



José Ignacio Marulanda Bernal

**Dispositivos de Microondas Utilizando Filmes de
Alta Constante Dielétrica**

Tese de Doutorado

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

Orientadora: Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho

Rio de Janeiro
Setembro de 2010



José Ignacio Marulanda Bernal

Dispositivos de Microondas Utilizando Filmes de Alta Constante Dielétrica

Tese 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.

Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho
Orientadora

Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

Profa. Luciene da Silva Demenicis
IME

Prof. Rodolfo Araújo de Azevedo Lima
Instituto de Pesquisas da Marinha

Prof. Antonio Dias de Macedo Filho
Universidade Gama Filho

Prof. Marco Cremona
Departamento de Física

Prof. Marbey Manhães Mosso
Centro de Estudos em Telecomunicações /PUC-Rio

Profa. Isabel Cristina dos Santos Carvalho
Departamento de Física

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2010

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

José Ignacio Marulanda Bernal

Graduou-se em Física pela Universidade de Antioquia (Medellín-Colômbia) em 1993. Recebeu o título de Especialista em Ciências Eletrônicas – Área Telemática pela Universidade de Antioquia em 1998. Recebeu o título de Mestre em Física pela Universidade Nacional da Colômbia em 2003. Trabalha como professor do Departamento de Ciências Básicas da Universidade EAFIT em Medellín desde 1996, atuando nas áreas de eletromagnetismo aplicado e comunicações ópticas. Fundou o Grupo de Eletromagnetismo Aplicado (GEMA) e faz parte do Grupo de Óptica Aplicada da Universidade EAFIT desde 2000.

Ficha Catalográfica

Bernal, José Ignacio Marulanda

Dispositivos de microondas utilizando filmes de alta constante dielétrica / José Ignacio Marulanda Bernal ; orientadora: Maria Cristina Ribeiro Carvalho. – 2011.

101 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Linha de transmissão planar. 3. Filme de elevada constante dielétrica. 4. Casamento de impedância. 5. Caracterização de filme. 6. Transformador em linha de transmissão. 7. Microondas. I. Carvalho, Maria Cristina Ribeiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para Lina, minha esposa, meu suporte.

Agradecimentos

Às minhas orientadoras, Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho e Profa. Luciene da Silva Demenicis, por ter-me acolhido como aluno, pela orientação na execução deste trabalho, pela dedicação, pela paciência, pelos ensinamentos que me transmitiram e por toda a ajuda, acadêmica e pessoal, que recebi delas na minha estadia no Brasil.

À CAPES, ao CNPq e à PUC, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À Universidade EAFIT, pelo auxílio e apoio recebidos durante a execução deste trabalho.

À Professora Patrícia Lustoza de Souza e à equipe do Laboratório de Semicondutores (LabSem) do CETUC - PUC-Rio, pelo fornecimento dos equipamentos e materiais para a confecção dos circuitos de microondas desenvolvidos nesta tese.

Ao Dr. Rodolfo Lima, pelos ensinamentos, acompanhamento, discussões e ajuda em toda a parte experimental da presente tese.

Ao Professor Marbey Manhães Mosso, do CETUC - PUC-Rio, pelo fornecimento de materiais e pelo apoio.

Ao Professor Marco Cremona, do Laboratório de Filmes Finos, Departamento de Física da PUC-Rio, pelas discussões e pela colaboração, disponibilizando pessoal e equipamentos, e aos seus alunos Rafael Mendes Barbosa dos Santos, Juan Serna e Gustavo Lanza pela deposição dos filmes de titanato de estrôncio e de alumínio.

Aos meus colegas do CETUC – PUC-Rio, Vanessa Magri e Gelza Barboza, pelo apoio e estímulo.

A Lina, minha esposa, pelo apoio incondicional neste projeto.

Aos meus sogros, Libardo e Cecilia, pelo carinho e apoio.

Aos amigos, familiares e todas as pessoas que de uma forma ou de outra me apoiaram, estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Marulanda Bernal, José Ignácio; Carvalho, Maria Cristina Ribeiro (Orientadora). **Dispositivos de microondas utilizando filmes de alta constante dielétrica**. Rio de Janeiro, 2010. 101p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda por dispositivos portáteis de tamanho e peso cada vez mais reduzidos vem estimulando a busca por materiais de alta constante dielétrica e baixas perdas na faixa de frequência de microondas capazes de permitir a integração e miniaturização de circuitos. No presente trabalho foi realizado um estudo teórico e experimental sobre a utilização de filmes de alta constante dielétrica na fabricação de dispositivos passivos de microondas de tamanhos reduzidos. Foi feita uma análise no domínio da frequência sobre a influência desses filmes nas características de diferentes configurações de linhas de transmissão planares com múltiplas camadas dielétricas. A partir dessa análise, foi escolhida a configuração, denominada aqui de QCPW (“Quase-Coplanar Waveguide”), que permite a realização prática de estruturas com diversos valores de impedância utilizando dimensões transversais confortáveis. Filmes espessos de compostos de titanato de cálcio e de titanato de magnésio depositados pelo método de “screen-printing” e filmes finos de titanato de estrôncio por “RF Magnetron Sputtering” foram fabricados e caracterizados. O método do ressonador linear CPW e da linha de transmissão CPW foram empregados para determinar o valor da constante dielétrica e da tangente de perdas desses filmes na faixa de frequência de microondas e à temperatura ambiente. O método do ressonador linear CPW foi adaptado e aperfeiçoado para fornecer resultados satisfatórios para o caso dos filmes finos. Finalmente, foram projetados, analisados e fabricados, pela primeira vez, transformadores de impedância em linhas de transmissão (TLT) de tamanho reduzido e com resposta banda larga baseados na configuração QCPW utilizando filmes de alta constante dielétrica.

Palavras-chave

Linha de transmissão planar; filme de elevada constante dielétrica; casamento de impedância; caracterização de filmes; transformador em linha de transmissão; microondas.

Abstract

Marulanda Bernal, José Ignácio; Carvalho, Maria Cristina Ribeiro (Orientadora). **Microwave devices using high dielectric constant films**. Rio de Janeiro, 2010. 101p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing demand for portable devices with more reduced size and weight has stimulated the search for materials with high dielectric constant and low losses in the microwave frequency range allowing circuit integration and miniaturization. In this work, a theoretical and experimental study of the use of high dielectric constant films in the fabrication of microwave passive devices with reduced sizes has been made. A frequency domain analysis of the influence of these films on the characteristics of different configurations of multilayer transmission lines has been done. From this analysis, a configuration, called here as QCPW (“Quasi-Coplanar Waveguide”), that allows a practical implementation of structures with several values of impedance using comfortable transversal dimensions was chosen. Composite thick films of calcium titanate and magnesium titanate deposited by “screen-printing” and thin films of strontium titanate deposited by “RF Magnetron Sputtering” have been elaborated and characterized. CPW linear resonator method and CPW transmission line have been used to determinate the value of the dielectric constant and loss tangent of these films in the microwave frequency range at room temperature. The CPW linear resonator method was adapted and improved in order to provide satisfactory results for the case of thin films. Finally, for the first time, impedance transmission line transformers (TLT) with reduced size and wide-band response, based on the QCPW configuration using high dielectric constant films have been designed, analyzed, and fabricated.

Keywords

Planar transmission line; high dielectric constant films; impedance matching; film characterization; transmission line transformers; microwaves.

Sumário

1. Introdução	15
2. Materiais dielétricos para microondas e técnicas de fabricação	20
2.1. Introdução	20
2.2. Materiais de alta constante dielétrica	24
2.3. Técnicas de fabricação	27
2.4. Conclusões	32
3. Estruturas planares de microondas com múltiplas camadas dielétricas	34
3.1. Introdução	34
3.2. Análise teórica de estruturas planares em microondas	35
3.2.1. Estruturas analisadas	36
3.2.2. Resultados e discussão	37
3.2.3. Estruturas de baixa impedância utilizando filmes dielétricos e sua história	39
3.2.4. Linha de transmissão QCPW	42
3.3. Conclusões	43
4. Transformadores de impedância em linha de transmissão planar	44
4.1. Introdução	44
4.2. Transformadores de impedância em linha de transmissão planar	46
4.3. Transformadores de impedância com perfil Chebyshev	48
4.4. Conclusões	53
5. Caracterização das propriedades dielétricas dos filmes utilizados	54
5.1. Introdução	54
5.2. Caracterização de filmes espessos de MTO-CTO	55
5.2.1. Caracterização de filmes espessos de MTO-CTO pelo método do ressonador linear CPW	55
5.2.2. Caracterização de filmes espessos de CTO pelo método da linha de transmissão CPW	61
5.3. Caracterização de filmes finos de SrTiO ₃ (STO)	64
5.3.1. Caracterização de filmes finos de STO pelo método do ressonador linear CPW	64
5.3.2. Caracterização de filmes finos de STO pelo método da linha de transmissão CPW	71
5.4. Conclusões	73
6. Projeto e caracterização experimental de transformadores de impedância em linha de transmissão (TLTs)	74
6.1. Introdução	74
6.2.1. TLT na configuração QCPW com filme espesso de CTO	76
6.2.2. TLT linear na configuração QCPW com filme fino de STO	79

6.3. TLT com perfil Chebyshev na configuração QCPW com filme fino de STO	81
6.4. Conclusões	89
7. Conclusões	91
8. Referências bibliográficas	95

Lista de figuras

Figura 1. Exemplo da variação típica da constante dielétrica (ϵ') de um material com a frequência do campo aplicado	22
Figura 2. Exemplo da variação típica das perdas (ϵ'') de um material com a frequência do campo aplicado	22
Figura 3. Vista esquemática da dependência da constante dielétrica de um material ferroelétrico nas vizinhanças da temperatura de Curie	26
Figura 4. Seção transversal das estruturas simuladas. (a) CPW; (b) microstrip; (c) CPW com filme; (d) microstrip com filme; (e) CPW gravada sobre o filme; (f) filme depositado entre a linha central e os planos de terra laterais (QCPW); (g) filme entre o plano de terra e a linha central	38
Figura 5. Impedância característica das linhas de transmissão apresentadas na figura 4.	39
Figura 6. Estrutura “Thin Film Microstrip” (TFMS)	41
Figura 7. Configuração multicamada de linhas de transmissão de baixa impedância para (a) linha CPW com os planos de terra estendidos y (b) linha CPW com o condutor central estendido	41
Figura 8. Impedância em função da separação (S) dos planos de terra laterais da estrutura QCPW da figura 4 (f), para diferentes valores da espessura (d, em μm) do filme depositado	43
Figura 9. Representação de uma linha afilada, de comprimento L, na qual a impedância normalizada Z(y) varia continuamente ao longo da linha	50
Figura 10. Resposta em frequência do coeficiente de reflexão de uma linha afilada Chebyshev	52
Figura 11. Diagrama e parâmetros dos ressoadores: (a) seção transversal, (b) vista superior	56
Figura 12. Montagem do ressoador linear CPW de ouro sem filme: (a) vista superior, (b) vista inferior	56
Figura 13. Ressorador linear CPW de ouro com filme de MTO-CTO. O detalhe mostra a superfície do filme, cuja imagem tem sido aumentada em 25 vezes	57
Figura 14. Picos de ressonância fundamental para os ressoadores de MTO-CTO	58
Figura 15. Previsões teóricas para a relação entre a frequência fundamental de ressonância e a constante dielétrica relativa dos filmes para diferentes espessuras (d em μm)	59
Figura 16. Perda de inserção medida e simulada para o ressoador com MTO(0,2)-CTO(0,8)	59
Figura 17. Relação entre a constante dielétrica relativa do filme e a concentração de CTO	60
Figura 18. Perda de retorno medida e simulada para a linha CPW com filme de CTO	62

Figura 19. Perda de inserção medida e simulada para a linha CPW com filme de CTO	63
Figura 20. Curva de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a linha CPW de ouro sem filme	64
Figura 21. Curva de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a linha CPW de ouro com filme de CTO	64
Figura 22. Ressorador linear CPW coberto com filme fino de STO de 4,2 μm	65
Figura 23. Medida da resposta em frequência do ressoador com filme de STO (linha contínua) e do ressoador de referência (linha pontilhada) na faixa de 50 MHz - 20 GHz	66
Figura 24. Picos de ressonância fundamental medidos para o ressoador com filme de STO (linha contínua) em comparação com o ressoador de referência (linha pontilhada)	67
Figura 25. Ressorador CPW elaborado para a caracterização do filme fino de STO de 4,2 μm de espessura. (a) Vista em corte transversal. (b) Vista em corte longitudinal da estrutura simulada com o HFSS	68
Figura 26. Comparação dos picos de ressonância fundamental medidos e simulados com o HFSS para os ressoadores de referência e com filme de STO de 4.2 μm de espessura, $\epsilon_r = 95$ e $\tan\delta = 10^{-3}$	68
Figura 27. Picos de ressonância fundamental medidos e simulados com o HFSS para os ressoadores de referência e com filme de STO de 3 μm de espessura, $\epsilon_r=80$ e $\tan\delta <10^{-3}$	71
Figura 28. Perda de retorno da CPW de alumínio com filme de STO de 2 μm por cima dos condutores com 0,2 μm de espessura	71
Figura 29. Traço obtido no TDR para a linha CPW de alumínio sem filme.	72
Figura 30. Traço obtido no TDR para a linha CPW de alumínio com filme fino de STO	72
Figura 31. Dispositivo TLT “back-to-back” fabricado com filme espesso de CTO.	77
Figura 32. Perda de retorno medida e simulada do TLT “back-to-back” elaborado com filme espesso de CTO	78
Figura 33. Perda por inserção medida e simulada do TLT “back-to-back” elaborado com filme espesso de CTO	78
Figura 34. Traço do TDR para o TLT linear “back-to-back” elaborado com filme de CTO	79
Figura 35. TDR para o TLT linear “back-to-back” elaborado com filme fino de STO	81
Figura 36. Perda de retorno teórica do TLT com o perfil Chebyshev proposto	82
Figura 37. Perfil de impedância do TLT Chebyshev proposto	83
Figura 38. Estrutura do TLT com perfil Chebyshev simulado com o HFSS	84
Figura 39. Perdas de retorno teórica e simulada para o TLT com perfil Chebyshev	85
Figura 40. TLT “back-to-back” QCPW com filme fino de STO elaborado com perfil Chebyshev	85
Figura 41. Detalhe da conexão do TLT “back-to-back” elaborado com perfil Chebyshev	86

Figura 42. Perdas de retorno medida e simulada para o TLT QCPW com filme fino de STO com perfil Chebyshev	87
Figura 43. Traço do TDR para o TLT “back to back” QCPW com filme fino de STO com perfil Chebyshev	87
Figura 44. Impedância simulada para a estrutura QCPW com as dimensões da extremidade de baixa impedância do TLT com perfil Chebyshev considerando os efeitos da profundidade pelicular	88

Lista de tabelas

Tabela 1. Composição e espessura dos filmes preparados por "screen-printing"	57
Tabela 2. Resultados experimentais para os filmes de MTO, CTO e MTO(x)–CTO(1-x)	61