

TUNELAMENTO EM HETEROESTRUTURAS SEMICONDUTORAS MENDES, Udson Cabral¹; LEÃO, Salviano de Araújo².

Palavras-chave: Tunelamento, Transmissão, Nanodispositivos.

1 INTRODUÇÃO

A revolução tecnológica devido aos materiais semicondutores teve o seu início em dezembro de 1947, quando J. Bardeen, W. Schokley e W.H. Brattain demonstraram o efeito do transistor em um cristal de germânio. Desde então os materiais semicondutores têm sido responsáveis por inúmeros avanços tanto no desenvolvimento de novas tecnologias quanto na compreensão de novos fenômenos físicos. Um destes novos fenômenos é o **efeito túnel**, que é a probabilidade de um elétron passar (tunelar) por uma região proibida classicamente. Em 1957 surge o primeiro dispositivo formulado e construído de modo a aproveitar esse fenômeno: o **Diodo de Efeito Túnel de Esaki**.[?] Os fenômenos de tunelamento, são puramente quântico sem análogo clássico.

Atualmente há um grande número de dispositivos baseados no fenômeno de tunelamento. Os dispositivos semicondutores são construídos de modo a aproveitar uma de suas principais características o *gap* de energia (Eg) e o controle da densidade de portadores na dopagem do sistema. Com isto pode-se construir heteroestruturas tais como barreiras, poços, super-redes, etc, de forma a aproveitar essa característica. Essas heteroestruturas estão sendo o objeto de muitas pesquisas,[?] porque são controladas facilmente e podem ser construídas em larga escala, por isso são consideradas a base para os futuros nanodispositivos.

2 METODOLOGIA

Resolveu-se analiticamente a equação de Schrödinger unidimensional e independente do tempo para os sistemas de barreiras simples e duplas, e como consequência foi obtida uma expressão analítica para o coeficiente de transmissão. Foi implementado e testado um programa para calcular o coeficiente de transmissão em sistemas com um número qualquer de barreiras, e de uma forma qualquer. Entretanto, só discutiremos os resultados para barreiras retangulares.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimentalmente as estruturas de múltiplas barreiras são obtidas crescendo camadas alternadas de materiais semicondutores. Nos resultados são para estruturas constituídas por camadas alternadas de GaAs e $Al_xGa_{1-x}As$ na qual $0.25 \leq x \leq 0.30$ representa a concentração de Al da barreira.

3.1 Barreira Simples

O problema do tunelamento é tratado no formalismo da matriz transferência.[?] A figura 1(a) ilustra o problema do tunelamento, no qual os coeficientes A e B estão associados

¹Bolsista de iniciação científica, Instituto de Física. ucm22@yahoo.com.br

²Orientador, Instituto de Física, UFG, salviano@if.ufg.br

com a incidência e reflexão dos pacotes de onda do lado esquerdo da barreira, enquanto, E e F são respectivamente os coeficientes de transmissão e de incidência dos pacotes no lado direito da barreira. Para pacotes de onda incidindo com energias menores que da barreira, $V_0 > E$, a solução da equação de Schrödinger na barreira são funções exponenciais de crescimento e decaimento associados com os estados evanescentes e fora da barreiras exponenciais complexas associadas com a propagação dos pacotes de onda.

Para energias maiores que a barreira, $E > V_0$, a solução é dada por exponenciais complexas em todas as regiões espaciais. Os coeficientes são obtidos impondo-se a continuidade da função de onda e de sua derivada nas interfaces $z = -a$ e $z = a$. Com isso pode-se conectar os coeficientes da barreira da esquerda, com os da direita, obtendo assim a matriz transferência, da qual segue imediatamente o coeficiente de transmissão $T(E)$ dado por,

$$T(E) = \left[1 + \left(\frac{k^2 + \gamma^2}{2k\gamma} \right)^2 \sinh^2(2\gamma a) \right]^{-1} \quad (1)$$

para energias menores que o potencial V_0 da barreira, enquanto para energias maiores que a barreira temos

$$T(E) = \left[1 + \left(\frac{k^2 - k'^2}{2kk'} \right)^2 \sin^2(2k'a) \right]^{-1} \quad (2)$$

no qual $\gamma = -ik'$.

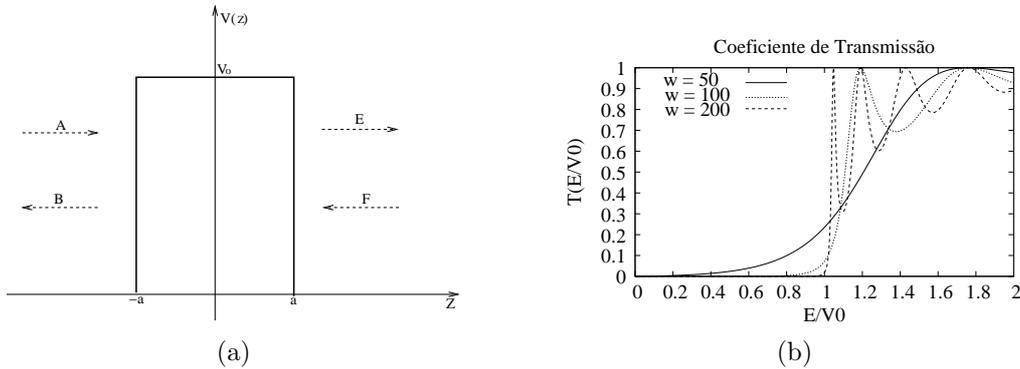


Figura 1: (a) Barreira de Potencial simples com um potencial constante, e (b) Probabilidade de Transmissão para algumas heteroestruturas, w é a largura da barreira em angstroms.

Combinando os resultados das eqs. (1) e (2) para $E \leq V_0$ e $E \geq V_0$, obtém-se a probabilidade de transmissão em função da energia como mostrado na Fig. 1 para uma barreira simples. A probabilidade de transmissão decai exponencialmente para energias menores que a barreira, enquanto para energias maiores ela é oscilatória. Observa-se que quanto maior a largura da barreira menor será a probabilidade de transmissão, entretanto, para energias muito maiores que a altura da barreira o pacote de onda ainda sentirá a presença da barreira, como é observado.

3.2 Barreira Dupla

O coeficiente de transmissão na estrutura de barreira dupla foi obtido usando o resultado de uma única barreira para construir a matriz de transferência do sistema, e com

isto, o coeficiente de transmissão obtido foi

$$T(E) = \frac{1}{|M_{T11}|^2} = \frac{1}{1 + 4|m_{11}|^2|M_{21}|^2\cos^2(2kb - \theta)} = \frac{T_1^2}{T_1^2 + 4R_1\cos^2(kb - \theta)} \quad (3)$$

Sendo T_1 e R_1 os coeficientes de transmissão e reflexão da barreira simétrica simples. Notamos que quanto maior for a largura das barreiras menor será a probabilidade de transmissão para energias menores que a altura das barreiras como é ilustrado na Fig. 2(b) para as barreiras de larguras 70 e 100 Å, entretanto, para as barreiras de larguras 20 e 50 Å, temos um pico de ressonância, devido ao nível que surge no poço, onde ocorre o pico de ressonância a energia do pacote de onda é igual ou próximo a energia de algum estado do poço. Agora vamos analisar a transmissão mantendo fixo a largura das barreiras e variando a largura do poço. Pode-se notar que há mais níveis ressonantes para energias menores que a altura da barreira, isso depende da largura do poço, quanto maior o poço mais níveis ressonantes vão existir, como pode ser visto na Fig. 2(c), que é o caso mais interessante.

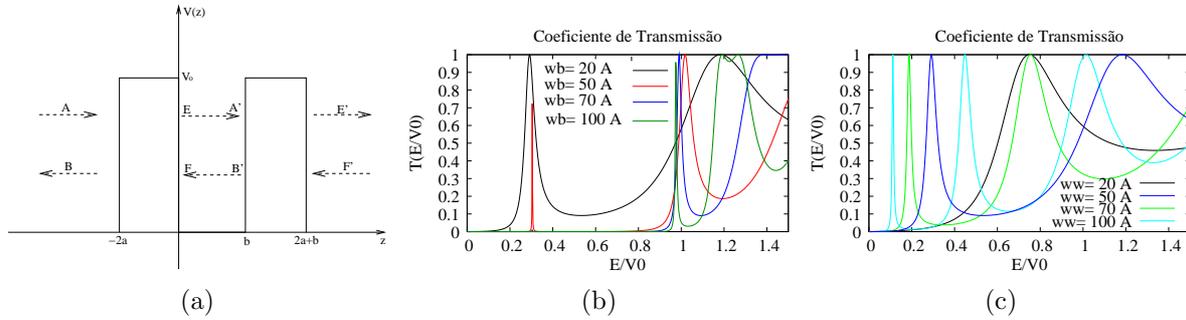


Figura 2: (a) Barreira de potencial dupla com um poço de largura w entre as barreiras. Coeficiente de transmissão para barreiras duplas:(b) Mantém-se-se fixo a largura do poço em 50 Å e variando a largura das barreiras igualmente.(c) Mantém-se-se fixo a largura das barreiras em 40 Å e varia a largura do poço.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para os sistemas de barreiras simples e dupla estão em pleno acordo com a literatura,⁷ para a barreira dupla vemos o *efeito túnel* se manifestar mais claramente, isso ocorre porque na barreira dupla há o surgimento de níveis ressonantes dentro poço que separa as barreiras, com isso este sistema apresenta mais possibilidade de aplicações.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Esaki. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions. *Phsy.Rev*, **109**, 603–604, 1958.
- [2] David K. Ferry and S. M. Goodnick. *Transport in Nanostructures*. Cambridge Studies in Semiconductor Physics and Microelectronic Engineering. Cambridge University Press, 2000.

FONTES DE FINANCIAMENTO - CNPq/PIBIC