



## Teoria - Determinação da constante de Planck

### Objetivos

- Levantamento da curva ( $I \times V$ ) para um LED.
- Medição do comprimento de onda de LEDs comerciais.
- Estudo da lacuna de energia de um LED.

### Introdução

Após a publicação de Einstein sobre o efeito fotoelétrico em 1905<sup>1</sup> propôs-se que algum mecanismo quântico deveria estar associado à emissão de luz. É muito difícil investigar este mecanismo em lâmpadas incandescentes, devido à largura do espectro de emissão e flutuação térmica. Por outro lado, com o desenvolvimento dos diodos emissores de luz (LED – Light Emitting Diodes) cujos espectros de emissão são restritos a um intervalo estreito de comprimentos de onda, ficou bem mais fácil demonstrar a existência de processos quânticos na emissão de luz.

Nesta experiência, buscamos justamente determinar o valor da constante de Planck, combinando informações obtidas a partir da curva característica de *corrente x tensão* de LEDs de diferentes cores.

### Fundamentos

Um LED consiste de uma junção  $P-N$  conforme descrito na seção 43.7 do livro texto [1]. Quando tal junção é formada, há uma difusão de cargas negativas (elétrons) do lado  $N$  para o lado  $P$  e de buracos no sentido contrário, constituindo uma *região de depleção* envolvendo a junção, com excesso de cargas em ambos os lados da junção: negativas de um e positivas de outro. Isto dá origem a uma *diferença de potencial* eletrostático,  $V_0$  que eventualmente termina o processo de difusão de portadores de carga através da junção. Resulta que o lado  $N$  fica *positivo* com relação ao lado  $P$  (Veja a Fig. 43.25 do livro-texto. [1].)

<sup>1</sup> A. Einstein recebeu o prêmio Nobel de Física de 1921 por “seus trabalhos em física teórica e, especialmente, pela sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico.”

Se a junção for polarizada *no sentido reverso*, ou seja, com o pólo positivo da bateria ligado ao lado *N* da junção e o pólo negativo ligado ao lado *P*, fazemos por *aumentar* esta barreira, tornando ainda mais difícil a condução de corrente. Se, por outro lado, for aplicada à junção uma *polarização direta* (Veja a Fig. 43.26 de [1].) a barreira diminui, dando lugar à condução de corrente. Este é o princípio de funcionamento de um diodo semiconductor.

Se os efeitos térmicos e de difusão de portadores minoritários *não* fossem considerados, a condução da corrente de polarização só seria iniciada quando a energia ganha pelos elétrons da corrente impulsionada pela bateria fosse *maior* que a barreira de potencial eletrostático na junção, ou seja,  $V > V_0$ . Uma vez iniciada a condução, a relação entre a corrente a tensão seria dada por:

$$I = \frac{V - V_0}{R}$$

onde  $R$  é a resistência elétrica total do diodo, incluindo a resistência intrínseca do semiconductor, bem como a resistência de contato. Teríamos, então, um comportamento como o descrito pela figura 1a. No entanto, quando estes efeitos são levados em conta, há uma pequena corrente  $I_0$  através da junção, mesmo na polarização inversa.

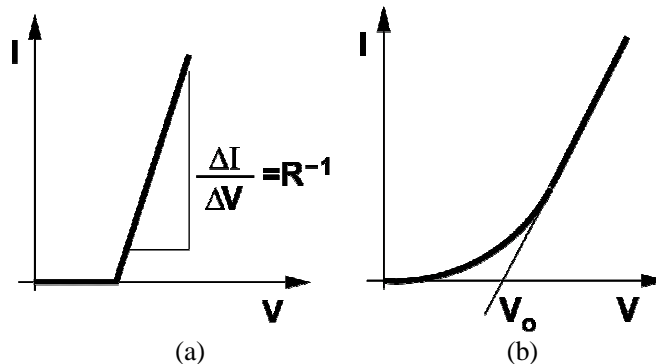


Figura 1 - Forma da curva  $I \times V$  caso pudessem ser desprezados os efeitos de difusão e resistência elétrica (a) e com estes efeitos incluídos (b).

Já com a polarização direta, a corrente cresce exponencialmente a partir de  $V = 0$ , aproximando-se assintoticamente da reta:

$$V = V_0 + RI \quad V \gg V_0$$

(Veja a Fig. 43.28 de [1].) A curva *real*, então, assemelha-se a vista na figura 1b. Portanto, a partir da curva característica de um diodo podemos estimar o valor de  $V_0$ , o potencial da barreira, traçando uma reta assintótica à curva, na região  $V \times V_0$  e verificando o ponto onde ela cruza o eixo  $I = 0$ .

LED

Na polarização direta, os elétrons são injetados pelo lado *N* e se movem para a junção, onde ocorre a recombinação com buracos que se deslocam para ali pelo lado *P* na direção contrária (figura 2). Os buracos são gerados por elétrons que abandonam o diodo em movimento para o pólo positivo da bateria. Na recombinação *elétron-buraco*, a energia do elétron é liberada na forma de radiação eletromagnética (com a emissão de um *fóton*), ou por vibração da rede cristalina (com a emissão de um *fônon*). Os LEDs são feitos de semicondutores “diretos” para os quais o *máximo da banda de valência* - onde os portadores de carga são os *buracos* - e o *mínimo da banda de condução* - onde os portadores de carga são os elétrons - ocorrem para o mesmo valor do número de onda quântico ( $\vec{k}$ ) ou momento ( $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ). Para este caso, leis de conservação de momento e energia predizem que os elétrons e buracos venham a se recombinar favorecendo a emissão de fótons. Nos assim chamados semicondutores “indiretos” isto não ocorre e parte da energia liberada na recombinação elétron-buraco é dissipada na rede cristalina, para que haja conservação de momento. Por esta razão, diodos comuns esquentam, mas praticamente não emitem luz.

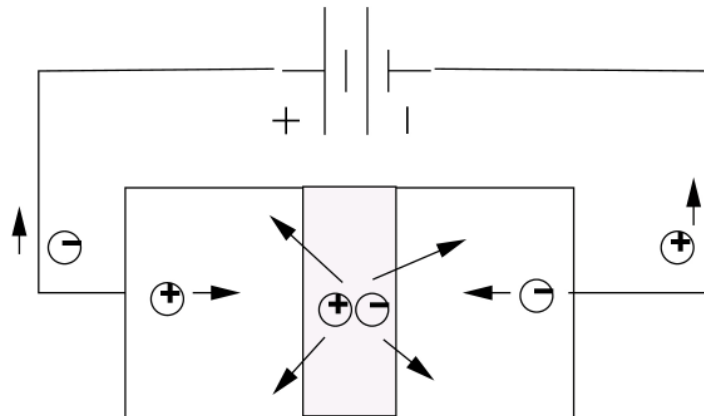


Figura 2 - Um diodo *diretamente* polarizado tem a região *P* conectada ao pólo *positivo* da bateria e a região *N* ligada ao pólo *negativo* da bateria. Neste arranjo, há passagem de corrente e o processo de recombinação *elétron-buraco* provoca a emissão de luz.

Nos LEDs, a energia do fóton emitido ( $hf$ ) está relacionada com a barreira de potencial na junção pela expressão:

$$eV_0 = hf + C$$

onde a constante  $C$  inclui perdas adicionais devidas a potenciais de contato causados pelos materiais diferentes da junção. Assim, determinando  $V_0$  e o valor da frequência  $f$  no centro da curva de emissão, para LEDs de diferentes tipos (diferentes cores), podemos determinar um valor aproximado para a *Constante de Planck*  $h$ , a partir da inclinação da reta  $V_0 \times f$ , ou seja:

$$h = \frac{\Delta V_0}{\Delta f} e$$

Referências mais aprofundadas podem ser encontradas em [2] e [3].

## A Experiencia

O trabalho prático consiste, então, em primeiro determinar  $V_0$  para diferentes tipos de diodo, a partir de suas curvas características, levantadas com um circuito simples e as frequências no centro de seus espectros correspondentes, através de um espectroscópio.

Na determinação de  $f$  é importante levar em conta que o espectro de um LED não é formado por linhas distintas, bem determinadas. Ao invés, observamos no espectroscópio uma banda contínua de frequências, distribuídas ao redor de um máximo central, que corresponde à emissão mais intensa (figura 3). Uma complicação adicional está no fato que o material que envolve o LED (geralmente epoxy) pode provocar o surgimento de bandas difusas, que devem ser desconsideradas.

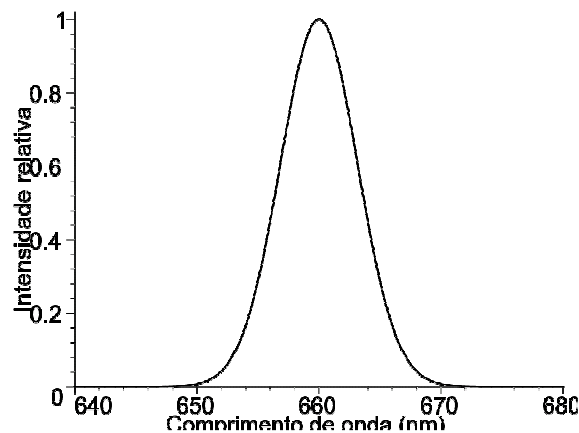


Figura 3 - Espectro de emissão típico para um LED de GaAsP.

## Referências

- [1] SERWAY, R. A. Física 4 - Física Moderna, Relatividade, Física Atômica e Nuclear, 3a ed. Livros Técnicos e Científicos Editora.
- [2] BERGH, A. A.; Dean, P. J. Light Emitting Diodes. Oxford Clarendon Press, 1976.
- [3] BHALTACHARYA, P. Semiconductor Opto-Electronics Devices, Cap. 5. Prentice-Hall, 1994.