo, isto é, $E = q \cdot V_F$, em que $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C é a carga elementar. Desta forma, pode-se relacionar o comprimento de onda da luz emitida por um LED com sua tensão de corte através da relação

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = qV_F \quad (3)$$

em que c é a velocidade da luz.

A Tabela 1 mostra os elementos semicondutores utilizados, suas tensões de corte (V_F) e os comprimentos de onda da emissão luminosa predominante (λ) de alguns LED's. Há variações entre os modelos comerciais.

TABELA 1

Dados típicos de LED's comerciais

Cor	Material	λ (nm)	V_F (V)
Azul	InGaN	470	3,6
Verde	GaP	565	2,1
Amarelo	GaAsP/GaP	585	2,1

Vermelho	GaAIAs	660	1,8
----------	--------	-----	-----

PARTE EXPERIMENTAL

Objetivos

- Observar o comportamento de um LED em polarização direta e reversa e levantar sua curva característica $I \times V$.
- Medir o comprimento de onda da luz emitida por um LED e determinar o valor da constante de Planck.

Material utilizado

- 1 fonte de tensão CC (0 a 25V), 2 multímetros digitais, 1 painel de ligação, cabos, 1 LED, 1 resistor de 220Ω , 1 espectrômetro.

Procedimento

Atenção: veja, sobre a bancada, as informações referentes às tensões e correntes máximas permitidas para o LED utilizado, pois valores superiores ao indicado poderão danificá-lo.

Características elétricas de um LED

- Monte o circuito da Figura 5 com o voltímetro, inicialmente, sobre a fonte de alimentação. Chame o professor para conferir. Ajuste a tensão da fonte (não a do diodo!) para 5 V. Observe a leitura do amperímetro e a luminosidade do LED. Inverta o LED no circuito e identifique quais são as posições para polarização direta e reversa.

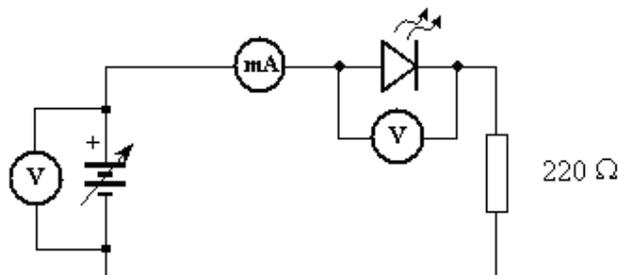


FIGURA 5 - Circuito para obtenção da curva característica do diodo

- A corrente no circuito da Figura 5 pode ser calculada por $I = (V - V_F) / R$. Calcule esta corrente

para os valores sugeridos na montagem da figura e compare com o valor medido para a polarização direta.

- Ajuste a fonte para a menor tensão possível e, em seguida, conecte o voltímetro aos terminais do LED. Varie a tensão na fonte até que a tensão **sobre o LED** seja de, aproximadamente, 1,3 V. Varie lentamente a tensão e registre pares de valores da tensão V sobre o LED e da corrente I , tendo o cuidado em obter uma boa definição da curva nas proximidades de V_F (veja Figura 3). Evite registrar pontos para correntes acima de 10 mA.
- Tendo como base a relação aproximada entre I e V (equação 2), obtenha, por meio de uma análise gráfica, os valores das constantes I_s e η , com os respectivos erros e unidades.

Apenas como uma referência comparativa, a corrente de saturação reversa I_s pode estar na faixa de 10^{-4} a 10^{-17} A e o fator de idealidade, próximo de 2 (LED vermelho).

- Como já foi comentado e ilustrado, para efeito de análise, pode-se considerar que o diodo é constituído por uma fonte de tensão V_F em série com uma resistência r . Ajuste manualmente uma reta sobre a parte aparentemente retilínea da curva $I \times V$ e determine os valores de V_F e de r .

Determinação da Constante de Planck

Procedimento

Neste experimento será utilizado um espectrômetro simples, ilustrado na Figura 6, apropriado para medir comprimento de onda de luz visível. A luz a ser analisada entra por um orifício e incide em uma rede de difração que separa o feixe original em suas componentes de diferentes cores. Ao se olhar dentro do espectrômetro, as raias luminosas são visualizadas sobre uma escala pré-calibrada o que permite a leitura dos correspondentes comprimentos de onda.

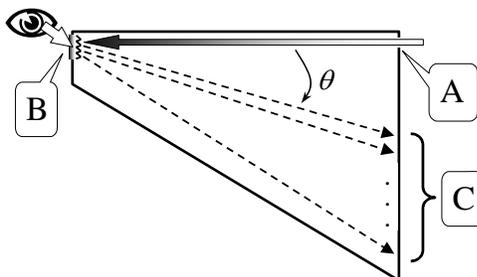


FIGURA 6 - Espectrômetro. “A” é uma janela para entrada de luz. Em “B” há, além de uma abertura para observação, uma rede de difração (transparente) refletora. Em “C” há uma escala calibrada para a leitura do comprimento de onda.

- Inicialmente, familiarize-se com o espectrômetro, observando a emissão das lâmpadas fluorescentes. Será possível observar raias próximas a 403 nm (violeta), 435 nm (azul), 546 nm (verde) e 578 nm (amarelo). A resolução das raias pode ser melhorada ajustando-se o tamanho do orifício para a entrada de luz.
- Acenda o LED, observe a luz emitida por ele com o espectrômetro e meça o comprimento de onda da faixa de luz predominante.
- Utilizando a equação 3, determine o valor da constante de Planck. Compare com o valor esperado ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$).

Bibliografia adicional

SZE, S. M. *Physics of Semiconductors Devices*. 2. ed. New York: John Wiley, 1981. (Capítulo 12 - LED and Semiconductor Lasers)