

1 INTRODUÇÃO

O aumento no intercâmbio de informação requer sistemas de comunicação que funcionem a taxas cada vez mais elevadas. A pesquisa de melhores sistemas ópticos para comunicação é a chave para atingir altas taxas de transmissão. Esta evolução da demanda por serviços de telecomunicações permite prever sistemas que operem a taxas de transmissão superiores a 10 Gb/s num futuro próximo.

O desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos capazes de operar em sistemas compatíveis com esta demanda no futuro deve vencer desafios tecnológicos. Um exemplo é o problema da dispersão cromática em fibras ópticas. Enquanto a atenuação cromática nas fibras ópticas apresenta um mínimo no comprimento de onda de 1.55 μm , a dispersão cromática tem seu mínimo em 1.3 μm . Assim, para que a penalidade de dispersão na janela de 1.55 μm seja mínima, é preciso que a largura espectral da fonte seja a menor possível. Isto vem sendo conseguido mediante o emprego de lasers DFB, cuja largura espectral atinge valores inferiores a 10 MHz. Entretanto, o fenômeno de varredura de frequência óptica (*chirp*), introduzido quando se modula a intensidade de um laser, faz com que o espectro se alargue, anulando a vantagem resultante da pequena largura espectral do laser. A solução mais promissora é a modulação externa do laser. Estruturas semicondutoras para moduladores de amplitude baseados no efeito *Stark* confinado são amplamente estudadas [Pires, 1998, Schwander *et al*, 1997; Hou, 1995]. Encontrar estruturas que otimizem o desempenho desses moduladores de amplitude para que eles operem em 1.55 μm com baixas tensões, adequada razão de contraste e a altas taxas é fundamental para o mercado futuro [Ido, 1996].

No caso do modulador de amplitude, uma das maneiras possíveis de otimizar o seu desempenho é tentar encontrar estruturas que maximizem o deslocamento *Stark*, ou seja, que maximizem a variação na absorção para uma dada tensão aplicada. Assim, tensões baixas são suficientes para se obter uma

razão de contraste adequada. Isso também implica na possibilidade de se utilizar dispositivos menores que minimizam a capacitância, e que portanto, podem operar a taxas mais elevadas.

O princípio de funcionamento dos moduladores de amplitude por eletroabsorção (MEA) é a modificação do espectro de absorção do material devido à aplicação de um campo elétrico. O campo aplicado produz variações no índice complexo de refração, porém o dispositivo introduz um *chirp* bem menor comparado à modulação direta. Nos materiais *bulk* a variação da absorção do material devido à presença de um campo externo é conhecida como efeito *Franz-Keldysh*. Sua utilização não é muito eficiente para aplicação nos MEA pois as funções de onda elétron-buraco não se encontram confinadas e a variação do coeficiente de absorção ($\Delta\alpha$) é pequena. Com isso, é necessário que o modulador seja muito longo para que a razão de contraste aumente, mas isto eleva a capacitância do modulador e compromete sua velocidade. Por isso as atenções se voltaram para a utilização da electro-absorção em estruturas de poços quânticos múltiplos onde a superposição entre as funções de onda é grande. Além disso, a quantização dos estados dentro dos poços faz com que os picos de absorção sejam mais estreitos, vantagem que ajuda a posicionar o pico de absorção numa energia desejada, mediante a escolha da largura do poço adequada. O efeito de eletro-absorção em poços quânticos múltiplos é chamado de efeito *Stark* confinado e a variação da posição dos picos de absorção com o campo externo é chamada de deslocamento *Stark* (DS).

Existem vários trabalhos que se concentram em otimizar o DS. Uma opção para melhorar o deslocamento *Stark* é aumentar a largura do poço quântico [Bastard *et al*, 1983], porém para poços largos as funções de onda dos elétrons e buracos se afastam mais conforme a aplicação do campo elétrico, como também a força de oscilador da absorção diminui, o que é prejudicial para a razão de contraste.

T. Schwander *et al* [Schwander *et al*,1997] mostraram experimentalmente que estruturas tensionadas de $In_{1-y}Ga_yAs/In_{1-x}Al_xAs$ podem atingir um deslocamento *Stark* maior, com grande variação na absorção ($\Delta\alpha$). Teoricamente mostraram que este efeito acontece devido à degenerescência das bandas de buracos leves e pesados após um certo valor de campo elétrico aplicado sobre a amostra. A degenerescência leva a mudanças na massa efetiva

do buraco o que afeta diretamente o DS. No caso do *InGaAs/InAlAs*, o DS ocorre principalmente por causa do deslocamento da função de onda do buraco, que por sua vez, ocorre devido à pequena descontinuidade na banda de valência [Schwander *et al*, 1997].

Woodward *et al* [Woodward *et al*, 1995] obtiveram um deslocamento *Stark* maior em amostras com degraus dentro dos poços quânticos. Com a aplicação do campo elétrico nessas amostras cria-se uma condição assimétrica para as funções de onda de elétrons e buracos favorecendo o aumento do deslocamento *Stark*. A figura 1.1 mostra a forma do potencial de três amostras com barreira de $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ com 45 Å de largura. A amostra (a) possui poços quadrados de *GaAs* de 90 Å de largura. A amostra (b) apresenta poços formados de *GaAs* com largura de 15 Å e um degrau de $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ com largura de 85 Å. A amostra (c) apresenta poços formados por uma barreira central de 60 Å de $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ cercada por dois poços quânticos de *GaAs* de 20 Å de espessura.

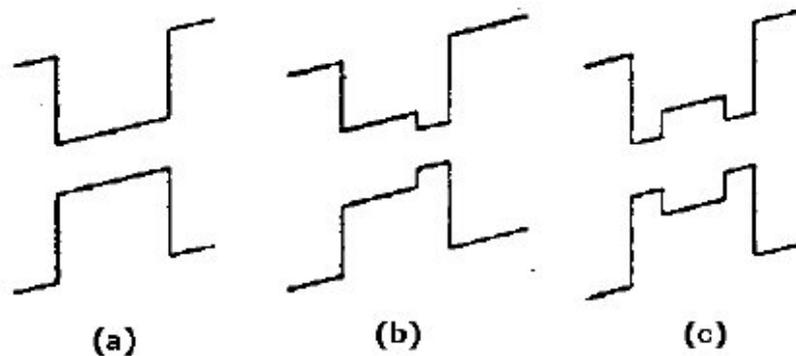


Figura 1.1. Amostras com degraus dentro do poço quântico desenvolvidas para maximizar o deslocamento *Stark* [Woodward *et al*, 1995]

O estudo teórico destas estruturas mostrou que na presença do campo elétrico aplicado, na amostra (c) cria-se uma melhor condição assimétrica para as funções de onda de elétrons e buracos favorecendo o aumento do deslocamento *Stark*. Experimentalmente os autores verificaram que, apesar de um maior deslocamento *Stark*, houve diminuição em $\Delta\alpha$ devido ao alargamento do pico excitônico com a tensão. Os autores suspeitam que este alargamento tenha origem na presença de interfaces dentro do poço, nas flutuações na largura do poço ou ainda no espalhamento por liga.

Hou e Chang [Hou *et al*, 1995], obtiveram um aumento do deslocamento *Stark* numa estrutura de dois poços quânticos acoplados, formados por camadas de *InGaAs* e *InGaAlAs* adjacentes e barreiras de *InAlAs*. Mostraram também experimentalmente que o coeficiente de absorção diminuía rapidamente para pequenas tensões devido à assimetria criada, uma vez que as funções de onda de elétrons e buracos se encontram fortemente confinadas quando os poços não são acoplados. Neste caso, para baixas tensões, os autores verificaram um alto valor para $\Delta\alpha$ e uma pequena variação da parte real do índice de refração, o que significa baixo valor para o *chirp*.

Batty e Allsopp [Batty *et al*,1993] propuseram que uma estrutura assimétrica entre as funções de onda de elétrons e buracos poderia ser criada através de uma estrutura *nipi* de poços quânticos onde uma dopagem delta tipo *n* é introduzida no centro do poço de *GaAs* e a dopagem delta tipo *p*, nas barreiras de *AlGaAs*. Os resultados teóricos que os autores obtiveram prevêm que a introdução da dopagem delta deve dobrar o deslocamento *Stark* da estrutura sem dopagem delta. Nesta tese foram fabricadas estruturas *nipi* de poços quânticos múltiplos (MQW) de *AlGaAs/GaAs* para verificar experimentalmente a proposta teórica de Batty e Allsopp [Batty *et al*,1993].

A introdução de dopagem delta na estrutura de *AlGaAs/GaAs* já vem sendo estudada pela equipe do LabSem [Tribuzy-B, 2001]. Um estudo da dopagem delta neste tipo de material foi publicado na tese de doutorado de Tribuzy [Tribuzy-A, 2001]. Neste trabalho de doutorado, foi usado o carbono como dopante tipo *p* da barreira de *AlGaAs* e silício como dopante tipo *n* no poço de *GaAs*. As fontes utilizadas foram tetrabrometo de carbono (CBr_4) para dopar com átomos de carbono (tipo *p*) e silana (SiH_4) para dopar com átomos de silício (tipo *n*). A parte mais crítica no processo de dopagem, é obter um equilíbrio entre as concentrações de dopagem *n* do poço e *p* na barreira. Quando uma dopagem delta é introduzida no centro do poço e no centro da barreira, a forma do potencial da estrutura varia, fazendo com que a densidade de probabilidade das funções de onda de buracos fique maior nas interfaces entre a barreira e o poço. Por isto, se existe alguma irregularidade nessas interfaces é mais provável que os buracos fiquem presos naquela região. Essa armadilha atrapalha a medida Hall (medida de carga fixa líquida total), pois as cargas que são presas nas interfaces não serão detectadas. Tribuzy conclui que as dopagens delta tipo *p* e tipo *n* devem ser calibradas de forma independente e em material *bulk*, para

depois crescer a estrutura final. Esta é a única maneira de obter uma região intrínseca com carga fixa total igual zero. O carbono como fonte de dopagem tipo p nesta estrutura, oferece melhoria de cerca de 50% na localização do dopante em relação ao Zn [Li *et al*, 1996, Tribuzy, 2001].

Seria interessante para telecomunicações que eventualmente fosse aplicada a dopagem delta a estruturas de *InAlAs/InGaAs*, pois elas são estruturas que podem operar em 1.55 μm . Mas a hipótese de Batty e Allsopp [Batty *et al*, 1993] somente deve ser aplicada numa estrutura já otimizada [Tribuzy,2001], por isso a procura por uma estrutura de *InAlAs/InGaAs* faz também parte deste trabalho de tese.

Um estudo sistemático de estruturas com poços quânticos múltiplos de *InAlAs/InGaAs* foi realizado por Pires [Pires, 1998]. Naquele estudo, o autor cresceu diversas amostras de *InAlAs/InGaAs* com largura de poço diferente e diferente conteúdo de gálio na liga de *InGaAs*. Ao variar a concentração de gálio na liga de *InGaAs* é produzida uma tensão na rede cristalina, com o que se pretende obter amostras insensíveis à polarização e que apresentam ao mesmo tempo melhor compromisso entre os parâmetros mais relevantes no estudo de moduladores, tais como: o parâmetro de *chirp*, a perda por inserção e máxima variação do coeficiente de absorção ($\Delta\alpha$). Pires obteve uma amostra (297) cuja insensibilidade à polarização e deslocamento *Stark* apresentavam valores excelentes para ser usada em sistemas de telecomunicações. Nesta tese se realiza um ajuste fino ao redor dos valores da amostra 297. O propósito deste ajuste fino é conferir se os parâmetros com que foi crescida a amostra 297 são os únicos valores que otimizam a estrutura MQW de *InAlAs/InGaAs*, ou se é possível encontrar uma janela de valores que também otimizem esta estrutura.

Implementar a dopagem delta nas estruturas de *InAlAs/InGaAs* não é trivial, pois é complicado utilizar o carbono como dopante tipo p em *InAlAs*. Um estudo deste tipo de dopagem se encontra na tese de mestrado de Ribeiro [Ribeiro, 2001].

O presente trabalho de tese está dividido da seguinte maneira: o segundo capítulo descreve os conceitos físicos envolvidos na fabricação de moduladores. O terceiro capítulo contém as técnicas e detalhes experimentais usados na caracterização dos moduladores. O capítulo 4 contém os resultados das

simulações da propagação da luz nos guias de onda. O capítulo 5 contém os resultados referentes às amostras de *AlGaAs/GaAs*. O capítulo 6 contém os resultados referentes às amostras de *InAlAs/InGaAs*. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para futuros trabalhos com moduladores. Os apêndices A e B contém uma descrição dos programas desenvolvidos para realizar as medidas desta tese. O apêndice C apresenta um resumo das bases teóricas usadas pelo *software BeamPro* para a simulação pelo método *Beam Propagation Method (BPM)*.