



Luciene da Silva Demenicis

**Transformadores de impedância banda larga para
dispositivos optoeletrônicos**

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.

Orientador: Maria Cristina Ribeiro Carvalho

Rio de Janeiro, maio de 2004



Luciene da Silva Demenicis

**Transformadores de Impedância Banda
Larga para Dispositivos Optoeletrônicos**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau 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. Maria Cristina Ribeiro Carvalho

Orientadora

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dra. Maria Thereza M. Rocco Giraldi

IME

Dr. José Carlos Araújo dos Santos

IME

Dr. Antonio Sérgio Bezerra Sombra

UFC

Dr. Walter Margulis

ACREO

Dra. Patrícia Lustoza de Souza

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de maio de 2004

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

Luciene da Silva Demenicis

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em 1993, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dois anos depois, recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio. Neste período trabalhou com caracterização óptica de semicondutores e de polímeros. Em 1997, ingressou para as Forças Armadas como oficial de carreira do Exército Brasileiro. Durante os anos de 2001 e 2003 desenvolveu sua tese de doutorado na área de microondas aplicada a dispositivos optoeletrônicos. Atualmente ocupa a função de professora do curso de graduação e de pós-graduação do Instituto Militar de Engenharia (IME).

Ficha Catalográfica

Demenicis, Luciene da Silva

Transformadores de impedância banda larga para dispositivos optoeletrônicos / Luciene da Silva Demenicis; orientador: Maria Cristina Ribeiro Carvalho. - Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia elétrica, 2004.

209 f.: il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia elétrica .

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica—Teses. 2. Impedância. 3. Linha de transmissão planar. 4. Dispositivos optoeletrônicos. 5. Filme de elevada constante dielétrica. I. Carvalho, Maria Cristina Ribeiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu querido marido Mauro.

Agradecimentos

À Professora Maria Cristina Ribeiro Carvalho pela orientação na execução deste trabalho. Sua dedicação, objetividade e compreensão foram determinantes para a conclusão desta tese de doutorado em apenas três anos. Além da exemplar orientação, agradeço pelos ensinamentos que me transmitiu e pela amizade.

Ao Professor Luiz Fernando Martins Conrado pelas proveitosas discussões, pelos ensinamentos e pela colaboração. Sou especialmente grata ao Professor Conrado pelo apoio nos trabalhos de simulação apresentados nesta tese.

Ao Doutor Walter Margulis pelas brilhantes e valiosas sugestões, pelo incentivo e pelo empenho em prestar todo o apoio possível.

Ao meu marido e colega Mauro Cezar Rebello Cordeiro pelo incentivo e apoio incondicionais, pelo carinho, pela paciência, pela compreensão, e além de tudo, pelas proveitosas idéias e sugestões.

Aos colegas Daniele Seixas e Rodolfo Lima pela amizade e pelo apoio constante, principalmente nas horas difíceis.

Ao Professor Sérgio Sombra pela fabricação dos filmes utilizados neste trabalho.

À equipe do Laboratório de Semicondutores de PUC-Rio (LabSem) chefiado pela Professora Patrícia Lustoza de Souza, pelo apoio que viabilizou a confecção dos circuitos de microondas desenvolvidos nesta tese. Meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos, pela presteza e pela simpatia a Christiana Villas-Bôas Tribuzy, Maurício Pamplona Pires, Guilherme Xavier, Paulo Eduardo de Andrade Ziliani, e Maria Cristina Areiza. Ao químico Iracildo Conceição de Oliveira pelas orientações fundamentais sobre química. À Amália Regina de Oliveira pelas orientações administrativas sempre corretas e eficientes.

Aos alunos de iniciação científica Diogo Machado e Silva, Renata Goldman e Daniella Maia Gomes pela ajuda.

À Professora Maria Thereza Rocco Giraldi pelo incentivo e pela orientação acadêmica junto ao IME.

Ao Professor Marbey Mosso e a seus alunos pelo apoio e pelo fornecimento de materiais.

Ao Sr. Braz Simão da Cruz pelos trabalhos de oficina mecânica.

Aos meus chefes no Instituto Militar de Engenharia - IME pelo apoio.

Ao meu irmão Luiz Eduardo da Silva Demenicis pela torcida e pelos ensinamentos de desenho técnico necessários à fabricação de foto-ferramentas.

Aos meus pais, José Luiz Demenicis e Sandra da Silva Demenicis, pela educação privilegiada que me proporcionaram e pelo exemplo de perseverança e força que me deram neste período. Agradeço também pelo incentivo, pela compreensão e pela confiança que sempre depositaram em mim.

A toda a minha família pelo apoio constante e pela compreensão.

Ao Ministério da Defesa - Exército Brasileiro - Secretaria de Ciência e Tecnologia - Instituto Militar de Engenharia pela liberação em tempo integral para a dedicação exclusiva ao desenvolvimento desta tese.

À Ericsson Telecomunicações S/A pelo suporte financeiro.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Demenicis, Luciene da Silva. **Transformadores de impedância banda larga para dispositivos optoeletrônicos**. Rio de Janeiro, 2003. 209p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A utilização de transformadores de impedância banda larga possibilita o acoplamento de forma eficiente das linhas convencionais de $50\ \Omega$ dos sistemas de alta frequência aos componentes optoeletrônicos de alta velocidade de baixa impedância, tais como lasers semicondutores (tipicamente com 3 a $5\ \Omega$ de resistência de entrada). Uma das principais restrições para a realização de um transformador de impedância planar para uso em sistemas de comunicações ópticas é a sua dimensão física. A fim de se obter um transformador de impedância compacto, de dimensões compatíveis com às dos dispositivos optoeletrônicos, foram analisadas diferentes configurações. Inicialmente foi analisada a configuração coplanar (CPW) utilizando substrato de altíssima constante dielétrica. Devido às limitações encontradas nesta configuração, são propostas, aqui, duas outras soluções. As duas novas configurações propostas associam ao substrato *bulk* convencional de alumina, filmes de elevada constante dielétrica. Foi desenvolvida uma técnica para caracterizar a constante dielétrica e as perdas dos filmes especialmente fabricados para este trabalho. As análises teóricas mostraram que as configurações propostas apresentam desempenho muito superior ao desempenho das configurações convencionais CPW. Foi implementado o transformador de impedância utilizando uma das soluções propostas e seu desempenho foi avaliado experimentalmente.

Palavras-chave

Casamento de impedância; linha de transmissão planar; dispositivos optoeletrônicos banda larga; filme de elevada constante dielétrica.

Abstract

Demenicis, Luciene da Silva. **Transmission line transformer for high-speed optoelectronic devices**. Rio de Janeiro, 2003. 209p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wide-band transmission line impedance transformer enables efficient coupling of $50\ \Omega$ transmission line circuits to low impedance high-speed optoelectronic components such as semiconductor lasers (typically with input resistance of 3 to $5\ \Omega$). The physical dimensions of the planar transmission line transformer have to be properly chosen to allow its use in optical communication systems. In order to design a high performance impedance transformer with physical dimensions compatible with optoelectronic components, several possibilities were investigated. A CPW configuration with very high dielectric constant *bulk* substrate has been analyzed. Simulations have shown some limitations in the performance of this configuration. Then, two new configurations were introduced. Both configurations are obtained using high dielectric constant films and alumina *bulk* substrate. A new technique has been developed in order to characterize the dielectric constant and the losses of the films specially made for this thesis. Simulations have shown that the performance of both new configurations is much better than the conventional CPW configuration performance. The planar transmission line impedance transformer has been constructed using a new configuration and its performance has been experimentally evaluated.

Keywords

Impedance matching; planar transmission line; optoelectronic devices; high dielectric constant films.

Sumário

1 Introdução	28
2 Transformador de impedância em linha de transmissão	34
2.1. Introdução	34
2.2. Transformadores de impedância com perfil Chebyshev	38
2.3. Transformador de impedância em linha de transmissão planar e a utilização de filmes dielétricos	44
2.4. Análise teórica dos transformadores de impedância	49
2.4.1. HFSS e a análise no domínio da frequência	50
2.4.2. Martins: análise no domínio do tempo e do sistema óptico	55
2.5. Análise teórica no domínio do tempo dos efeitos do TLT no desempenho de sistemas ópticos	61
2.5.1. Influência do transformador de impedância na propagação de pulsos elétricos curtos	61
2.5.2. Influência do transformador de impedância no desempenho de sistemas ópticos	69
2.5.3. Influência dos parasitas do laser e da montagem na escolha do TLT	77
2.6. Conclusões	83
3 Configurações para realização do transformador de impedância em linha de transmissão planar	85
3.1. Introdução	85
3.2. TLT na configuração CPW convencional utilizando substrato de elevada constante dielétrica	86
3.3. TLT realizado com a primeira configuração proposta: TLT OCPW	92
3.4. TLT realizado com a segunda configuração proposta: TLT QCPW	103
3.5. Conclusões	117

4 Filmes promissores	119
4.1. Introdução	119
4.2. Características dos materiais de alta constante dielétrica	121
4.3. Descrição dos filmes candidatos mais promissores	126
4.3.1. Titanato de estrôncio	126
4.3.2. Titanato de bário (BTO) e CCTO	128
4.3.2.1. Método de fabricação e análise dos filmes dielétricos	129
4.3.2.2. Medida da constante dielétrica e das perdas em baixa frequência	132
4.3.2.3. Tentativas e estratégias adotadas na busca do filme dielétrico adequado	134
4.4. Conclusões	136
5 Caracterização das propriedades dielétricas de filmes utilizando ressoadores lineares CPW	138
5.1. Introdução	138
5.2. Análise teórica do ressoador linear	140
5.3. Realização prática dos circuitos passivos de microondas	148
5.4. Resultados experimentais de medidas utilizando ressoadores	150
5.5. Validação da metodologia através da medida com linhas CPW	160
5.6. Conclusões	168
6 Realização prática de um TLT na configuração OCPW utilizando filme espesso de elevada constante dielétrica	169
6.1. Introdução	169
6.2. Análise de tolerância às características do filme	172
6.3. Caracterização do TLT implementado	174
6.3.1. Reflectometria no domínio do tempo	176
6.3.2. Caracterização do TLT no domínio da frequência	181
6.3.3. Caracterização no domínio do tempo do TLT <i>back-to-back</i>	186
6.3.4. Metodologia para medida do desempenho de lasers semicondutores utilizando TLT	189
6.4. Conclusões	194

7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	196
8 Referências bibliográficas	200

Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores dos parâmetros do laser semiconductor.	70
Tabela 2 - Especificação dos <i>bits</i> do sinal do gerador de RF.	71
Tabela 3 - Valores dos elementos correspondentes aos lasers A e B.	77
Tabela 4 - Resultados obtidos para três filmes de BTO.	156
Tabela 5 - Resultados obtidos experimentalmente em alta e baixa frequência.	158

Lista de figuras

- Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema de alimentação de um laser semiconductor com diferentes possibilidades de acoplamento entre o gerador e o laser, utilizando: um TLT, ou uma linha de transmissão (LT) convencional ou uma LT associada a um resistor de resistência R. 35
- Figura 2 - Representação de uma linha afilada, de comprimento L, na qual a impedância normalizada $Z(y)$ varia continuamente ao longo da linha. 39
- Figura 3 - Resposta em frequência do coeficiente de reflexão de uma linha afilada Chebyshev. 40
- Figura 4 - Produto $\beta_c L$ (constante propagação na frequência de corte vezes o comprimento L do TLT) em função da tolerância na banda ρ normalizada em relação à razão de transformação (Z_L), para diferentes perfis de linha afilada: Chebyshev, exponencial e Gaussiano. 42
- Figura 5 - Produto $\beta_c L$ (constante propagação na frequência de corte vezes o comprimento L do TLT) para um linha afilada Chebyshev em função da razão de transformação para diferentes valores de tolerância na banda passante. 43
- Figura 6 - Seção transversal de uma linha de transmissão planar CPW (a) e seu diagrama com as linhas de campo (b). 45
- Figura 7 - Seção transversal de uma linha de transmissão planar CPW com filmes depositados acima e abaixo da fita condutora central e dos semi-planos de terra laterais. 47
- Figura 8 - Diagrama esquemático do sistema de alimentação do laser semiconductor com diferentes possibilidades de acoplamento entre o gerador e o laser. O detalhe mostra o circuito elétrico equivalente do laser, onde: R_s é a carga resistiva do laser, R_{sub} e C_s são os parasitas intrínsecos do laser e R_p , L_p e C_p são os parasitas da montagem. 56
- Figura 9 - Diagrama de blocos do sistema óptico digital. 57

Figura 10 - Seqüência de 64 <i>bits</i> pseudo-aleatória com taxa de 10 Gbit/s.	62
Figura 11 - Corrente na carga em função do tempo após um TLT com freqüência de corte extremamente baixa (1 Hz).	63
Figura 12 - Corrente na carga em função do tempo após o TLT com freqüência de corte de 5 GHz.	64
Figura 13 - Corrente na carga em função do tempo após o TLT com freqüência de corte de 5 GHz, onde são apresentados apenas três <i>bits</i> da seqüência.	64
Figura 14 - Diagrama de olho do sinal de corrente na carga após o TLT com freqüência de corte de 5 GHz para uma taxa de repetição de <i>bits</i> de 10 Gbit/s.	65
Figura 15 - Efeito do <i>undershoot</i> (Δ_u) normalizado em relação ao valor da amplitude P em função da taxa de repetição de bits, para diferentes freqüências de corte normalizadas (f_{cnorm}) do TLT.	66
Figura 16 - Parâmetro Δ_o normalizado em relação ao valor da amplitude P como função da taxa de repetição de <i>bits</i> para diferentes freqüências de corte normalizadas.	67
Figura 17 - Amplitude do sinal de corrente na carga em função do tempo, para um intervalo de tempo igual a um <i>bit slot</i> , após três TLTs com freqüências de corte de: 1 Hz, 0.5 GHz e 1.5 GHz.	68
Figura 18 -Diagrama de blocos do sistema óptico digital (figura idêntica à figura 9).	69
Figura 19 - Diagrama de olho da corrente no fotodetector de um sistema óptico de 2.5 Gbit/s acoplado-se o laser diretamente ao gerador (sem TLT).	72
Figura 20 - Diagrama de olho da corrente no fotodetector de um sistema óptico de 2.5 Gbit/s quando um TLT com freqüência de corte de 0.2 GHz acopla o gerador ao laser.	73
Figura 21 - Diagrama de olho da corrente no fotodetector de um sistema óptico de 2.5 Gbit/s quando um TLT ótimo com freqüência de corte de 2 GHz acopla o gerador ao laser.	73
Figura 22 - Diagrama de olho da corrente no fotodetector de um	

sistema óptico de 2.5 Gbit/s quando um TLT com frequência de corte de 4 GHz acopla o gerador ao laser.	74
Figura 23 - Melhoria da BER em função da frequência de corte do TLT, para o sistema de 2.5 Gbit/s.	74
Figura 24 - Melhoria da BER em função da frequência de corte do TLT, para o sistema de 10 Gbit/s.	75
Figura 25 - Diagrama de olho da corrente no fotodetector de um sistema óptico de 10 Gbit/s para dois casos: com o TLT ótimo (com frequência de corte de 5 GHz), representado pelos traços escuros, e sem qualquer TLT, representado pelos traços claros.	75
Figura 26 - Circuito elétrico equivalente do laser semiconductor onde são considerados: os parasitas intrínsecos do laser (R_{sub} e C_s), os parasitas da montagem (R_p , L_p e C_p) e a resistência do laser (R_s).	77
Figura 27 – Efeito do casamento de impedâncias proporcionado pelo TLT que adapta 50 Ω a 3.5 Ω , considerando os parasitas: (a) do laser A, e (b) do laser B.	79
Figura 28 - Corrente normalizada acoplada ao laser B quando são utilizados, na ordem em que aparecem: TLT que casa 50 Ω a 3.5 Ω ; linha de transmissão convencional de 50 Ω ; e TLT que casa 50 Ω a 15 Ω .	81
Figura 29 - Perda por inserção para o TLT que casa 50 Ω a 3.5 Ω para o laser A modelado de três formas: carga puramente resistiva; carga resistiva e os parasitas do laser; e carga resistiva com os parasitas do laser e os da montagem.	82
Figura 30 - Impedância característica de uma linha CPW sobre substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$ de espessura H, em função da largura da fita condutora central (W) para diferentes valores de espaçamento entre a fita central e os semi-planos de terra laterais (G), em 5GHz.	87
Figura 31 - Transformador de impedância em linha de transmissão: (a) Vista em perspectiva, e (b) Vista superior.	88
Figura 32- Perda de retorno para o TLT Chebyshev simulado sobre substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$ e 10 mm de comprimento. A linha pontilhada corresponde ao TLT ideal e a linha cheia à curva obtida pelo método	

de elementos finitos (HFSS).	89
Figura 33 - Variação da impedância da linha afilada Chebyshev ao longo do TLT para dois comprimentos de TLT: 10 mm (linha pontilhada) e 16 mm (linha cheia).	90
Figura 34 - Perda de retorno para dois TLTs Chebyshev simulados sobre substrato <i>bulk</i> $\epsilon_r=80$ de 10 mm (linha pontilhada) e 16 mm (linha cheia) de comprimento, obtidas pelo método de elementos finitos.	90
Figura 35 - Seção transversal do TLT na configuração OCPW.	92
Figura 36 - Perda de retorno de dois TLTs realizados em duas configurações: a linha cheia corresponde ao TLT CPW sobre substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$ e a linha pontilhada corresponde ao TLT OCPW com filme fino de $\epsilon_f=300$ e 1 μm espessura.	93
Figura 37 - Constante dielétrica efetiva em cada extremidade de cada um dos dois TLTs: a linha cheia corresponde ao TLT CPW em substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$, e a linha pontilhada ao TLT OCPW com filme fino de 1 μm e $\epsilon_f=300$.	94
Figura 38 - Efeitos do TLT sobre um pulso de corrente de entrada Gaussiano. As linhas pontilhada e tracejada correspondem ao pulso de saída após, respectivamente, o TLT OCPW com filme fino de 1 μm de espessura e $\epsilon_f=300$, e o TLT CPW com substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$.	95
Figura 39 - Constante dielétrica efetiva em função da frequência nas duas extremidades do TLT para os três exemplos: TLT CPW em substrato <i>bulk</i> de $\epsilon_r=80$, TLT OCPW com filme fino de 1 μm de espessura e $\epsilon_f=300$ e TLT OCPW com filme espesso de 80 μm de espessura e $\epsilon_f=150$.	97
Figura 40 - Perda de retorno do TLT OCPW com um filme de $\epsilon_f=150$ e $d=80\text{ }\mu\text{m}$ para dois valores de $\tan\delta$, zero e 0.3.	98
Figura 41 - Perda por inserção do TLT OCPW para um filme de $\epsilon_f=150$ e $d=80\text{ }\mu\text{m}$ para dois valores de $\tan\delta$, zero e 0.3.	98
Figura 42 - Pulso de tensão entregue à carga em função do tempo para diferentes possibilidades de acoplamento entre gerador e carga. Os pulsos localizados à direita da figura correspondem aos pulsos	

após o TLT OCPW com filmes dielétricos com diferentes valores de tangente de perdas.	100
Figura 43 - Perda de retorno do TLT OCPW <i>back-to-back</i> com um filme de $\epsilon_f=150$ e $d=80\ \mu\text{m}$ para dois valores de $\tan\delta$, zero e 0.3.	101
Figura 44 - Perda por inserção do TLT OCPW <i>back-to-back</i> com um filme de $\epsilon_f=150$ e $d=80\ \mu\text{m}$ para dois valores de $\tan\delta$, zero e 0.3.	101
Figura 45 - Seção transversal do TLT na configuração QCPW.	103
Figura 46 - Vista em perspectiva do TLT na configuração QCPW.	104
Figura 47 - Perda de retorno do TLT QCPW simulada pelo HFSS (linha cheia) comparado a um TLT Chebyshev ideal (linha pontilhada).	106
Figura 48 - Perda de inserção do TLT QCPW simulada pelo HFSS (linha cheia) comparado a um TLT Chebyshev ideal (linha pontilhada).	106
Figura 49 – Constante dielétrica efetiva do TLT QCPW em função da frequência para cada uma das portas do TLT, em comparação com a do TLT OCPW utilizando filme fino de elevada constante dielétrica.	107
Figura 50 - Perda de retorno teórica do TLT QCPW para três valores de tangente de perda do filme dielétrico: 0 (linha cheia), 0.01 (linha tracejada) e 0.1 (linha pontilhada).	108
Figura 51 - Perda por inserção teórica do TLT QCPW para três valores de tangente de perda do filme dielétrico: 0 (linha cheia), 0.01 (linha tracejada) e 0.1 (linha pontilhada).	108
Figura 52 - Impedância característica de uma linha de transmissão na configuração QCPW em função do espaçamento, s , entre os planos de terra laterais para diferentes espessuras de filme. A espessura d é dada em microns.	110
Figura 53 - Constante dielétrica efetiva de uma linha de transmissão na configuração QCPW em função do espaçamento, s , entre os planos de terra laterais para diferentes espessuras de filme. A espessura d é dada em microns.	110
Figura 54 - Impedância característica em função da frequência para linhas realizadas na configuração QCPW com filme fino de $1\ \mu\text{m}$ de espessura, $\epsilon_f = 140$ e com $W=120\ \mu\text{m}$, para valores de s variando desde 118 até $122\ \mu\text{m}$.	111

Figura 55 - Impedância característica em função da frequência para linhas realizadas na configuração QCPW com filme espesso de 20 μm de espessura, $\epsilon_r = 300$ e $W = 140 \mu\text{m}$, para valores de s variando desde 90 até 130 μm .	112
Figura 56 - Perda de retorno do TLT QCPW em função do desvio no valor de s .	113
Figura 57 - Perda de retorno do TLT QCPW em função do desvio no valor de W em relação ao valor nominal.	114
Figura 58 - Perda de retorno do TLT QCPW em função do valor da constante dielétrica relativa do filme fino.	115
Figura 59 - Perda de retorno do TLT QCPW em função do valor da espessura do filme fino.	115
Figura 60 - Resultados de Microscopia por varredura eletrônica (SEM) com amplificação de 7000 vezes para os seguintes filmes: BTO, BTO(0.5):CCTO(0.5) e CCTO.	130
Figura 61 - Resultados de raio-X e EDS para os seguintes filmes: BTO, BTO(0.5):CCTO(0.5) e CCTO.	131
Figura 62 - Resultados de espectroscopia no infravermelho e Raman para os seguintes filmes: BTO, BTO(0.5):CCTO(0.5) e CCTO.	132
Figura 63 - Seção transversal da estrutura utilizada para a medida da constante dielétrica e das perdas em baixa frequência.	133
Figura 64 - Constante dielétrica relativa obtida em baixa frequência para os filmes de: BTO, BTO(0.5):CCTO(0.5) e CCTO.	133
Figura 65 - Tangente de perdas obtida em baixa frequência para os filmes de: BTO, BTO(0.5):CCTO(0.5) e CCTO.	134
Figura 66 - Vista superior do ressonador linear CPW.	140
Figura 67 - Resultado teórico do espectro da transmissão do ressonador linear CPW.	141
Figura 68 - Vista em perspectiva do ressonador linear CPW com uma camada de filme depositada sobre o mesmo.	144
Figura 69 - Curvas teóricas do espectro de transmissão do ressonador linear CPW obtidas quando filmes finos de 1 μm de espessura com constante dielétrica relativa iguais a 100, 200 e 300 são depositados	

sobre o ressoador.	145
Figura 70 - Relação entre a frequência de ressonância fundamental e o valor da constante dielétrica relativa do filme depositado sobre o ressoador linear CPW para diferentes espessuras de filme.	146
Figura 71 - Circuito ressoador linear CPW montado.	150
Figura 72 - Medida da transmissão para dois exemplares de ressoadores sem filme depositado.	151
Figura 73 - Circuito ressoador linear CPW montado com filme dielétrico depositado.	151
Figura 74 - Espectro de transmissão medido do circuito ressoador CPW, antes da deposição do filme (linha pontilhada) e depois da deposição do filme de CCTO de 118 μm de espessura (linha cheia).	153
Figura 75 - Espectro de transmissão medido do circuito ressoador CPW, antes da deposição do filme (linha pontilhada) e depois da deposição do filme de BTO de 99 μm de espessura (linha cheia).	153
Figura 76 - Espectro de transmissão dos ressoadores CPW medidos com os seguintes filmes de BTO(x):CCTO(1-x) depositados: x= 0 com 145 μm de espessura, x=0.2 com 144 μm , x=0.5 com 103 μm e x=0.8 com 105 μm de espessura.	154
Figura 77 - Relação entre a constante dielétrica relativa e o fator de qualidade para os filme de BTO(x):CCTO(1-x), com x=0, 0.2, 0.5 e 0.8.	155
Figura 78 - Espectro de transmissão dos ressoadores CPW medido para os filmes de BTO com diferentes dopagens.	157
Figura 79 - Perda de retorno em função da frequência obtida experimentalmente para uma linha CPW de 25 mm de comprimento.	161
Figura 80 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimentalmente para as linhas CPW de 8 mm e 25 mm de comprimento.	161
Figura 81 - Constante de atenuação em dB/cm em função da frequência obtida experimentalmente para a linha CPW fabricada.	162
Figura 82 - Perda de retorno em função da frequência obtida experimental e teoricamente para uma linha CPW de 25.4 mm de	

- comprimento com um filme de BTO de $61\text{ }\mu\text{m}$ de espessura depositado sobre ela. 163
- Figura 83 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimental e teoricamente para uma linha CPW de 25.4 mm de comprimento com um filme de BTO de $61\text{ }\mu\text{m}$ de espessura depositado sobre ela. 164
- Figura 84 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimentalmente para duas linhas CPW, de 8 mm e 25.4 mm de comprimento, recobertas com filme de BTO de $61\text{ }\mu\text{m}$ de espessura. 164
- Figura 85 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para medir a resposta do DUT (*Device Under Test*) a pulsos elétricos curtos. 165
- Figura 86 - Pulso de tensão em função do tempo após atravessar as linhas CPW de 8 mm e 25.4 mm, ambas com filme de BTO depositado sobre as mesmas. São mostradas também as respectivas previsões teóricas. 166
- Figura 87 - Pulso de tensão de entrada. 166
- Figura 88 - Foto do filme de BTO depositado sobre um circuito, onde é dado destaque ao problema de fissuras e rachaduras. 170
- Figura 89 - Perda de retorno de um TLT OCPW para quatro filmes diferentes. A linha cheia corresponde a um filme dielétrico com valores nominais de $d=100\text{ }\mu\text{m}$ e $\epsilon_r=150$. 173
- Figura 90 - Do lado esquerdo, foto da vista superior do TLT *back-to-back* inserido na caixa metálica antes e após a deposição do filme dielétrico. Do lado direito, foto da vista inferior da montagem. 174
- Figura 91 - TLT fabricado no arranjo *back-to-back* antes da deposição do filme dielétrico e da montagem final. 174
- Figura 92 - Esquema da vista superior do TLT OCPW acoplado ao laser semiconductor submontado através de fios de ouro. 175
- Figura 93 - Tela do TDR mostrando a variação do coeficiente de reflexão em função do tempo para o TLT B. O gráfico da direita mostra com mais detalhe o comportamento da primeira metade do TLT OCPW *back-to-back* implementado. 177

- Figura 94 - Impedância ao longo do comprimento para os TLTs A e B. A linha cheia mostra os valores de impedância correspondentes ao TLT Chebyshev desejado. 178
- Figura 95 - Espaçamento G entre a fita condutora central e os planos de terra laterais em função do comprimento do TLT para o TLT original e três TLTs fabricados. 179
- Figura 96 - Perda de retorno e perda por inserção simuladas para o TLT *back-to-back* A considerado sem perdas. A linha tracejada corresponde à resposta desejada, e a linha cheia corresponde ao TLT A cuja variação da impedância ao longo do TLT é mostrada na figura 94. 180
- Figura 97 - Perda de retorno em função da frequência para o TLT *back-to-back* A. 181
- Figura 98 - Perda por inserção em função da frequência para o TLT *back-to-back* A. 182
- Figura 99 - Perda de retorno em função da frequência para o TLT *back-to-back* B medida pela entrada e pela saída do TLT. 183
- Figura 100 - Perda de inserção em função da frequência para o TLT *back-to-back* B. 183
- Figura 101 - Perda de retorno medida em função da frequência para os TLTs *back-to-back* B e C. 185
- Figura 102 - Perda por inserção medida em função da frequência para os TLTs *back-to-back* B e C. 185
- Figura 103 - Pulso de tensão medido em função do tempo. À esquerda, encontra-se o pulso de referência, à direita, os pulsos medidos após os TLTs *back-to-back* A e B. 187
- Figura 104 - Resposta temporal simulada do TLT *back-to-back* sem perdas e com perdas, a um trem de pulsos de tensão de 50 ps de largura a uma taxa de 1 GHz. 188
- Figura 105 - Pulso de tensão medido após o TLT *back-to-back* B em função do tempo. As linhas tracejada e pontilhada mostram as previsões teóricas. 189
- Figura 106 - Montagem experimental para avaliação da resposta

óptica do laser.

190

Figura 107 - Comparação do desempenho do laser alimentado através de uma linha convencional de $50\ \Omega$ com resistor de casamento e através de uma outra linha sem resistor de casamento. 191

Lista de símbolos

α_d - Perda no dielétrico dada em dB (ou em Neper) por unidade de comprimento

β - Constante de propagação

β_c - Constante de propagação de corte do TLT

β_{sc} - Fator de alargamento espectral

β_{sp} - Fração de emissão espontânea acoplada no modo de oscilação

ϵ_{eff} - Constante dielétrica efetiva

ϵ_f - Constante dielétrica relativa de filme

ϵ_r - Constante dielétrica relativa de substrato do tipo *bulk*

$\phi_L(t)$ - Fase do sinal óptico

γ - Constante de propagação complexa

η - Responsividade do fotodiodo

λ - Comprimento de onda

λ_c - Comprimento de onda associado à frequência de corte do TLT

λ_m - Comprimento de onda no meio

λ_o - Comprimento de onda no espaço livre

μ - Permeabilidade do meio

ρ - Tolerância do coeficiente de reflexão na banda passante

σ_I^2 - Variância total do ruído associada ao *bit* 1

σ_0^2 - Variância total do ruído associada ao *bit* 0

σ_S^2 - Variância do ruído *shot*

σ_T^2 - Variância do ruído térmico

τ_n - Tempo de recombinação espontânea

τ_p - Tempo de vida do fóton

ω - Frequência angular

Δ_o - Diferença entre o maior e menor valor (ou desvio) do pico de amplitude de *bit* devido ao *overshoot* sofrido por cada *bit*

- Δ_u - Máximo valor de *undershoot* dentre todos os *bit* da sequência
- Γ - Fator de confinamento óptico do modo do laser
- Γ_i - Coeficiente de reflexão da estrutura
- a - Coeficiente de ganho da região ativa
- A - Largura da estrutura
- A_a - Área da região ativa
- A_k - *Bits* transmitidos
- B_e - Largura de banda do filtro elétrico associada à largura de banda equivalente de ruído
- B_k - *Bits* detectados pelo fotodetector
- c - Velocidade da luz
- C_p - Capacitância associada aos parasitas da montagem do laser
- C_s - Capacitância intrínseca do laser
- D - Comprimento da descontinuidade da fita condutora central
- d - Espessura do filme dielétrico depositado acima das camadas metálicas
- d' - Espessura do filme dielétrico depositado abaixo das camadas metálicas
- $e_L(t)$ - Sinal óptico gerado pelo laser
- $\vec{E}(y, z)$ - Campo elétrico fasorial
- f - Frequência
- f_1 - Frequência no ponto de -3 dB à esquerda da ressonância fundamental
- f_2 - Frequência no ponto de -3 dB à direita da ressonância fundamental
- f_c - Frequência de corte
- f_R - Frequência de ressonância fundamental
- F_A - Fator de ruído em excesso
- f_{cnorm} - Frequência de normalizada (razão entre f_c e a taxa de *bits*)
- g - Fator de compressão do ganho.
- G - Espaçamento entre a fita condutora central e os planos de terra laterais
- G_i - Espaçamento entre a fita condutora central e os planos de terra laterais
- $G_L(t)$ - Ganho óptico
- H - Espessura do substrato dielétrico *bulk*
- $i_p(t)$ - Sinal de corrente elétrica detectada após filtragem pelo fotodiodo
- i_k - *Bits* da sequência detectada no receptor
- I - Corrente do sinal elétrico

I_d - Corrente de escuro do fotodiodo

$I_L(t)$ - Corrente injetada na região ativa

I_{DC} - Corrente de polarização (*bias*) do laser

I_D - Nível de corrente de limiar para decisão no receptor pelo *bit* 1 ou 0

j - Unitário imaginário

k_b - Constante de *Boltzman*

l - Caminho sobre o qual se realiza integral de linha

L - Comprimento da estrutura

L_1 - Comprimento da fita condutora central

L_a - Comprimento da região ativa

L_p - Indutância associadae aos parasitas da montagem do laser

M_o - Ganho médio do fotodiodo APD

n - Número inteiro

N - Número total de *bits* transmitidos

N_g - Densidade de elétrons na transparência

$N_L(t)$ - Densidade de elétrons na região ativa do laser

P - Potência do sinal elétrico

P - Amplitude de pico do pulso a partir de zero miliampéres

$P_L(t)$ - Potência óptica emitida por cada face do laser

q - Carga do elétron

Q - Fator de qualidade descarregado

Q_C - Fator de qualidade relativo ao condutor

Q_d - Fator de qualidade relativo ao dielétrico

Q_L - Fator de qualidade carregado

Q_R - Fator de qualidade relativo à radiação

Q_k - parâmetro utilizado para o cálculo da BER

R - Resistência do resistor de casamento de impedância

Re - Parte real do número complexo

R_L - Resistência da carga no receptor do sistema

R_p - Resistência associada aos parasitas da montagem do laser

R_s - Resistência da carga resistiva do laser

R_{sub} - Resistência associada aos parasitas intrínsecos do laser

s - Espaçamento entre os planos de terra coplanares

S_{11} - Coeficiente de reflexão na porta 1

S_{21} - Coeficiente de transmissão da porta 1 para a porta 2

$S_L(t)$ - Densidade de fótons na região ativa do laser

t - Espessura da camada metálica

t - Tempo

T - Temperatura em Kelvin

T_b - Período de amostragem do receptor

T_c - Temperatura crítica

$\tan\delta$ - Tangente de perdas

v_g - Velocidade de grupo

V - Tensão do sinal elétrico

V_{RF} - Tensão de RF do gerador de sinais de microondas

W - Largura da fita condutora central

W_i - Largura da fita condutora central, onde $i=1,2$

y - Eixo ao longo da estrutura

Z - Impedância

Z_c - Impedância característica normalizada

Z_L - Impedância de carga normalizada (ou razão de transformação)

Z_{pi} - Impedância característica calculada a partir da potência e da corrente

Z_{pv} - Impedância característica calculada a partir da potência e da tensão

Z_{vi} - Impedância característica calculada a partir da tensão e da corrente

Lista de Abreviaturas

- APD - Fotodiodo de avalanche (*Avalanche PhotoDiode*)
- BER - Taxa de erro de bits (*Bit Error Rate*)
- BTO - Titanato de bário
- CPW - Guia de onda coplanar (*CoPlanar Waveguide*)
- DUT - Dispositivo em teste (*Device Under Test*)
- HFSS - *High-Frequency Structure Simulator*
- HTS - Supercondutor de alta temperatura (*High Temperature Superconducting*)
- ISI - Interferência Inter-simbólica
- LT - Linha de transmissão
- MBER - Melhoria na BER
- MMIC - *Monolithic Microwave/Millimeter Integrated Circuits*
- QCPW - *Quasi-CoPlanar Waveguide* (quase CPW)
- OCPW - *Overlayed CoPlanar Waveguide* (CPW com sobrecamada de filme dielétrico)
- RF - Rádio frequência
- RZ - *Return-to-Zero*
- SRD - Diodo de recuperação (*Step Recovery Diode*) ou gerador de pente (*Comb filter*)
- TDR - Reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometer*)
- TE - Transversal elétrico
- TEM - Transversal eletromagnético
- TLT - Transformador de impedância em linha de transmissão
- TLTs - Transformadores de impedância em linha de transmissão
- TM - Transversal magnético