

TUNELAMENTO RESSONANTE EM POÇOS QUÂNTICOS

OLIVEIRA, David Marçal Machado de ¹; **SOUZA**, Márcio Adriano R. ².

Palavras-chave: Tunelamento, poços quânticos, heteroestruturas.

1 INTRODUÇÃO (justificativa e objetivos)

Tem sido crescente o interesse nas propriedades opto-eletrônicas de heteroestruturas semicondutoras com dimensionalidade reduzida. Dispositivos semicondutores com princípio de funcionamento baseado nessas propriedades, tais como, fotodetectores, moduladores, diodos emissores de luz e lasers, possuem as mais diversas aplicações. Para compreendermos as propriedades ópticas dos materiais semicondutores e as características operacionais desses dispositivos, de tal forma que possamos desenvolver novos dispositivos, temos que compreender seus aspectos fundamentais. Para isso devemos investigar a dinâmica desses portadores. O tunelamento é uma das mais espetaculares manifestações da mecânica quântica sobre as propriedades macroscópicas da matéria. Atualmente, ele tem sido estudado teórica e experimentalmente a partir de heteroestruturas semicondutoras crescidas artificialmente, revelando ser de grande importância tanto devido aos aspectos básicos relacionados à mecânica quântica como para aplicações em dispositivos de alta velocidade. A excitação de um sistema com um pulso de laser, com dispersão suficiente, permite criar pacotes de onda que são uma superposição linear dos auto-estados do sistema.

2 METODOLOGIA

Foi feito um estudo sobre os princípios da teoria quântica, resolvendo-se os problemas da partícula livre, partícula em um poço de potencial infinito e finito, partícula incidente sobre uma barreira e poços quânticos duplo. Estudamos as propriedades básicas dos materiais semicondutores, das heteroestruturas semicondutoras e da física do estado sólido, aplicando os conhecimentos adquiridos para investigar o tunelamento ressonante de elétrons em poços quânticos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O nosso sistema 1(b) consiste de dois poços quânticos, um mais largo de largura d_1 e o outro mais estreito de largura d_2 , separados por uma barreira de largura L [1]. As concentrações de alumínio, x e y , e as larguras dos poços foram escolhidas de tal forma que o nível de energia do elétron, no estado fundamental, em cada poço isolado, sejam iguais: $E_1 = E_2 = E_0$.

Na presença de tunelamento, os níveis E_1 e E_2 não são estacionários [2]; os auto-estados de um sistema ideal de dois poços são dados, aproximadamente, pela combinação

¹Voluntário de iniciação científica. Instituto de Física. david@fisica.grad.ufg.br

²Orientador, Instituto de Física, UFG, marcio@fis.ufg.br

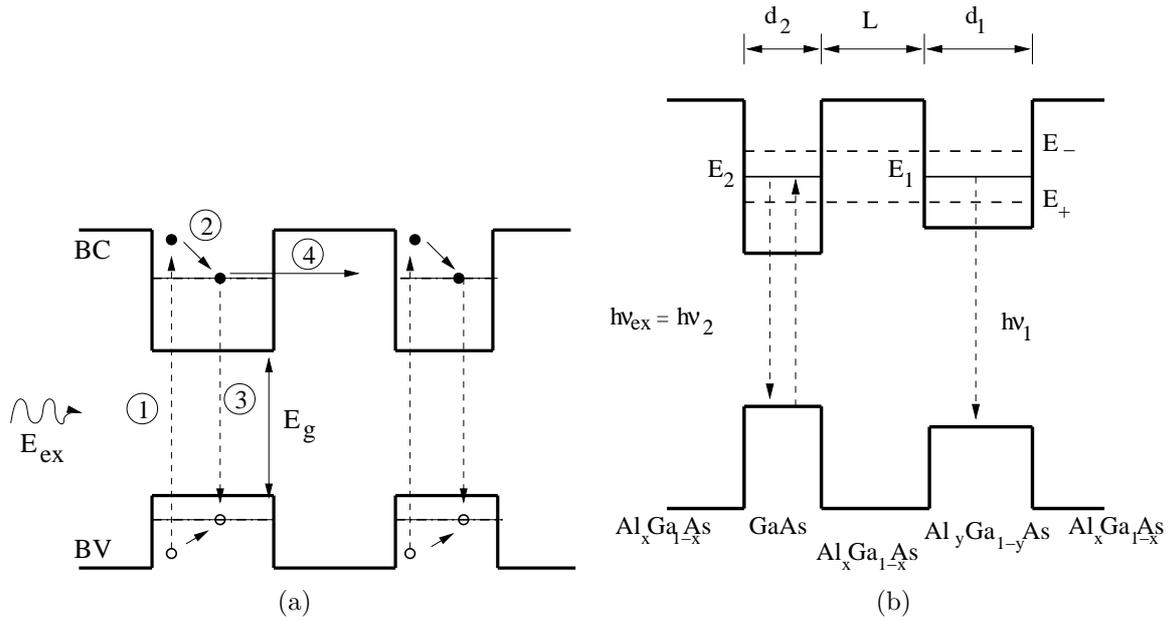


Figura 1: (a) Dinâmica de um portador em um poço quântico excitado por um pulso de um laser e (b) diagrama de banda esquemático de uma estrutura proposta para observação direta da evolução temporal.

simétrica e anti-simétrica dos estados de cada poço isolado $|1\rangle$ e $|2\rangle$:

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle + |2\rangle); \quad |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle - |2\rangle). \quad (1)$$

As funções simétricas e anti-simétricas são auto-estados do sistema. A combinação linear delas irá depender do tempo resultando no seguinte:

$$|t\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle e^{-iE_+t/\hbar} - |-\rangle e^{-iE_-t/\hbar}). \quad (2)$$

Resolvendo-se a equação de autovalores para as funções simétricas e anti-simétricas temos:

$$\langle \pm | H | \pm \rangle = E_{\pm} \langle \pm | \pm \rangle \quad (3)$$

A variação da energia é dada por

$$\Delta E = E_- - E_+ \equiv \hbar\omega > 0. \quad (4)$$

Podemos, então, reescrever as energias da seguinte forma [3]:

$$E_{\pm} = E_0 \pm \frac{\Delta E}{2}. \quad (5)$$

A evolução temporal dos estados será dada pela expressão,

$$|t\rangle = e^{-iE_0t/\hbar} \left(|2\rangle \cos \frac{\omega t}{2} + i|1\rangle \sin \frac{\omega t}{2} \right), \quad (6)$$

O período de tunelamento é a metade do período de oscilação do elétron e é dado por:

$$\tau_{tun} = \frac{\tau_{osc}}{2} = \frac{\hbar}{2\Delta E} \quad (7)$$

Uma boa aproximação que nos permite descrever o sistema de poços quânticos duplos analiticamente é a de dois poços infinitos. Para isso, vamos supor que um dos poços esteja deslocado de forma que penetre no interior do outro 2(a). As larguras dos poços são iguais $d_1 = d_2 = L$ e L_b é a quantidade que um poço penetrou no outro.

A diferença de energia, considerando a aproximação por dois poços infinitos, é:

$$\Delta E = 2V_0 \left[\left(1 - \frac{d}{L}\right) \cos\left(\frac{\pi d}{L}\right) + \frac{1}{\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi d}{L}\right) \right]. \quad (8)$$

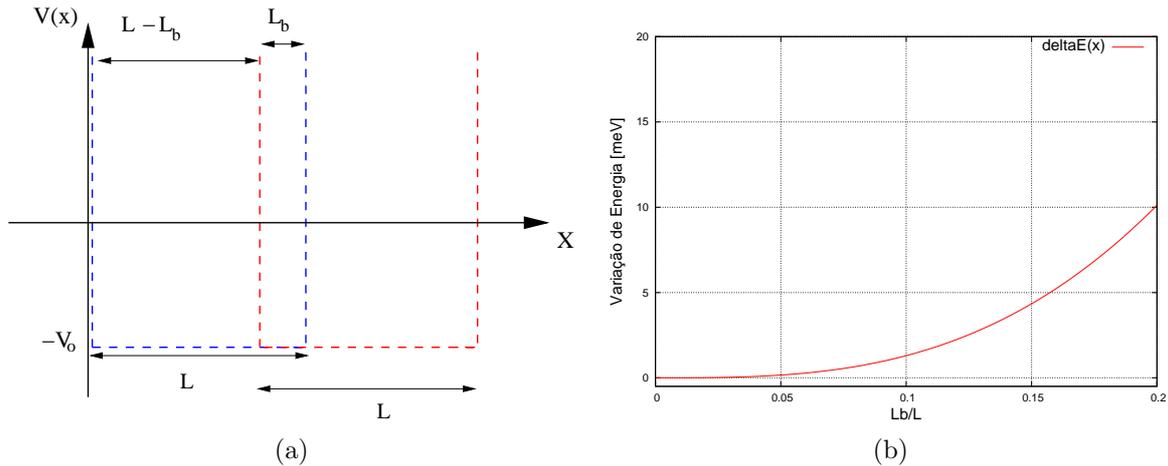


Figura 2: (a) Dois poços infinitos de mesma largura L “acoplados” por uma quantidade L_b e (b) gráfico da variação de energia pelo valor adimensional L_b/L em poços quânticos infinitos.

4 Conclusão

O sistema de poços duplos considerado possui auto-estados que são a função de onda simétrica e anti-simétrica. A combinação linear desses auto-estados irá depender do tempo. A partir disto chegamos na evolução temporal do sistema e obtemos o período de tunelamento do elétron. O tunelamento ocorre pois, os estados nos poços são ressonantes e por a energia de interbandas ser diferente em cada poço. Isso permite excitarmos os elétrons em um ou em outro poço. Realizamos uma aproximação do sistema de poços quânticos duplos por poços quânticos infinitos para tentar obter o período de tunelamento. Porém, esta aproximação fica errada se não considerarmos uma sobreposição dos poços quânticos infinitos. Consideramos, então, uma sobreposição 16% dos poços infinitos de largura $L = 150 \text{ \AA}$ e encontramos um período de tunelamento de 7,8 ps.

Referências

- [1] S. Luryi, “Possibility of a direct observation of the time evolution in heterostructure barrier tunneling,” *Solid State Commun*, vol.65, pp.787-789, (1989).
- [2] S. Luryi, *IEEE J. Quantum Electr.* *QE* 27, 54 (1991).
- [3] G. Bastard, *Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures*; Les Editions de Physique, Les Ulis (1990).