



[[Estados quânticos confinados no contínuo]]

**Palavras-Chave: [[ESTADOS LIGADOS]], [[FOTODETECTOR DE INFRAVERMELHO]],
[[SUPER-REDE]]**

Autores/as:

Júlia L. Martins [FCA - UNICAMP]

Prof. Dr. Marcos H. Degani (orientador) [FCA - UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

Os fotodetectores de infravermelho são dispositivos capazes de transformar a radiação eletromagnética nesta faixa de frequência em corrente elétrica. Estes sensores têm uma vasta aplicabilidade em telecomunicações, controle ambiental, visão infravermelha (imageamento), segurança industrial, controle de pragas agrícolas, medicina, militar, etc. Por exemplo, é possível saber se um implante de pontes de safena ou mamária realmente foi bem sucedido visualizando a perfusão do músculo cardíaco durante a cirurgia, não é possível efetuar esse controle por nenhum outro método atualmente. Estes fotodetectores têm sido construídos usando semicondutores, os chamados QWIPs (quantum well infrared photodetectors) e os QDIPs (quantum dot infrared photodetectors). Estes sistemas produzem corrente quando elétrons que ocupam o estado fundamental são excitados para estados que estão no contínuo ou próximo a borda do potencial e possam escapar por tunelamento para o contínuo e assim gerar uma foto-corrente. Na primeira forma, a transição ocorre entre um estado localizado e um estado estendido, assim a força de oscilador é pequena, no segundo caso, a transição ocorre entre estados localizados e a força de oscilador é consideravelmente maior. Haverá uma melhor eficiência na transferência deste elétron para o contínuo quando a transição ocorre entre estados localizados, no entanto isto limita o valor da energia absorvida ao potencial de confinamento da estrutura.

Desde o início da mecânica quântica houve propostas de que seria possível a existência de estados ligados em energias acima das barreiras de potencial, ou seja, no contínuo. Estes estados são espacialmente confinados e existem em sistemas onde os potenciais apresentam algumas peculiaridades.

Recentemente Capasso e colaboradores [1] comprovaram a existência destes estados localizados no contínuo em estruturas especiais construídas com semicondutores, medindo a absorção no infravermelho. Neste experimento, é observada a existência de picos estreitos e localizados que sugerem uma transição de um estado localizado para outro estado também

localizado. Nestas estruturas pode se realizar transições com uma força de oscilador grande para energias bem superiores que as barreiras de potencial.

METODOLOGIA:

O coeficiente de transmissão é resolvido numericamente para um determinado potencial. De uma forma geral para um potencial unidimensional $V(z)$ uma onda plana incidente tem parte transmitida e parte refletida. A equação de Schrödinger é resolvida numericamente, levando se em conta o fato da massa efetiva do elétron ser diferente em diferentes materiais e também o efeito de não parabolicidade [2], onde a massa efetiva dependente da energia é considerada, pois nos materiais que serão utilizados este efeito é importante e não pode ser desprezado. Na figura (1) ilustramos o que será calculado.

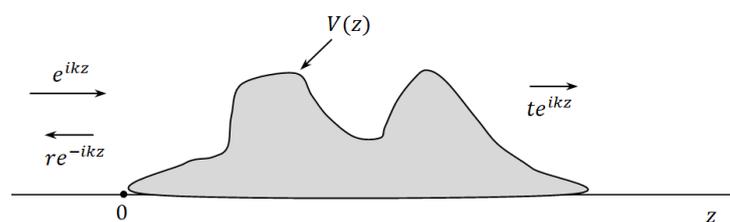


Figura 1. Ilustração de um potencial $V(z)$ com as funções de onda incidente, transmitida e refletida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Neste trabalho é apresentado o cálculo do coeficiente de transmissão em uma estrutura semicondutora constituída por uma super-rede com um único poço de potencial central mais largo (3,2 nm), que atua como um defeito. Esta estrutura constituída por poços de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (1,6 nm) e barreiras de $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (3,9 nm) tem as mesmas dimensões usadas no experimento [1]. O espectro de transmissão revela um nível localizado acima das barreiras de potencial com uma estrutura muito estreita e isolada no espectro de energia. Para obter uma excelente concordância com os resultados experimentais é imprescindível considerar os desvios da parabolicidade nas massas efetivas do elétron [2]. Na Figura 2 mostramos os resultados experimentais [1]. Na parte superior é apresentada a absorção de um sistema de referência com poços de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (3,2 nm) e barreiras de $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (15 nm) de e na parte inferior a absorção da super-rede com um defeito central, em função da energia do fóton incidente. Existe um pico em 360 meV estreito indicando a transição entre estados localizados. Na Figura 3, a esquerda é mostrado o potencial da estrutura de referência e a direita os resultados obtidos para a transmissão. Observa se que o pico da absorção em torno de 300 meV é devido à transição do estado fundamental marcado com 204 meV para o contínuo acima de 500 meV (borda do potencial), por esta razão o pico é largo, revelando uma transição de um estado ligado para um estado estendido. Na Figura 4, são apresentados os resultados obtidos para a super-rede com um defeito. O sistema assinalado como fechado significa que a super-rede tem uma barreira de potencial tanto no início como no seu final

produzida pelo $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ e, portanto, podemos observar apenas a transmissão para energias acima da barreira de potencial, para o sistema aberto considera-se que o material no início e no final é $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$, neste caso pode se ver os estados ligados abaixo da barreira de potencial. Observa-se que o resultado para o contínuo do sistema fechado e aberto é o mesmo, mas para energias abaixo do topo da barreira de potencial, no sistema aberto observa-se o estado fundamental que está localizado no poço central mais largo (defeito) e a mini-banda dos estados da super-rede. A transição do estado fundamental E_1 com energia 202,7 meV para o estado localizado no contínuo E_2 com energia 560,6 meV (> 500 meV) resulta no pico da absorção em torno de 360 meV evidenciado no gráfico experimental.

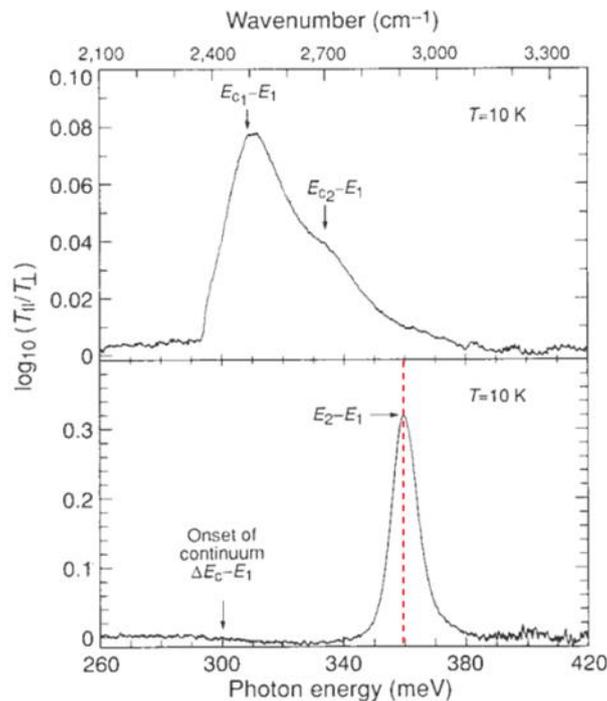


Figura 2. Parte superior, absorção em função da energia do fóton incidente para um sistema de referência consistindo de poços de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ de 3,2 nm e barreiras de $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ de 15 nm. Na parte inferior, resultado para uma super-rede com poços de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (1,6 nm) e barreiras de $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (3,9 nm) e um defeito central de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ (3,2 nm).

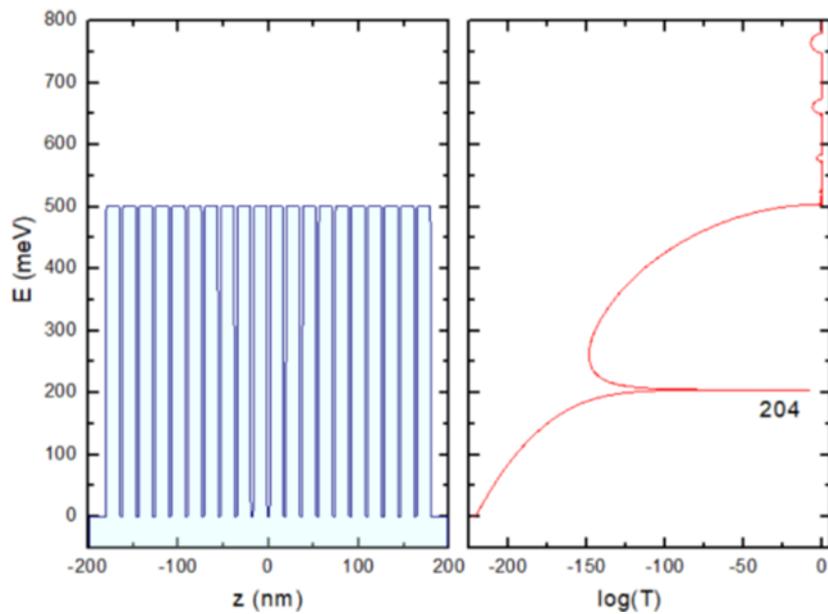


Figura 3. A esquerda, potencial do sistema de referência onde os poços são de $\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.53}\text{As}$ com 3,2 nm de largura e barreiras de $\text{Al}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ de 15 nm. A direita, o resultado do coeficiente de transmissão. O pico em 204 meV é o estado fundamental do sistema, como as barreiras são muito largas não há a formação de mini-bandas até o topo do potencial, aparecendo apenas no contínuo.

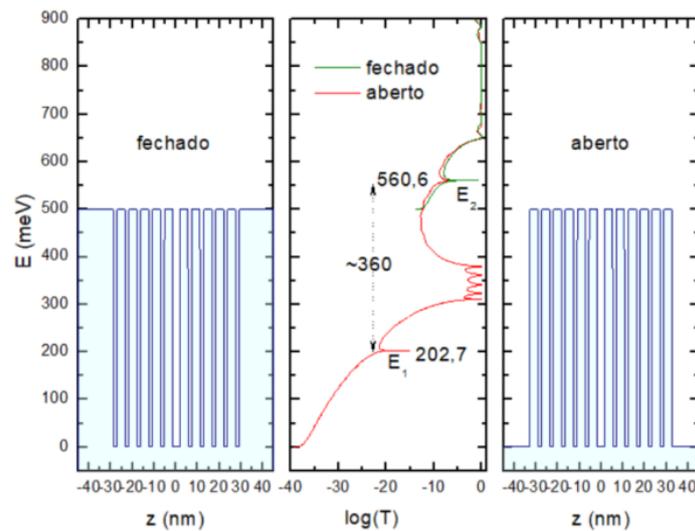


Figura 4. Nas laterais são mostrados os potenciais para o sistema fechado e aberto usados para calcular o coeficiente de transmissão apresentado no gráfico central. Observa-se que o estado fundamental com energia $E_1 = 202,7$ meV corresponde ao estado do poço central (defeito), aproximadamente a 100 meV acima observa-se a mini-banda formada pelos poços da super-rede. Acima do topo do potencial, observa-se um estado localizado e isolado no espectro de energia $E_2 = 560,6$ meV, que dista aproximadamente 360 meV do estado fundamental, coincidindo com o resultado experimental [1].

CONCLUSÕES:

Neste trabalho mostramos que através do cálculo do coeficiente de transmissão é possível obter a os níveis de energia de estruturas semicondutoras incluindo os efeitos de não parabolicidade na massa efetiva eletrônica. Aplicamos estes cálculos em um sistema proposto por Capasso *et al.* [1] onde existe um estado localizado no contínuo. A transição do estado fundamental para este estado apresenta um pico estreito revelando que a transição é entre estados localizados. A existência de estados localizados espacialmente no contínuo é muito interessante, pois possibilita a construção de fotodetectores de infravermelho que operem com energias acima do topo de potencial, mas com transições onde a força de oscilador é muito maior que no caso de estados estendidos espacialmente, isso deve aumentar sua eficiência. Em princípio pode se alterar as dimensões dos poços e barreiras da super-rede e do poço defeito para buscar energias desejáveis para o estado localizado espacialmente acima do topo de potencial.

BIBLIOGRAFIA

[1] Capasso, F. *et al.* Nature, **358**, 565 (1992). [2] Nelson, D. F., Miller, R. C. e Kleinman, D. A. Phys. Rev. **B35**, 7770 (1981).

[2] Nelson, D. F., Miller, R. C. e Kleinman, D. A. Phys. Rev. **B35**, 7770 (1981).

[3] Penello, G. M., Degani, M. H., Maialle, M. Z., Pires, M. P. e Souza, P. L. IEEE Journal of Quantum Electronics, 49, 747 (2013).