



Marcio Scarpim de Souza

**Desenvolvimento de fotodetectores de infravermelho
distante utilizando transições intrabanda em poços
quânticos múltiplos de GaAs/AlGaAs**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
PUC-Rio.

Orientadora: Patrícia Lustoza de Souza
Co-orientador: Mauricio Pamplona Pires

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2006



Marcio Scarpim de Souza

**Desenvolvimento de fotodetectores de infravermelho
distante utilizando transições intrabanda em poços
quânticos múltiplos de GaAs/AlGaAs**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Jean Pierre Von der Weid

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Mauricio Pamplona Pires

Co-orientador

UFRJ

Prof. Gustavo Soares Vieira

CTA

Prof^a. Sandra Marcela Landi

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Wagner Nunes Rodrigues

UFMG

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de fevereiro de 2006

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

Marcio Scarpim de Souza

Graduou-se Técnico em Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-RJ) em 1995, e em Engenharia Metalúrgica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 2001. Atualmente ocupa a função de pesquisador do Laboratório de Optrônica e Sensores do CTEEx (Centro Tecnológico do Exército), na área de materiais semicondutores e sistemas de imageamento infravermelho para aplicações militares.

Ficha Catalográfica

Souza, Marcio Scarpim de

Desenvolvimento de fotodetectores de infravermelho distante utilizando transições intrabanda em poços quânticos múltiplos de GaAs/AlGaAs / Marcio Scarpim de Souza; orientadora: Patrícia Lustoza de Souza; co-orientador: Mauricio Pamplona Pires. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

151 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Fotodetectores. 3. Poços quânticos. 4. Infravermelho. 5. Transição intrabanda. 6. Semicondutores. I. Souza, Patrícia Lustoza de. II. Pires, Mauricio Pamplona. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Toda honra, toda glória e todo louvor
Sejam dados ao Senhor Jesus.

Agradecimentos

Ao meu amado Senhor Jesus, minha torre forte, por minha vida, minha saúde, minha paz e minha família.

À minha amada Esposa Janaina Scarpim de Souza, pelo amor e pelo apoio preciosos ao longo dos oito anos em que nossos caminhos e corações estão entrelaçados.

Ao meu Pai Nildo Soares de Souza, à minha Mãe Marinete Torres de Souza (*in memoriam*) e ao meu Irmão Marcos pelo amor e zelo na formação do meu caráter e da minha educação.

Ao Exército Brasileiro pela oportunidade de realizar o mestrado em tempo parcial, e à FINEP e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À minha orientadora, Dra. Patrícia Lustoza de Souza pela confiança depositada em mim, pelos conhecimentos adquiridos e pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Mauricio Pamplona Pires, da UFRJ, pelo companheirismo, pelo senso de humor, e pela persistência na solução dos muitos problemas experimentais enfrentados. Sem sua ajuda seria muito difícil a conclusão deste trabalho.

Ao Químico Iracildo, não apenas pela sua indispensável e sempre disponível ajuda em Química, mas também por sua organização e zelo meticuloso na manutenção da infra-estrutura do LabSem.

Aos meus queridos companheiros de bancada e de piadas do LabSem: Secretária Amália Regina de Oliveira, Prof. Artur Lopes, Dra. Christiana Tribuzy, Dra. Maria Cristina Areiza, Prof. Paulo César Travassos, Dra. Sandra Landi, Eng. Paulo Zilliani, Aluno Vinícius Miranda e Prof. Guilherme Xavier. Muito obrigado pelos conhecimentos que os senhores me acrescentaram, e pela ajuda indispensável nos diversos trabalhos experimentais que esta dissertação demandou.

Ao Dr. Gustavo Vieira, do Centro Técnico Aeroespacial, pelas importantes trocas de idéias e pela confecção da ferramenta de polimento *waveguide* e do suporte para medidas de transmissão.

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 e funcionários do Centro de Estudos em Telecomunicações e do Departamento de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos e pela ajuda.

Aos companheiros do Laboratório de Materiais e do Laboratório de Optrônica e Sensores, ambos pertencentes ao Centro Tecnológico do Exército, pela ajuda na preparação e caracterização dos fotodetectores desenvolvidos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização bem sucedida deste trabalho, mas cujo nome não lembro agora. Muito obrigado!

Resumo

Souza, Marcio Scarpim de; Souza, Patrícia Lustoza de. **Desenvolvimento de fotodetectores de infravermelho distante utilizando transições intrabanda em poços quânticos múltiplos de GaAs/AlGaAs**. Rio de Janeiro, 2006. 151p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nas Forças Armadas do Brasil existe uma forte demanda pelo desenvolvimento de detectores de infravermelho nacionais para uso em diversas aplicações sujeitas a rígidas restrições de importação, como sistemas de imageamento infravermelho para visão noturna, guiamento de mísseis, sistemas de mira, etc. O objetivo deste trabalho foi desenvolver fotodetectores para o infravermelho distante em $10\mu\text{m}$, baseados em estruturas semicondutoras de poços quânticos múltiplos de GaAs/AlGaAs utilizando transições intrabanda. Os materiais foram crescidos pela técnica de epitaxia de fase vapor de metalorgânicos (MOVPE). A calibração dos parâmetros de crescimento foi realizada por meio de medidas de difração de raios x, efeito Hall, e fotoluminescência. Devido à regra de seleção de que não é possível haver absorção intrabanda da luz sob incidência normal, foram aplicadas duas técnicas de acoplamento: geometria de guia de onda com incidência a 45° pela borda, e utilização de grades de difração metalizadas. Os detectores produzidos foram caracterizados quanto à corrente de escuro e quanto aos espectros de absorção óptica e de fotocorrente, ambos obtidos por espectroscopia FTIR. Ao final dos trabalhos, foi obtido um fotodetector de GaAs/AlGaAs do qual foi possível medir a fotocorrente através dos contatos elétricos do dispositivo, com pico em $9\mu\text{m}$. Os resultados obtidos são promissores no sentido de que apontam para a possibilidade de se produzir detectores de infravermelho nacionais para diversas aplicações (defesa, medicina, astronomia, telecomunicações, etc).

Palavras-chave

Engenharia elétrica - Teses; fotodetectores; poços quânticos; infravermelho; transição intrabanda; semicondutores.

Abstract

Souza, Marcio Scarpim de; Souza, Patrícia Lustoza de (Advisor). **Development of far-infrared photodetectors based on intraband transitions in GaAs/AlGaAs multi-quantum wells.** Rio de Janeiro, 2006. 151p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the Brazilian Army there is a strong demand for the development of national infrared detectors for use in many applications subjected to severe trade restrictions, like infrared imaging systems for night vision, missile guidance, sight systems, etc. The aim of this work was to develop far-infrared photodetectors for $10\mu\text{m}$, based on semiconductor structures of GaAs/AlGaAs multi-quantum wells using intraband transitions. The materials were grown by metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE). The calibration of the growing parameters was done by x ray diffraction, Hall effect, and photoluminescence measurements. Since intraband transition of light is not possible to normal incidence, due to selection rules, two coupling techniques were applied: waveguide geometry with 45° incidence on the edge, and metalized diffraction gratings. The produced detectors were characterized in terms of dark current, optical absorption and spectral response. Infrared measurements were made using FTIR spectroscopy. A GaAs/AlGaAs photodetector was obtained. The photocurrent through the electrical contacts of the device showed a peak at $9\mu\text{m}$. The results are promising in the sense of revealing the possibility of producing national infrared photodetectors for many applications (defense, medicine, astronomy, telecommunications, etc).

Keywords

Electrical engineering - Thesis; photodetectors; quantum wells; infrared; intraband transition; semiconductors.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Aplicações dos QWIPs	20
1.2.	Organização da dissertação	27
2	Revisão teórica	29
2.1.	Radiação do corpo negro e transferência de fluxo	30
2.2.	Sinal e ruído em fotodeteção	39
2.3.	Teoria de poços quânticos	53
2.4.	Poços quânticos múltiplos	63
2.5.	Transições intrabanda em estruturas MQW	64
2.6.	Tipos de QWIPs de GaAs/AlGaAs	66
2.7.	Acoplamento óptico para QWIPs	74
2.8.	Matrizes de detectores	82
3	Procedimento experimental	90
3.1.	Crescimento epitaxial por MOVPE	91
3.2.	Litografia óptica	94
3.3.	Etapas de processamento	99
3.4.	Técnicas de caracterização	109
3.4.1.	Espectroscopia de fotoluminescência	109
3.4.2.	Difração de raios x	112
3.4.3.	Efeito Hall	115
3.4.4.	Espectroscopia de IR por transformada de Fourier	122
3.4.5.	Absorção	125
3.4.6.	Fotocorrente	128
4	Resultados e discussão	130
5	Conclusões e trabalhos futuros	141
6	Referências bibliográficas	143

Lista de figuras

- Figura 1.1 – Diagrama de bandas de um fotodetector de infravermelho intrínseco convencional. 16
- Figura 1.2 – Diagrama de bandas esquemático de um poço quântico. Absorção intrabanda pode ocorrer entre os níveis de energia de um poço quântico associados com a banda de condução (dopagem n) ou de valência (dopagem p). 17
- Figura 1.3 – Esquemas de acoplamento da luz em estruturas de QWIPs de GaAs/AlGaAs: (a) a luz incidente é normal a uma face polida com um ângulo de 45° em relação aos poços quânticos. (b) uma grade de difração é usada para refletir a luz vinda através do substrato (Ng, 2002) 19
- Figura 1.4 – Comparação entre duas imagens de uma área incendiada, feitas à noite, uma com (a) uma câmera CCD no visível de alta sensibilidade e outra com (b) uma câmera QWIP no infravermelho distante (Guanapala *et al*, 2000). 20
- Figura 1.5 – Comparação de imagens do vulcão Kilauea, no Havaí, uma feita com (a) uma câmera CCD no visível de alta sensibilidade e outra com (b) uma câmera QWIP no infravermelho distante (Guanapala *et al*, 2000). 21
- Figura 1.6 – (a) imagem no visível de um tumor cerebral (a maior parte das células cancerosas estão mortas devido às drogas sensíveis ao câncer). (b) Imagem IR discriminando os tecidos saudáveis dos mortos. (Gunapala *et al*, 2000). 23
- Figura 1.7 – (a) A ponta do nariz está mais quente do que os tecidos vizinhos devido à atividade metabólica elevada (angiogênese) de um câncer de pele; (b) Rosto de uma pessoa que não tem câncer de pele no nariz.

Normalmente, o nariz e as orelhas são mais frios em relação às outras partes da face, por se estenderem para fora do corpo (Gunapala <i>et al</i> , 2000).	23
Figura 1.8 – Variação de temperatura dos dedos dos pés e dos cotovelos de um paciente com hanseníase (Gunapala <i>et al</i> , 2000).	24
Figura 1.9 – Espectro de emissão do corpo negro para várias temperaturas.	25
Figura 1.10 – Imagem do míssil Delta-II obtida por uma câmera QWIP durante o lançamento (Gunapala <i>et al</i> , 2000).	25
Figura 1.11 – Esquema interno da câmera QWICPIC.	26
Figura 1.12 – Imagens no IR próximo e médio da galáxia de Orion. A região coberta pela imagem QWICPIC está indicada pelo quadrado na imagem do IR próximo (Ressler <i>et al</i> , 2001).	27
Figura 2.1 – A exitância espectral de um corpo negro em diferentes temperaturas (Choi, 1997).	32
Figura 2.4 – A relação entre o ângulo sólido $d\omega$ e o ângulo sólido projetado $d\Omega$ (Choi, 1997).	36
Figura 2.5 – As orientações de dois discos circulares.	37
Figura 2.6 – (a) Um arranjo típico de um detector e um furo circular numa tela opaca (<i>field stop</i>), e (b) um arranjo típico de um detector e uma lente.	38
Figura 2.7 – A geometria do detector.	41
Figura 2.8 – A detectividade D^* de um fotocondutor ideal em duas bandas de comprimentos de onda.	51
Figura 2.9 – (a) Poço quântico com largura L_w e barreira infinita $V_0 = \infty$. (b) A dispersão de energia no espaço k_x ou k_y usando a equação (2.73).	56
Figura 2.10 – Poço quântico com largura L_w e barreira finita com altura V_0 . Estão representados os níveis de energia para $n = 1$ e $n = 2$ e suas respectivas funções de onda.	57
Figura 2.11 – Solução gráfica para a constante de decaimento	

- α e o número de onda k de um poço quântico finito. 60
- Figura 2.12 – Gráfico teórico da energia da transição intrabanda $E_2 - E_1$, em função da largura do poço e da proporção de Al na barreira (Studart, 2004) 62
- Figura 2.13 – Gráfico da energia da banda proibida em baixa temperatura de semicondutores com estrutura cristalina do tipo zinc-blende e diamante versus parâmetro de rede. (Esaki, 1986) 64
- Figura 2.17 – Diagrama de bandas de condução em um QWIP de banda larga sob a aplicação de um campo elétrico externo (Bandara *et al*, 1998b). 70
- Figura 2.20 – Diagrama de bandas de condução para estruturas QWIP tipo (a) B-M e (b) B-M de passo (Levine, 1993). 74
- Figura 2.21 – Mecanismos de acoplamento da luz usados em QWIPs: (a) grade de difração linear ou bidimensional sobre cada detector, (b) grade com cavidade óptica, (c) refletor de espalhamento aleatório e (d) poços quânticos com estrutura corrugada (Rogalski, 2003). 75
- Figura 2.22 – Vistas de topo e lateral de uma grade de difração por reflexão (Choi, 1997). 76
- Figura 2.23 – Distribuição angular da intensidade luminosa para diferentes periodicidades de grade e comprimentos de onda incidente. (Choi, 1997). 79
- Figura 2.24 – (a) Estrutura de um QWIP tendo uma grade obtida por corrosão no topo de cada pixel e uma camada de AIAs para reflexão interna total abaixo dos pixels. (b) QWIP com grade de difração e com o substrato mais fino para a reflexão interna total. (Levine, 1993). 82
- Figura 2.25 – (a) FPA com varredura linear e (b) FPA com sistema fixo (Rogalski, 2003). 83
- Figura 2.26 – FPAs monolíticos: (a) todo silício, (b) heteroepitaxia sobre silício, (c) não silício (p.e., HgCdTe

CCD), (d) microbolômetro. (Rogalski <i>et al</i> , 2002).	85
Figura 2.27 – Técnicas de interconexão entre o chip multiplexador de silício (ROIC) e a matriz de detectores, para FPAs híbridos: (a) técnica flip-chip com bumps de índio, e (b) técnica loophole. (Rogalski <i>et al</i> , 2002).	86
Figura 2.28 – Etapas do processo de fabricação de um FPA no IR híbrido. (Henini <i>et al</i> , 2002)	87
Figura 3.1 – Estruturas de processamento: (a) tipo 1; (b) tipo 2.	90
Figura 3.2 – Suporte de encapsulamento (a) vista geral; (b) vista em detalhe.	91
Figura 3.3 – Ilustração esquemática de sistema MOVPE típico.	92
Figura 3.4 – Estrutura semicondutora genérica dos qwips crescidos.	93
Figura 3.5 - Transferência de padrões por litografia óptica.	96
Figura 3.6 – Layout da máscara #0.	97
Figura 3.7 – Layout das máscaras #1-8, #1-10 e #1-12.	97
Figura 3.8 – Layout da máscara #2.	98
Figura 3.9 – Layout da máscara #3.	99
Figura 3.10 – Equipamento “spinner”.	102
Figura 3.11 – Exposição UV e revelação do fotoresiste sensibilizado (processo positivo).	103
Figura 3.12 – Curvas de calibração da solução $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ sobre GaAs/AlGaAs: (a) calibração do ângulo de ataque θ_{at} ; (b) taxa de corrosão (Xavier <i>et al</i> , 2002).	104
Figura 3.13 – Perfil otimizado de corrosão de $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (8:7:80) sobre GaAs/AlGaAs (Xavier <i>et al</i> , 2002).	105
Figura 3.14 – Esquema da seqüência de metais depositados sobre a amostra para a formação do contato elétrico superior (análogo para o contato elétrico inferior).	106
Figura 3.15 – Esquema da medida por TLM (Tribuzy, 2001).	106
Figura 3.16 – Forno artesanal utilizado no LabSem para RTA com atmosfera de N_2 .	108

Figura 3.17 – Microsoldadora Thermosonic Gold Ball Bonder modelo 4124, da Kulicke and Sofa.	109
Figura 3.18 – Esquema das transições radiativas em semicondutores de gap direto incluindo doador-buraco ($D^{\circ}h$), elétron-aceitador (eA°), par doador-aceitador ($D^{\circ}A^{\circ}$), banda-banda (eh) e transições de excitons livres (FE). (Ribeiro, 2001)	110
Figura 3.19 – Ilustração esquemática da experiência de fotoluminescência. (Pires, 1998)	111
Figura 3.20 – Construção da esfera de Ewald para uma varredura em ω . (Ribeiro, 2001)	114
Figura 3.21 – Geometria (+n,-n) para Difratomia de Duplo-Cristal. $S_1...S_4$ representam as fendas e P_1 e P_2 representam o cristal monocromador e a amostra respectivamente. (Ribeiro, 2001)	115
Figura 3.22 – Geometria Van der Pauw.	118
Figura 3.23 – Esquema da montagem experimental que permite a observação do efeito de Hall.	119
Figura 3.24 – A mobilidade em função da temperatura.	121
Figura 3.25 – Tipos de geometria da amostra para medidas de resistividade Van der Pauw e efeito Hall. (NIST, 2005)	122
Figura 3.26 – Diagrama óptico de um interferômetro de Michelson clássico.	123
Figura 3.27 – Interferogramas senoidal e com rajada central (<i>centerburst</i>) para fontes de luz monocromática e contínua, respectivamente.	124
Figura 3.28 – Espectrômetro FTIR modelo 8700, da Nicolet: (a) esquema de funcionamento interno; (b) configuração com criostato para medidas a baixa temperatura.	125
Figura 3.29 – Ferramenta para polimento das amostras a 45° .	126
Figura 3.30 – Seção transversal da amostra após o polimento waveguide: (a) esquema de guiamento da luz; b) micrografia óptica com 50x de aumento.	127

Figura 3.31 – Suporte para medidas de transmissão no modo guia de onda (a) lado por onde a luz emerge após atravessar a amostra; (b) vista lateral; (c) lado de incidência da luz.	127
Figura 3.32 – Esquema da experiência de fotocorrente.	128
Figura 3.33 – Esquema do circuito de polarização da amostra.	128
Figura 4.1 – Espectro de raios x usado para a calibração da composição de Al na barreira.	131
Figura 4.2 - Espectro de raios x usado para a calibração da espessura da barreira.	132
Figura 4.3 – Simulação computacional usada para a calibração da espessura do poço (#930).	132
Figura 4.4 – Espectros de fotoluminescência das amostras a 300K.	133
Figura 4.5 – Gráfico teórico da energia de transição e1-hh1 em função da espessura do poço, a 300K e a 10K.	134
Figura 4.6 – Corrente de escuro em função da tensão de polarização, a 300K.	134
Figura 4.7 – Curvas IxV em 300K e 77 das amostras (a) #929 e (b) #930.	135
Figura 4.8 - Curvas IxV da amostra #916 entre 300K e 77K, e #929, #930 e #930 RTA a 77K.	136
Figura 4.9 – Espectros de absorção das amostras a 77K, entre 1,5 e 24 μ m.	136
Figura 4.10 – Espectros de absorção das amostras a 77K, entre 3,5 e 17 μ m.	137
Figura 4.11 – Espectros de fotocorrente da #930 a 77K para várias tensões de polarização.	138
Figura 4.12 – Fotocorrente da #930 com $V_B=+6V$ entre 80K e 5K.	139
Figura 4.13 – Fotocorrente da #897 a 77K para várias tensões de polarização.	140

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros das grades de difração.	98
Tabela 3.2 - Seqüência de processamento dos fotodetectores desenvolvidos.	100
Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros obtidos nas diversas amostras crescidas.	130