



Eric Hermann

**Os Processos de Transição Eletrônica em
Fotodetectores Intrabanda e o Estudo de um
Caso Particular**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Patrícia Lustoza de Souza
Coorientador: Prof. Mauricio Pamplona Pires

Rio de Janeiro
Abril de 2016



Eric Hermann

**Os Processos de Transição Eletrônica em
Fotodetectores Intrabanda e o Estudo de um
Caso Particular**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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.

Profa. Patricia Lustoza de Souza

Orientadora

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Mauricio Pamplona Pires

Coorientador

UFRJ

Prof. Nelson Studart Filho

UFSCAR

Prof. Jean Pierre von der Weid

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Rodrigo Prioli Menezes

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2016

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

Eric Hermannny

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 1991. Realiza pesquisa experimental e teórica na área de fotodetectores de infravermelho.

Ficha Catalográfica

Hermannny, Eric

Os processos de transição eletrônica em fotodetectores intrabanda e o estudo de um caso particular / Eric Hermannny ; orientadora: Patrícia Lustoza de Souza ; coorientador: Mauricio Pamplona Pires – 2016.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Infravermelho. 3. Semicondutores. 4. Fotodetectores. 5. QDIPs. 6. Intrabanda. 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

Agradecimentos

“Teus são os olhos com que a compaixão de Deus vê o mundo.”

Meus primordiais agradecimentos à Profa. Patricia Lustoza de Souza, pela oportunidade de realizar no Laboratório de Semicondutores — LabSem — este projeto de Mestrado, pela paciência com o aluno novato muito inseguro e inquiridor e pelos desafios que o ajudaram a progredir, e ao Prof. Mauricio Pamplona Pires, por ser um exemplo de que o humor soma à ciência.

Gostaria de agradecer encarecidamente:

À Profa. Leontina o extenso laço que me reconduziu à vida acadêmica;

Ao Prof. Bruno Horta a acolhida nas aulas de Introdução à Nanotecnologia e o contagiante estímulo;

Ao Prof. Rodrigo Prioli o seu modo de ensinar;

Aos hoje doutores Rudy Kawabata, Germano Penello e Daniel Micha o legado do seu trabalho pioneiro no Laboratório de Semicondutores da PUC-Rio;

Ao Prof. Stefan Zohren a sugestão de perspectivas futuras;

Ao Prof. Paulo Sérgio Guimarães, por haver ajudado a definir o escopo do projeto, no seu início;

Ao Prof. Roberto Jakomin, por decifrar as receitas de crescimento, explicando-me detalhes sobre as amostras usadas neste estudo; e

Ao Prof. Luiz Sampaio, por me receber no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para fazer os contatos elétricos nas amostras.

Em reconhecimento pelo excelente trabalho dos físicos teóricos e experimentais que diretamente colaboraram neste projeto, meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. José Maria Villas-Bôas, da Universidade Federal de Uberlândia, por propiciar o código, de sua autoria, da simulação computacional, e pelas conversas por *skype*, indispensáveis para a compreensão e o uso apropriado neste trabalho;

A Pedro Henrique Pereira, da Universidade Federal de São Carlos, pesquisador visitante no LabSem, pela sua dedicação em compreender o código da simulação e pela infinita boa vontade em atender os meus pedidos para, reiteradamente, alterar parâmetros e recalcular;

Ao Prof. Germano Maioli Penello, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, por ceder o *script* de sua autoria para plotagem automatizada, no programa Origin, do gráfico de Arrhenius e do gráfico comparativo de polaridades negativa e positiva para a corrente de escuro, e pelas conversas em que me emprestou seu agudo conhecimento sobre a Física dos fotodetectores de infravermelho;

Ao Prof. Rodrigo Prioli e a Henrique F. Filho, pelas medidas de Microscopia de Força Atômica, realizadas no Laboratório Van De Graaff (PUC-Rio);

A Wagner N. Rodrigues, pelas medidas de Microscopia Eletrônica de Transmissão, realizadas na Universidade Federal de Minas Gerais;

Ao Prof. Alain Quivy, pela acolhida no Laboratório de Novos Semicondutores do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, e ao seu aluno de Doutorado Marcel Claro, pela assistência nas medidas de fotocorrente por FTIR.

Também agradeço ao coordenador de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Prof. Ricardo Prada, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) a bolsa de estudos e a excelência do ensino e do ambiente universitário que pude desfrutar; e ao DISSE (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Nanodispositivos Semicondutores) a união de esforços em torno do desenvolvimento da Nanotecnologia no país.

De nenhuma maneira poderia deixar de agradecer aos amigos seu apoio ao longo dos árduos meses que dediquei a este trabalho. Meus especiais agradecimentos:

À querida amiga Marcia Jasbinschek, por este dia despertar;

A Pedro, Luciana, Guilherme, Janeth, Rudy, Renato, Lesslie, Roberto, Loïk, Daniela, Jose Ruiz, Eleonora, Amanda, Elaine, Marcelo e Dna. Paulina, que foram por dois anos minha família, sob o teto do LabSem;

A Gabriela, Bernardo e Valentina, por tão amavelmente me receberem em sua casa, em São Paulo, nas ocasiões em que precisei visitar a USP;

A Tania Morandi, pela amizade de longa data;

Ao amigo Sasha Nicolas, do TechGraph, e aos amigos Cesar e Neileth, Gil, Luciano e Francesco, da Física;

A Lucas Hermann da Silva Tavares, pelo seu indelével sorriso;

A André e Julio Ferreira Lopes, grandes companheiros;

A Felipe Nóbrega, Astrid Kuerten, Elsy Aldana, e Thiago, por terem ajudado em momentos cruciais;

A Maria José pela comida gostosa, saudável, de preço acessível, e pela simpatia;

e a todas as inúmeras pessoas que tocaram meu caminho de maneira positiva ao longo da jornada.

Resumo

Hermann, Eric; Lustoza de Souza, Patricia. **Os processos de transição eletrônica em fotodetectores intrabanda e o estudo de um caso particular**. Rio de Janeiro, 2016. 88p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O funcionamento de detectores fotocondutivos se baseia na geração de corrente elétrica por fotoexcitação de portadores de carga. Neste trabalho, estudamos os diversos processos que contribuem para a geração de corrente em fotodetectores intrabanda (BC) e construímos um método de investigação para revelar, dentre as diferentes possibilidades, os processos que resultam na emissão eletrônica em um dispositivo concreto. Uma vez estabelecida uma metodologia, passamos ao estudo de um caso particular: um fotodetector baseado em pontos e poços quânticos acoplados, com picos de absorção no infravermelho médio. Através da comparação de espectros de absorção e fotocorrente, medidos por espectroscopia de transformada de Fourier, e de simulações computacionais para o cálculo das forças de oscilador, indicamos as transições óticas e os processos de transporte eletrônico envolvidos na fotocondutividade do dispositivo.

Palavras-chave

Infravermelho; semicondutores; fotodetectores; nanodispositivos; QDIPs; DWELLS; intrabanda

Abstract

Hermann, Eric; Lustoza de Souza, Patricia (Advisor). **Electronic transition processes in intraband photodetectors and a case study**. Rio de Janeiro, 2016. 88p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The operation of photoconductive detectors is based on the generation of current through photoexcitation of charge carriers. In this work, we study the various processes that contribute to the generation of current in intraband (CB) photodetectors and build a method of investigation to reveal, among the different possibilities, the processes that actually result in electron emission in a particular device. After establishing a methodology, we apply it to a case study, more specifically, a dot-in-a-well (DWELL) photodetector with absorption peaks in the mid-infrared. By comparing absorption and photocurrent FTIR spectra as well as oscillator strength calculations performed by a computer simulation of the structure, we have approached the optical transitions and electron transport processes involved in the device's photoconductivity.

Keywords

Infrared; semiconductors; photodetectors; nanodevices; QDIPs; DWELLs; intraband

À

Elizabeth de Otero Hermannny
(*in Memoriam*)

e aos meus filhos
Diogo e Sophia

Prefácio

O funcionamento de detectores fotocondutivos se baseia na geração de corrente elétrica por fotoexcitação de portadores de carga. Este trabalho descreve os diversos processos que contribuem para a geração de corrente em fotodetectores intrabanda, construindo um método de investigação para revelar, dentre as diversas possibilidades, os processos que resultam na emissão eletrônica em um dispositivo concreto. Será estudada apenas a classe de fotodetectores em que os portadores de carga são elétrons na banda de condução. A apreciação da outra classe, onde os portadores são buracos na banda de valência, desenvolve-se a partir de outras diversas considerações, que não abordaremos. Uma vez estabelecida uma metodologia, passamos ao estudo de um caso particular: um fotodetector baseado em pontos e poços quânticos acoplados, com picos de absorção no infravermelho médio.

Uma breve introdução a fotodetectores intrabanda antecede um capítulo sobre corrente de escuro. Embora contrapostos à fotocorrente no estabelecimento de uma detectividade para o dispositivo, os processos geradores de corrente de escuro fazem parte dos processos de transição e emissão eletrônica do fotodetector e medidas experimentais de corrente de escuro são capazes de lançar insight sobre a sua estrutura.

Para a investigação das transições intrabanda envolvidas nos picos de absorção, nosso objeto no capítulo 3, deve-se lançar mão de cálculos computacionais de força de oscilador. A obediência ou não de um dispositivo às regras teóricas de seleção é contrastada com a presença das simetrias requeridas pela teoria e com a interferência de eventuais assimetrias no dispositivo concreto.

O transporte dos elétrons fotoexcitados constitui a etapa final da geração de fotocorrente. Quando a transição eletrônica é *bound-to-continuum*, ele se dá diretamente com a fotoexcitação, sem a intermediação de um processo complementar de emissão eletrônica. De outro modo, a emissão eletrônica é realizada termicamente, por tunelamento, por efeito Auger ou por processo multifóton. Em alguns dispositivos, o transporte eletrônico se dá através de uma corrente de deslocamento. Essa diversidade está reunida no capítulo 4.

O capítulo 5 traz uma descrição do dispositivo escolhido para a investigação experimental (um fotodetector baseado em pontos quânticos), incluindo a sequência das nanocamadas em sua região ativa, desenho da banda de condução, dopagem e a morfologia dos pontos quânticos, além dos métodos de caracterização usados.

Os resultados da investigação são apresentados no capítulo 6, seguido das conclusões e propostas para futuros desenvolvimentos. Encerrando a dissertação, a metodologia especialmente desenvolvida para as delicadas medidas de absorção de fotodetectores baseados em pontos quânticos é apresentada em um apêndice.

Sumário

1ª Parte

TEORIA

1. Introdução: A conquista do infravermelho	13
1.1 Fotodetectores de infravermelho	14
1.2 De interbanda a intrabanda	16
1.3 Uma questão semântica	22
2. Corrente de escuro, energia de ativação e temperatura crítica	23
2.1 <i>Thermionic-assisted theory</i>	24
2.2 Aproximação de <i>bias</i> reduzido	26
2.3 Energia de ativação	27
2.4 Gráfico de Arrhenius	28
2.5 Temperatura crítica	28
2.6 Corrente de escuro em QDIPs	30
3. A transição ótica	32
3.1 Grau de confinamento	33
3.2 Espectros	34
3.3 Força de oscilador	37
3.4 Estados populados	38
3.5 Regras de seleção	40

4. O transporte eletrônico	41
4.1 Condições de contribuição	41
4.2 Geração de fotocorrente	42
4.3 Alguns métodos de avaliação	44

2ª Parte INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

5. O estudo de um caso particular	47
5.1 QDIPs representam um avanço em relação a QWIPs?	47
5.2 O dispositivo	50
5.3 A simulação computacional	54
5.4 Os métodos de caracterização	56
6. Resultados	57
6.1 Considerações preliminares	57
6.2 A investigação da transição ótica	60
6.3 A investigação do transporte eletrônico	66
6.4 Outros resultados	70
7. Conclusões	76
Referências bibliográficas	79
Apêndice: Metodologia para medidas de absorção	83