

Introdução

A detecção de radiação no infravermelho há muito tempo deixou de ser de interesse exclusivo para aplicações militares. Atualmente as aplicações de detecção no infravermelho, na faixa entre 2 e 200 μm , vão desde a detecção de componentes tóxicos em misturas gasosas até o novo advento das comunicações ópticas no espaço livre [1,2]. A importância dessas aplicações é evidente. No primeiro caso, o monitoramento de substâncias que representam um risco para a saúde é uma aplicação que beneficia a população como um todo, enquanto no segundo caso, a possibilidade de se transmitir dados opticamente numa distância curta (entre prédios, atendendo às necessidades dentro de uma cidade) ou entre satélites espaciais representa um ganho em termos de custo e rapidez.

As fontes de luz utilizadas tanto para a detecção de gases tóxicos quanto para comunicações ópticas no espaço livre de longa distância são os chamados “quantum cascade lasers” [2]. Esses lasers se baseiam em transições intrabanda que ocorrem sequencialmente num processo denominado de efeito cascata. As pesquisas desenvolvidas na área de fotodetectores para a mesma faixa de transições são ou em estruturas semicondutoras II-VI (ligas de Telureto de Mercúrio e Cádmio-MCT) [3-5] ou em estruturas de poços quânticos múltiplos denominados QWIPs (“quantum well infrared photodetectors”) que também se baseiam em transições intrabanda [6]. No primeiro caso, a transição utilizada é a banda-banda, porém, as ligas de “gap” muito pequeno, necessárias para essa faixa de comprimentos de onda, são pouco rijas, quebrando com facilidade durante o processamento. Além disso, a obtenção exata da composição da liga para esses materiais é um processo difícil [7]. No segundo caso, as transições intrabanda são proibidas para incidência normal (regra de seleção). A absorção, nesse caso, só ocorre se houver uma componente do campo elétrico na direção normal aos planos das camadas. Isso torna o acoplamento da radiação no fotodetector bastante ineficiente. Para torná-lo eficaz é necessário imprimir uma rede de difração ou utilizar uma incidência de 45 graus. Porém, em estruturas semicondutoras

contendo pontos quânticos (PQs) essa regra de seleção é abolida. Assim, a luz incidente perpendicularmente ao plano das camadas pode ser acoplada [7,8].

PQs são estruturas que possuem confinamento em 3 dimensões, enquanto as estruturas de poços quânticos possuem confinamento em apenas uma dimensão. Os PQs são estruturas que podem ter diversas formas dependendo das condições de crescimento, por exemplo formato de pirâmide, trapézio etc. O tamanho dessas estruturas nanométricas é de cerca de 15-20 nm na base e de 4 nm na altura [9]. O mecanismo de crescimento comumente utilizado é o chamado Stranski-Krastanov [10], onde sobre um determinado semiconductor se deposita um outro semiconductor de parâmetro de rede diferente. Em função da diferença de parâmetro de rede, após a deposição de uma fina camada do semiconductor, ilhas de semicondutores são nucleadas. Interrompe-se o crescimento desse material e inicia-se a deposição do material de barreira. Obtém-se assim uma camada com uma determinada densidade de PQs enterrados. Para se obter um bom dispositivo é necessário que a distribuição seja bastante homogênea, ou seja, os tamanhos dos pontos não devem variar muito.

É possível também crescer vários períodos dessa estrutura de forma a intensificar a absorção ou a emissão de luz, para o caso de fotodetectores e leds ou lasers, respectivamente. A natureza foi bastante generosa nesse sentido porque ao se crescer uma camada de PQs sobre outra já existente, os PQs serão nucleados exatamente acima dos PQs da camada já existente [11].

PQs de diferentes materiais já foram fabricados com sucesso em diferentes materiais: (InGaAl)As/InP, (InGa)As/GaAs and Ge/Si [9,12-15]. Aplicações em lasers e fotodetectores vêm sendo estudadas por diversos grupos de pesquisa [16-31]. Segundo as previsões teóricas, o sucesso já alcançado com a utilização de poços quânticos em dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos deve ser estendido ainda mais com o emprego de estruturas de PQs. Um desempenho superior está previsto para dispositivos fabricados com estruturas de PQs [7,8,16,32-34]. A baixa densidade de estados e a abrupticidade dos níveis de energia nos PQs são vantagens para aplicação em alguns dispositivos, como por exemplo, lasers de PQs. Existe também um interesse enorme em utilizar transições intrabanda nos PQs para fotodetectores na região do infravermelho (2-20 μm). Uma das vantagens em utilizá-los, conforme mencionado anteriormente, é que as transições intrabandas não requerem absorção de luz com uma componente do campo elétrico na direção de crescimento [7,8]. Dessa forma, o acoplamento da luz com incidência normal é eficiente, contrário ao caso dos poços quânticos. Além disso, o

longo tempo de vida dos portadores também pode ser benéfico para fotodetectores [35]. Finalmente, também se espera que a corrente de escuro, parâmetro fundamental para um fotodetector, desses dispositivos seja reduzida, em consequência da baixa densidade de estados [8,34].

Trabalhos vêm sendo desenvolvidos em detectores no infravermelho de PQs [18-31]. São os chamados “quantum dot infra-red detectors” (QDIPs). Porém, para corresponder às expectativas, as dimensões, a densidade e a distribuição dos PQs nas diferentes camadas devem ser muito bem controladas para que possam fornecer dispositivos de desempenho melhor do que os existentes atualmente. O estudo e desenvolvimento de QDIPs para a fotodeteção no infravermelho distante são de extrema relevância e constitui uma área de pesquisa de ponta, em particular para comunicações ópticas no espaço livre [2], mencionada no início.

As três condições fundamentais para que os fotodetectores com PQs superem em desempenho os atuais QWIPs são: maior densidade planar de PQs, maior homogeneidade na distribuição de tamanhos e melhor controle sobre a dopagem dos PQs.

Para aplicação em comunicações ópticas em espaço livre, por exemplo, existem duas janelas no espectro de transmissão na atmosfera no infravermelho que podem ser utilizadas. São elas: 3 a 5 μm e 8 a 14 μm . A tendência é utilizar a faixa de 10 μm [36-39]. Com esses pontos em mente, o objetivo desta tese é fazer um estudo do crescimento dos sistemas InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs para serem utilizados como fotodetectores no infravermelho médio e distante. Para isso, o crescimento dos PQs deve ser controlado com o intuito de atender às três condições acima citadas. O que diferencia este trabalho em relação ao que já é feito, por outros grupos de pesquisa, são dois aspectos. Primeiro, foi feito o crescimento com a técnica “metalorganic vapor phase epitaxy” (MOVPE). A maior parte dos estudos é feita com materiais crescidos por “molecular beam epitaxy” (MBE). Acontece que as empresas que produzem dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos utilizam MOVPE porque essa técnica permite fabricação em larga escala (vácuo da ordem de 10% da pressão atmosférica e taxas de crescimento superiores as do MBE) a custos mais reduzidos.

Segundo, estudou-se PQs de InAs sobre substrato de InP. A massa efetiva do elétron no InP é menor do que no GaAs, portanto têm-se dispositivos mais rápidos. Praticamente todo o estudo nessa área é feito sobre substrato de GaAs. A técnica de MOVPE é mais adequada para crescer InP do que MBE, em função da pressão de vapor

do P. Além de trabalhar com taxas de crescimento maiores do que MBE o que é importante quando se deseja fazer um dispositivo com várias camadas. Por esse motivo não existem muitos grupos estudando essas estruturas.

1.1. Organização da tese

Esta tese está organizada em sete capítulos. No capítulo 1 foi apresentada uma introdução ao assunto, incluindo um breve histórico. No capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica, abrangendo os princípios físicos relacionados à teoria do crescimento dos PQs e dos fotodetectores baseados em PQs. O capítulo 3 relata o procedimento experimental, reunindo a descrição das etapas de processamento e das diversas técnicas envolvidas tanto na confecção quanto na caracterização dos fotodetectores desenvolvidos. O capítulo 4 engloba os resultados experimentais, obtidos a partir das técnicas empregadas na confecção e na caracterização das amostras, e a discussão dos mesmos. O capítulo 5 são as conclusões da tese. O capítulo 6 é apresentado um apêndice que relaciona dados das estruturas crescidas. O capítulo 7 é apresentado à lista de publicações em periódicos e apresentações em congresso. O capítulo 8 é apresentado à lista de referências bibliográficas.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Semicondutores da PUC-Rio, com tradição na área de estruturas de semicondutores III-V para dispositivos para comunicações ópticas de longa distância desde 1995.