



María Cristina López Areiza

**Estudo das características de moduladores de amplitude
fabricados com estruturas semicondutoras *InAlAs/InGaAs* e
AlGaAs/GaAs MQW.**

Tese de Doutorado

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

Orientadora: Patrícia Lustoza de Souza

Rio de Janeiro, fevereiro 16 de 2005

María Cristina López Areiza

**Estudo das características de moduladores de amplitude
fabricados com estruturas semicondutoras *InAlAs/InGaAs* e
AlGaAs/GaAs MQW.**

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

Prof^a. Patrícia Lustoza de Souza

Orientadora
PUC-Rio

Prof^a. Sandra Marcela Landi

LabSem-CETUC-PUC
PUC-Rio

Prof. Jean Pierre von der Weid

PUC-Rio

Prof. Mauricio Pamplona Pires

UFRJ

Prof. Wagner Nunes Rodrigues

UFMG

Prof. Gustavo Soares Vieira

IFAV-CTA

Prof^a. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, fevereiro 16 de 2005

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

María Cristina López Areiza

Graduou-se em Física (1995) e fez Mestrado em Física com ênfase em Instrumentação (2000) na Universidade de Antioquia (Colômbia).

Ficha Catalográfica

Areiza, María Cristina López

Estudo das características de moduladores de amplitude fabricados com estruturas semicondutoras *InAlAs/InGaAs* e *AlGaAs/GaAs* MQW; orientadora: Patricia Lustoza de Souza. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

v., 172 f.: il. ; 29,7 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Moduladores. 3. BPM. 4. Eletroabsorção. 5. Guias de onda. 6. InAlAs. 7. InGaAs. 8. GaAs. 9. AlGaAs. I. Souza, Patrícia Lustoza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A meus pais, Julio Oscar López Henao e Amanda de Jesús Areiza Peláez,
A seus sonhos.

A Sergio Leon Montoya Castillo (el Tancho) pelo voto de confiança, apoio
moral e sentimental

Agradecimentos

A Deus.

A minha orientadora a Professora Patrícia Lustoza de Souza e ao professor Mauricio Pamplona Pires, pela orientação e por tudo que me ensinaram.

À PUC-Rio e o CLAF, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meus amigos e colegas de laboratório, Sandra Marcela Landi, Christiana Villas Boas Tribuzy, Artur López, Vinicius Miranda, Francis Guastavino e Marilene.

Ao Iracildo Oliveira, pela sua atenção, orientação e estar sempre nas horas mais difíceis do trabalho.

Ao Professor Jean Pierre Von der Weid, pela sua orientação e empréstimo de diferentes aparelhos.

À minha querida Amália Regina de Oliveira, pela sua companhia e incondicional ajuda.

Ao Professor Wagner Rodrigues, pela concessão do substrato de GaAs para o crescimento das amostras de AlGaAs/GaAs.

À Professora Maria Cristina Carvalho pelo empréstimo do EDFA. Ao professor Cláudio Lenz, por me permitir usar o laser sintonizável de Titânio-Safira e ao professor Newton Frateschi, por me ensinar novas maneiras de clivar as amostras semicondutoras.

Ao Giancarlo, por me ensinar a técnica para apontar a fibra óptica e ajuda no concerto de circuitos eletrônicos.

Aos meus amigos da alma Nelson Perez, Carmelina di Santis, César Rodriguez, Gladys Adriana Quintero, Sully Milena Mejía, Marina Ocampo, Márcia e Mercia Betânia, Jaime González, Julia, e todos aqueles que de uma ou outra forma participaram deste aprendizado... por todo seu apoio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

RESUMO

Areiza, Maria Cristina López, Lustoza de Souza, Patrícia **Estudo das características de moduladores de amplitude fabricados com estruturas semicondutoras *InAlAs/InGaAs* e *AlGaAs/GaAs***. Rio de Janeiro, 2005. 172p. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

No presente trabalho de tese, se faz uma avaliação de moduladores de amplitude baseados no efeito de electro-absorção. As estruturas usadas para a fabricação dos dispositivos foram estruturas com poços quânticos múltiplos de *InAlAs/InGaAs* e *AlGaAs/GaAs*. As estruturas de *InAlAs/InGaAs* foram projetadas para trabalhar na faixa comercial das telecomunicações (1.55 μm). Por isto a importância de aperfeiçoar os parâmetros de desempenho do dispositivo, tais como *Stark shift*, *chirp*, razão de contraste, perda por inserção, entre outros. Um estudo sistemático prévio destas estruturas foi realizado por Pires [Pires,1998]. Ele propõe variar a concentração de gálio na liga para produzir uma leve tensão na estrutura e modificar desta forma as propriedades ópticas do material. O estudo de [Pires,1998] propôs uma faixa de valores para variar a concentração de gálio (entre 46% e 52%) onde pode ser encontrada a melhor condição de operação do dispositivo. Cabe a esta tese aprofundar o estudo nesta faixa de valores, e decidir os parâmetros mais adequados para operação. No referente às estruturas de *AlGaAs/GaAs*, se toma como partida uma proposta teórica de [Batty *et al*, 1993], e estudada posteriormente por [Tribuzy, 2001], onde se sugere usar finas camadas de dopagem delta (δ) nos poços de *GaAs* para melhorar o deslocamento *Stark* em 87% para um campo aplicado de 40 kV/cm. O dispositivo foi desenhado e fabricado, obtendo-se um valor de 78% para o mesmo campo aplicado, resultado relevante, pois é a verificação experimental de uma proposta teórica.

Palavras-Chave

Moduladores de eletroabsorção, MQW, *AlGaAs/GaAs*, *InAlAs/InGaAs*, dispositivos opto-electrônicos, campo próximo.

ABSTRACT

Areiza, Maria Cristina López, Lustoza, de Souza Patrícia. **Study of the characteristics of modulators of amplitude manufactured with semiconducting structures *InAlAs/InGaAs* and *AlGaAs/GaAs* MQW.** Rio de Janeiro, 2005. 172p. PhD. Thesis. Department of Electrical Engineering, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

In this thesis work, is made an evaluation of modulators of amplitude based in the electrum-absorption effect. The structures used for the devices were multiple quantum wells of *InAlAs/InGaAs* and *AlGaAs/GaAs*. The structures of *InAlAs/InGaAs* are used to work in the commercial band of the telecommunications (1,55 μm). This is the reason it is important to optimize the parameters of performance of the device, such as the Stark shift, chirp, contrast reason, insertion loss, etc. Previously, a systematic study of these structures was made by [Pires, 1998], the gallium concentration was varied to produce a strain in the structure and to modify the optic properties of the material. In the study of [Pires, 1998] considered the Gallium concentration was varied between 46% and 52% in which range the best condition to operate the device can be found. This is part of the work here presented. In this thesis this range of values was studied in more detail. For the structures of *AlGaAs/GaAs*, a theoretical proposal of [Batty *et al*, 1993] was experimentally investigated. It was suggested a *nipi* structure to use a fine delta doped (δ) in the *GaAs* wells, this delta doped will improve in 87% the Stark shift for a field of 40 KV/cm. The device was simulated and manufactured, obtaining a value of 78 % for the same field applied, this is a excellent result, because this confirm the theoretical prediction.

Keywords

Electroabsorption modulator, MQW, *AlGaAs/GaAs*, *InAlAs/InGaAs*, optoelectronic devices, near field.

Sumário

Sumário	i
Lista de Tabelas	iii
Listas de Figuras	iv
1 Introdução	19
2 Fundamentação Teórica	25
2.1 Mecanismo de absorção em poços quânticos e efeito <i>Stark</i> quântico confinado	25
2.2 Efeito <i>Stark</i> em estruturas de poços quânticos com dopagem delta ..	28
2.3 Guias de onda dielétricos	31
2.4 Propagação em guias de onda dielétricos	34
2.5 Modulador	37
2.5.1 Características de Moduladores	38
2.5.1.1 Razão de contraste	39
2.5.1.2 Perda de inserção	40
2.5.1.3 <i>Chirp</i>	41
2.5.1.4 Capacitância	42
2.5.4.5 Figura de mérito	43
2.6 Modelo para estimar o coeficiente de absorção nas amostras <i>AlGaAs/GaAs</i>	43
2.7 Modelo para estimar o coeficiente de absorção nas amostras <i>InGaAs/InGaAs</i>	61

3	Aspectos experimentais	50
3.1	Fotocorrente	51
3.2	Campo próximo	53
3.3	Transmissão	56
3.4	Processamento de guias de onda	57
4	Simulação teórica dos guias de onda	62
4.1	Parâmetros da simulação	66
4.2	Simulação da estruturas de <i>InAlAs/InGaAs</i>	67
4.3	Simulação da estruturas de <i>AlGaAs/GaAs</i>	72
5	Resultados relativos às estruturas <i>AlGaAs/GaAs</i>	78
5.1	Amostras crescidas.....	83
5.2	Fotocorrente	86
5.2.1	Medida do deslocamento <i>Stark</i>	87
5.3	Medida de χ^2	95
5.3.1	Medida de razão de contraste.....	96
5.3.2	Transmissão	99
5.4	Medida da perda por inserção	105
5.5	Figuras de mérito	106
5.6	Medida do <i>chirp</i>	108
5.7	Campo próximo	111
6.	Resultados relativos às estruturas <i>InAlAs/InGaAs</i>	118
6.1	Fotocorrente.....	126

6.1.1	Deslocamento <i>Stark</i>	131
6.1.2	Variação do coeficiente de absorção.....	132
6.1.3	Perda de inserção.....	134
6.1.4	Figuras de mérito.....	135
6.1.5	Parâmetro de chirp.....	138
6.2.	Campo próximo.....	139
6.2.1	Razão de contraste.....	143
7	Conclusões e trabalhos futuros	148
	Referências bibliograficas.....	152
	Apêndice A : Programa de campo próximo.....	161
	Apêndice B : Programa de Fotocorrente.....	165
	Apêndice C : Bases teórica do programa BeamProp.....	167

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Cálculo do índice efetivo de refração da camada ativa, para diferentes valores da concentração de Alumínio	73
Tabela 5.1 – Propriedades estruturais das amostras de <i>AlGaAs/GaAs</i> estimadas a partir das medidas de raios X e o modelo de massa efectiva	85
Tabela 5.2 – Valor do coeficiente de absorção em cm^{-1} medido para a geometria perpendicular, para diferentes <i>detuning</i>	104
Tabela 5.3 – (a) Figura de mérito ($\Gamma\Delta\alpha/F$) e (b) campo necessário para obter uma determinada razão de contraste (10,15 e 20 dB) para um <i>detuning</i> de operação de 40 meV para moduladores de <i>AlGaAs/GaAs</i>	107
Tabela 5.4 – Resultados do ajuste gaussiano realizado no <i>spot</i> do sistema de calibração	114
Tabela 5.5 – Medida da eficiência do acoplamento óptico em guias (Σ) de onda com diferente largura de mesa.	115
Tabela 5.6 – Valores em dB da perda por propagação em guias de onda, P_{guia} , para diferentes larguras de mesa.	116
Tabela 6.1 – Parâmetros estruturais da amostra 297. T_p e T_b são as larguras do poço e da barreira respectivamente,	122
Tabela 6.2 – Propriedades estruturais das amostras <i>InAlAs/InGaAs</i>	124
Tabela 6.3 – Absorção residual e perda de inserção estimadas para <i>detuning</i> de 30 e 40 meV	134
Tabela 6.4 – Campo elétrico necessário para obter 10 e 15 dB de razão de contraste, para um <i>detuning</i> de 30 meV.....	135
Tabela 6.5 – Figura de mérito $\Gamma\Delta\alpha/\Delta F$	136
Tabela 6.6 – Propriedades de acoplamento óptico dos guias de <i>InAlAs/InGaAs</i> para uma largura de mesa de $5\mu\text{m}$	142

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Amostras com degraus dentro do poço desenvolvidas para maximizar o deslocamento <i>Stark</i> [Woodward <i>et al</i> , 1995].....	21
Figura 2.1 – Esquema de um poço quântico típico de largura L_0 e energia de <i>gap</i> do material E_{gp} . A energia do material da barreira é E_{gb} . A diferença de potencial das bandas de valência e condução são respectivamente ΔE_v e ΔE_c	26
Figura 2.2 – Esquema do efeito de absorção em poços quânticos em (a) ausência e (b) presença do campo elétrico transversal aplicado (Efeito <i>Stark</i>).....	27
Figura 2.3 – Esquema da estrutura <i>pin</i> utilizada para implementar experimentalmente o efeito <i>Stark</i>	27
Figura 2.4 – Esquema da dopagem delta. De acima para baixo, a primeira figura representa um plano de dopagem. O segundo gráfico é a distribuição da carga atômica e os últimos dois gráficos correspondem ao campo e ao potencial elétrico devido à dopagem	29
Figura 2.5 – (a) Energia potencial numa estrutura <i>nipi</i> em função da posição da dopagem delta. (b) Comparação do efeito da dopagem delta na estrutura de bandas. As funções de onda do estado fundamental do elétron e do buraco também estão mostradas.	30
Figura 2.6 – Esquema de um guia de onda planar.....	31
Figura 2.7 – Seção transversal de estruturas de canal: a) <i>raised strip</i> , b) <i>embedded strip</i> , c) <i>buried channel</i> , d) guia <i>rib</i> , e) guia <i>ridge</i>	32
Figura 2.8 – A figura (a) apresenta a geometria da estrutura utilizada por Inoue <i>et al</i> [Inoue <i>et al</i> , 1985]. Os resultados teóricos da perda por inserção estão apresentados em função: (b) da espessura da cavidade do guia e (c) da razão entre o tamanho do <i>spot</i> na direção vertical e o tamanho do <i>spot</i> na fibra utilizada para o lançamento de luz	35
Figura 2.9 – Curva do fator de transmissão em função da tensão reversa aplicada. Na vizinhança do ponto S do gráfico, se apresenta uma pequena linearidade que pode ser utilizada para efeito de modulação de amplitude de pequenos sinais.....	37

Figura 2.10 – Esquema da perda de inserção e razão de contraste num modulador típico em função da diferença de potencial reversa aplicada.....	39
Figura 2.11 – Ajuste teórico da curva de fotocorrente em função da energia para uma amostra de <i>AlGaAs/GaAs</i> , sem tensão externa aplicada.....	45
Figura 2.12 – Espectro de transmissão de uma amostras de <i>AlGaAs/GaAs</i> em função do comprimento de onda em μm . As linhas contínuas e tracejadas correspondem à medida experimental e ajuste teórico, respectivamente.....	46
Figura 2.13 – Coeficiente de absorção em função do comprimento de onda para uma amostra de <i>AlGaAs/GaAs</i>	47
Figura 2.14 – Espectro de transmissão da amostra de <i>InAlAs/InGaAs</i> número 661 em função da energia.	48
Figura 2.15 – Curvas de fotocorrente e transmissão para $\Delta V=0$ da amostra de <i>InAlAs/InGaAs</i> número 661 em unidades arbitrárias em função da energia	49
Figura 2.16 – Curva de fotocorrente para $\Delta V=0$ da amostra de <i>InAlAs/InGaAs</i> número 661 em unidades absolutas em função da energia	49
Figura 3.1 – Configuração da experiência de fotocorrente.....	51
Figura 3.2 – Geometria de lentes utilizada para o acoplamento do feixe de luz nos guias de onda	52
Figura 3.3 – Circuito usado para polarizar o dispositivo e cortar o sinal DC	52
Figura 3.4 – Geometria de campo próximo e de campo distante. O plano da imagem está paralelo ao plano xy. z é o eixo de propagação do campo	53
Figura 3.5 – Esquema da experiência usada para medir o campo próximo em guias de onda	54
Figura 3.6 – Desenho lateral do suporte da amostra	55
Figura 3.7 – Foto dos componentes usados na medida de campo próximo	55
Figura 3.8 – Geometria da montagem da medida da transmissão.....	56
Figura 3.9 – Curva de calibração para corrosão de <i>AlGaAs/GaAs</i>	60
Figura 3.10 – Curva de calibração para corrosão de <i>InAlAs/InGaAs</i>	60
Figura 3.11 – Máscaras utilizadas no processamento de guias de onda.....	61
Figura 4.1 – Parâmetros geométricos considerados na simulação <i>Beam Propagation Method</i> (BPM)	62
Figura 4.2 – Parâmetros geométricos variados na simulação <i>BPM</i> . O valor do <i>slab</i> é zero quando a corrosão chega até o substrato. Quando não se realiza nenhuma corrosão o valor do <i>slab</i> é máximo, esta condição corresponde a um guia de onda planar.	63

Figura 4.3 – Exemplo do compute espectral dos modos. A figura mostra potência relativa em função da constante de propagação	65
Figura 4.4 – Cálculo espectral dos modos confinados no guia de <i>AlGaAs/GaAs</i> desenhado para esta tese.	67
Figura 4.5 – Esquema da estrutura proposta para fabricar guias de <i>InAlAs/InGaAs</i>	68
Figura 4.6 – Variação da potência total normalizada em função do <i>slab</i>	69
Figura 4.7 – Variação da potência total normalizada em função da largura de mesa do guia de onda	70
Figura 4.8 – Cálculo da potência relativa dos modos confinados no guia de onda em função da constante de propagação de cada modo.....	71
Figura 4.9 – Cálculo do modo fundamental TE em <i>InAlAs/InGaAs</i>	71
Figura 4.10 – Perfil 3D do modo fundamental TE em guias de onda de <i>InAlAs/InGaAs</i> , com largura de mesa de 5 μm e <i>slab</i> igual a zero	72
Figura 4.11 – Estrutura proposta por Dong <i>et al</i> para cavidade óptica de laser [Dong <i>et al</i> , 1994].	72
Figura 4.12 – Esquema da estrutura proposta para fabricar guias de <i>AlGaAs/GaAs</i>	74
Figura 4.13 – Variação da potência total relativa em função da largura de mesa para guias de onda de <i>AlGaAs/GaAs</i>	75
Figura 4.14 – Variação da potência total relativa em função do <i>slab</i> para guias de onda de <i>AlGaAs/GaAs</i>	75
Figura 4.15 – Cálculo espectral dos modos propagados no guia de <i>AlGaAs/GaAs</i>	76
Figura 4.16 – Cálculo do modo fundamental TE em <i>AlGaAs/GaAs</i>	77
Figura 4.17 – Perfil 3D do modo fundamental TE em <i>AlGaAs/GaAs</i>	77
Figura 5.1 – (a) Esquema que ilustra a posição da dopagem delta no poço (linha tracejada) e na barreira (linha contínua). (b) Forma do potencial depois de introduzir a dopagem	78
Figura 5.2 – Densidade de buracos na banda de valência em função da posição	80
Figura 5.3 –Fotocorrente das amostras 713 e 714, com dopagem $n = + 20\% p$ e $n = +\%10 p$ respectivamente. Medida realizada com incidência de luz perpendicular. O deslocamento <i>Stark</i> (ΔS) é estimado para uma diferença de potencial de 4 volts	81
Figura 5.4 – Calibração da concentração da dopagem delta em função do fluxo.....	82

Figura 5.5 – Esquema da estrutura <i>nipi</i> de <i>AlGaAs/GaAs</i> . As linhas pontilhadas indicam a posição da dopagem delta nas diferentes camadas	84
Figura 5.6 – Relação teórica da energia de transição $e1-hh1$ (E_g) em função da largura do poço das estruturas <i>AlGaAs/GaAs</i> estimada com o modelo de massa efetiva.....	85
Figura 5.7 – (a) Incidência da luz no plano das camadas epitaxiais, geometria usada em guias de onda e (b) Incidência da luz de forma transversal às camadas epitaxiais	86
Figura 5.8 – Deslocamento <i>Stark</i> teórico das amostras <i>AlGaAs/GaAs</i> em função do campo elétrico aplicado. O valor L_p que se encontra acima de cada linha corresponde ao valor da largura do poço considerado para cada cálculo	88
Figura 5.9 – Fotocorrente no plano das estruturas de <i>AlGaAs/GaAs</i> : (a) com dopagem delta e (b) sem dopagem delta. Medidas realizadas com luz despolarizada a 300 K	89
Figura 5.10 – Fotocorrente na geometria no plano e perpendicular às estruturas de <i>AlGaAs/GaAs</i> (a) sem dopagem delta e (b) com dopagem delta. Medidas realizadas com luz despolarizada a 300 K.....	90
Figura 5.11 – Medida de fotocorrente em função da energia para as diferentes geometrias, realizadas para ilustrar o efeito da polarização na estrutura <i>AlGaAs/GaAs</i> sem dopagem delta	91
Figura 5.12 – Medida de fotocorrente em função da energia para as diferentes geometrias, realizadas para ilustrar o efeito da polarização na estrutura <i>AlGaAs/GaAs</i> com dopagem delta	91
Figura 5.13 – Deslocamento <i>Stark</i> em função do campo elétrico aplicado para vários guias de onda de <i>AlGaAs/GaAs</i> , considerando luz despolarizada	92
Figura 5.14 – Razão entre o deslocamento <i>Stark</i> entre a amostra <i>nipi</i> de <i>AlGaAs/GaAs</i> e o deslocamento <i>Stark</i> nas amostras sem delta em função do campo elétrico aplicado	93
Figura 5.15 – Deslocamento <i>Stark</i> médio calculado a partir da fotocorrente das amostras de <i>AlGaAs/GaAs</i> na geometria paralela em função do campo elétrico aplicado	94
Figura 5.16 – Deslocamento <i>Stark</i> em função do campo elétrico aplicado medido a partir da fotocorrente na geometria perpendicular.....	95
Figura 5.17 – Razão de contraste medida em função da tensão reversa aplicada em guias com diferentes larguras de mesa e 250 μm de comprimento	97

Figura 5.18 – $\Delta\alpha$ na geometria paralela em unidades absolutas em função da tensão reversa aplicada para <i>AlGaAs/GaAs</i> , com largura de mesa $W=7\mu\text{m}$ e <i>detuning</i> de 40 meV.....	98
Figura 5.19 – Relação entre as energias do <i>gap</i> dos materiais usados para fabricar a estrutura de <i>AlGaAs/GaAs</i>	99
Figura 5.20 – Espectros de transmissão das amostras (a) com dopagem delta e (b) referência em função do comprimento de onda em μm	100
Figura 5.21 – Janela do programa <i>Spectrum</i> , o qual foi utilizado para realizar o ajuste da curva teórica de fotocorrente	101
Figura 5.22 – Ajuste teórico das curvas da fotocorrente perpendicular para amostras (a) com dopagem delta e (b) sem dopagem delta em função da energia.....	102
Figura 5.23 – Espectros de transmissão das amostras (a) com dopagem delta e (b) referência em função do comprimento de onda em μm	103
Figura 5.24 – Coeficiente de absorção (cm^{-1}) em (a) amostra com dopagem delta e (b) sem dopagem delta em função do comprimento de onda (μm) estimado mediante o ajuste da curva de transmissão.....	103
Figura 5.25 – $\Delta\alpha$ calculada a partir da fotocorrente perpendicular em função da tensão reversa aplicada nas amostras de <i>AlGaAs/GaAs</i>	104
Figura 5.26 – Fotocorrente medida na geometria paralela em função da energia. Medida realizada com luz polarizada.....	105
Figura 5.27 – PI em função da tensão reversa aplicada, para <i>detuning</i> de 40 meV, com um comprimento de guia de 250 μm e $\Gamma=0.077$	106
Figura 5.28 – Parâmetro de <i>chirp</i> calculado a partir das medidas de fotocorrente na geometria paralela e perpendicular para amostra (a) sem dopagem delta e (b) com dopagem delta em função do campo aplicado	109
Figura 5.29 – Exemplo de cálculo teórico de $\Delta\alpha$ para amostras de <i>InGaAs/GaAs</i> em função do comprimento de onda de operação	110
Figura 5.30 – Estrutura <i>nipi</i> proposta para fazer os moduladores de <i>AlGaAs/GaAs</i> com dopagem delta na camada ativa.....	112
Figura 5.31 – Perfil gaussiano (a) teórico e (b) experimental de um guia de onda fabricado com a estrutura 819. Usa-se uma largura de mesa de 5 μm	113
Figura 5.32 – Sistema de calibração do campo próximo e o tamanho do <i>spot</i>	113
Figura 5.33 – Fator de confinamento óptico em guias de onda em função da largura de mesa	117
Figura 6.1 – Energia do <i>gap</i> em função do parâmetro de rede.....	118

Figura 6.2 – Estrutura básica das amostras <i>InAlAs/InGaAs</i> . Os valores T_p e T_b correspondem à largura do poço e da barreira, respectivamente	120
Figura 6.3 – Largura dos poços em função da concentração de gálio na liga <i>InGaAs</i> calculada para diferentes energias de transição	121
Figura 6.4 – (a) Parâmetro de <i>chirp</i> e (b) $\Delta\alpha$ para a amostra 297 em função do campo elétrico	121
Figura 6.5 – Largura do poço em função da concentração de gálio na liga <i>InGaAs</i> . Os números nos retângulos correspondem às amostras novas crescidas para esta tese	123
Figura 6.6 – Esquema da amostra 665. Para as outras amostras de <i>InAlAs/InGaAs</i> tais como 664, 661, 657 e 653, muda a espessura da região ativa, pois as amostras diferem nas larguras de poço e barreira	125
Figura 6.7 – Geometria da fotocorrente perpendicular e no plano	126
Figura 6.8 – Espectro de fotocorrente em função da energia da amostra 665, nas diferentes geometrias, para uma diferença de potencial zero	127
Figura 6.9 – Espectro de fotocorrente da amostra 653, nas diferentes geometrias, para uma diferença de potencial zero	128
Figura 6.10 – Espectro de fotocorrente da amostra 657, nas diferentes geometrias, para uma diferença de potencial zero	129
Figura 6.11 – Espectro de fotocorrente da amostra 661, nas diferentes geometrias, para uma diferença de potencial zero	129
Figura 6.12 – Espectro de fotocorrente da amostra 664, nas diferentes geometrias, para uma diferença de potencial zero	130
Figura 6.13 – Deslocamento <i>Stark</i> medido a partir da fotocorrente na geometria perpendicular de amostras de <i>InAlAs/InGaAs</i>	131
Figura 6.14 – Valor de $\Delta\alpha$ (cm^{-1}) em função do campo aplicado estimada a partir da fotocorrente perpendicular das amostras de <i>InAlAs/InGaAs</i> para um <i>detuning</i> de 30 meV	133
Figura 6.15 – Mesmo gráfico da figura 6.5, onde os números das amostras foram substituídos pelo valor da perda por inserção para um <i>detuning</i> de 30 meV	135
Figura 6.16 – Mesmo gráfico da figura 6.5, onde os números das amostras foram substituídos pelo valor do campo elétrico necessário para obter 10 dB de razão de contraste e <i>detuning</i> de 30 meV	136
Figura 6.17 – Mesmo gráfico da figura 6.5, onde os números das amostras foram substituídos pelo valor da figura de mérito $\Gamma\Delta\alpha/\Delta F$ para obter 10 dB de	

razão de contraste com um <i>detuning</i> de 30 meV. A região sombreada é a região onde se obteve a melhor condição de operação do dispositivo	137
Figura 6.18 – Parâmetro de <i>chirp</i> (α_L) calculado a partir das curvas de fotocorrente perpendicular das amostras de <i>InAlAs/InGaAs</i> e comparados com o parâmetro de <i>chirp</i> das estruturas 296 e 297, para um <i>detuning</i> de 30 meV	138
Figura 6.19 – Geometria da estrutura de <i>InAlAs/InGaAs</i> utilizada para fabricar os dispositivos desta tese.....	139
Figura 6.20 – Perfil dos guias após a corrosão com (a) $W=7\ \mu\text{m}$ e (b) $W=3\ \mu\text{m}$	140
Figura 6.21 – Imagem de MEV dos guias processados depois da deposição de polimida	140
Figura 6.22 – Perfil 3D do campo próximo do guia de onda 665	141
Figura 6.23 – Imagens da intensidade do campo (a) experimental e (b) teórico medidas na face de saída do guia.....	141
Figura 6.24 – Medida de razão de contraste nos guias de <i>InAlAs/InGaAs</i> em função da tensão aplicada para luz despolarizada.....	144
Figura 6.25 – Simulação da propagação de diferentes modos existentes na cavidade óptica da estrutura mostrada na figura 6.18.....	145
Figura 6.26 – Cálculo espectral dos modos existentes na cavidade óptica da estrutura (a) 661 e (b) 665 em função da constante de propagação dos modos	146