



Artur Jorge da Silva Lopes

**Crescimento de Pontos Quânticos das Famílias
InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs
para Fotodetectores de Radiação Infravermelha**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Dra. Patrícia Lustoza de Souza

Rio de Janeiro
Junho de 2008



Artur Jorge da Silva Lopes

**Crescimento de Pontos Quânticos das Famílias
InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs
para Fotodetectores de Radiação Infravermelha**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção
do título de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica do departamento de Engenharia
Elétrica do Centro técnico Científico da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dra. Patrícia Lustoza de Souza

Orientador
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Mauricio Pamplona Pires

UFRJ

Dr. Wagner Nunes Rodrigues

UFMG

Dr. Euclides Marega Júnior

USP - São Carlos

Dra. Sandra Marcela Landi

Inmetro

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 Junho de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Artur Jorge da Silva Lopes

Bacharel em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro(UERJ) em 1997, Mestre em Tecnologia Nuclear –Materiais pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) / Universidade de São Paulo (USP) em 2000.

Ficha Catalográfica

Lopes, Artur Jorge da Silva

Crescimento de Pontos Quânticos das Famílias de InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs para Fotodetectores de Radiação Infravermelha / Artur Jorge da Silva Lopes; orientadora: Patrícia Lustoza de Souza; – 2008.

119 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. MOCVD. 3. Infravermelho. 4. Fotodetectores. 5. Pontos quânticos. 6. InAs. 7. InGaAs. 8. InGaAlAs. I. Souza, Patrícia Lustoza de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico esta tese

À meus pais, Eugenio e Carolina

À minha irmã e cunhado, Eugenia e Ray

Ao senhor Raymundo e a dona Lourdes

Aos meus sobrinhos, Carolina, Matteus, Diogo e Lucas

À Christiane e Rennam

Agradecimentos

À Professora Dra. Patrícia Lustoza de Souza, pela orientação ministrada e a oportunidade de desenvolver este trabalho no Laboratório de Semicondutores (LabSem).

Ao Professor Dr. Mauricio Pamplona Pires, da UFRJ, pela co-orientação ministrada e pelo constante estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

Ao Químico Iracildo Conceição de Oliveira, não apenas pela sua indispensável e sempre disponível ajuda em Química, sua organização e zelo metuculoso na manutenção da infra-estrutura do LabSem.

Ao Professor Dr. Rodrigo Prioli Menezes e ao Pesquisador Henrique Duarte da Fonseca Filho pelas micrografias de AFM.

Ao Pesquisador Marcio Scarpim de Souza, do Laboratório de Optrônica e Sensores do CTeX (Centro Tecnológico do Exército) pela orientação em processamento de dispositivos.

As secretárias do LabSem Amália Regina de Oliveira e Marisa Pereira Soares.

As Professoras Dra. Christiana Tribuzy, Dra. Maria Cristina Areiza e Dra. Sandra Landi.

Ao Prof. Paulo César Baptista Travassos, Prof. Paulo Sergio de Souza Barros, Prof. Germano Amaral Monerat, Prof. Arnaud Corrêa da Silveira e Prof. Wanderclarkson Santana.

Ao Engenheiro Vinícius Miranda.

Ao Dr. Karl Unterrainer, Sr. Frederick Schrey e Sr. Tomas Gebhard, do *Photonics Institute and Center for Micro and Nanostructures*, da *Technical University Vienna*, pela utilização dos laboratórios, pelo auxílio na montagem das experiências, e pelo auxílio nas medidas de espectroscopia FTIR, respectivamente.

Ao professores do Centro de Estudos em Telecomunicações e da Física da PUC-Rio pelos ensinamentos adquiridos nos cursos de pós-graduação.

Ao técnico mecânico João Rodrigues dos Santos.

Ao CNPq pelos três anos e meio de bolsa de doutorado.

À PUC-Rio, pelos auxílios e infra-estrutura.

Resumo

Lopes, Artur Jorge da Silva; Souza, Patrícia Lustoza de. **Crescimento de Pontos Quânticos das Famílias InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs para Fotodetectores de Radiação Infravermelha.** Rio de Janeiro, 2008. 119p Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pontos quânticos (PQs) auto-organizáveis de InAs sobre InP, InGaAs, InGaAlAs utilizando-se substratos de InP foram crescidos pela deposição química de metal-orgânicos (MOCVD) e foram investigadas para fotodetectores. Para PQs de InAs crescidos sobre diferentes substratos de InP, têm-se que a presença de discordâncias é responsável pelo aumento na densidade planar dos PQs. O espectro de fotoluminescência (FL) das estruturas de $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InAs}/\text{InP}$, com diferentes composições da camada ternária. Medidas com microscopia de força atômica (AFM) mostraram que os PQs mais altos são obtidos quando os mesmos são crescidos sobre uma camada de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ com um descasamento de 1000ppm, e a altura decresce com o descasamento a partir deste valor. O espectro de FL dos PQs mostrou uma banda assimétrica, a qual envolve transições entre os níveis de energia dos PQs e pode ser decomposta em dois picos. Pico de energia mais alta desta banda foi observado para a amostra com PQs crescidos sobre uma camada de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ casada e o pico foi deslocado para energias mais baixas para amostras tensionadas. Estruturas diferentes de PQ de InAs crescidas sobre uma camada de InGaAlAs casada com InP foram investigadas. Picos de fotocorrente extremamente estreitos foram observados, demonstrando um excelente potencial para sintonização estreita de comprimentos de onda. Foram desenvolvidas estruturas para detectar radiação superior à $10\mu\text{m}$. Medidas de absorção mostrando uma dependência com a polarização mostraram que as estruturas tem um confinamento total e são apropriadas para detecção sintonizável de radiação por incidência normal.

Palavras-chave

Engenharia elétrica - Teses; MOCVD; infravermelho; fotodetectores; pontos quânticos; InAs; InGaAs; InGaAlAs.

Abstract

Lopes, Artur Jorge da Silva; Souza, Patrícia Lustoza de (Advisor). **Growth of Quantum Dot to the Families InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs for Fotodetectors of Infrared Radiation**. Rio de Janeiro, 2008. 119p. PhD. Thesis. – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Self-assembled InAs quantum dots (QD) over an InP, InGaAs, InGaAlAs on InP substrates were grown by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and were investigated for quantum dot infrared photodetectors. For InAs QD over an InP buffer on different InP substrates. The results indicate that the presence of dislocations were responsible for the increase in the QD density. Photoluminescence (PL) spectra of InP/In_xGa_{1-x}As/InAs/InP dot-in-a-well structures, with different compositions of the ternary layer. Measurements with atomic force microscopy showed that the largest QD height is obtained when the InAs QDs are grown on the In_xGa_{1-x}As layer with a mismatch of 1000ppm, and the height decreases as the mismatch departs from this value. PL spectra of the QDs showed an asymmetric band, which involves transitions between dot energy levels and can be deconvoluted into two peaks. The highest energy PL peak of this band was observed for the sample with the QDs grown on top of the lattice-matched In_xGa_{1-x}As and it shifted to lower energies for strained samples as the degree of mismatch increased. Different InAs quantum dot structures grown on InGaAlAs lattice matched to InP. Extremely narrow photocurrent peaks were observed, demonstrating great potential for fine wavelength selection. Structures which can detect radiation beyond 10μm were developed. Polarization dependence measurements showed that the structures have a zero-dimensional character and are suitable for detection of normal incidence light.

Keywords

Electrical engineering - Thesis; MOCVD; photodetectors; infrared; quantum dots; InAs; InGaAs; InGaAlAs.

Sumário

1 Introdução	9
2 Revisão Teórica	13
2.1. Estruturas de baixa dimensionalidade	13
2.2. Crescimento Auto-Organizável	15
2.3. Modos de Crescimento	16
2.4. Teoria Geral dos Fotodetectores	21
2.5. Teoria dos Fotodetectores de Infravermelho	24
3 Procedimento experimental	28
3.1. Organometalic Vapor – Phase Epitaxy (OMVPE)	28
3.2. Sistema MOVPE AIX-200	32
3.3. Efeito Hall	33
3.4. Difração de Raios - X	35
3.5. Fotoluminescência	36
3.6. Microscopia de Força Atômica	39
3.7. Processamento do Fotodetector	42
3.8. Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier	46
4 Apresentação e Análise dos Resultados	49
4.1. Análise da estrutura InAs/InP	49
4.2. Análise da estrutura InAs/InGaAs	61
4.3. Análise da estrutura InAs/InGaAlAs	85
5 Conclusões	101
6 Referências bibliográficas	103
7 Apêndice	108
8 Anexos	115