



Rodolfo Araujo de Azevedo Lima

**Tratamento Eletro Térmico de Substratos Dielétricos para
Circuitos Planares de Microondas**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Maria Cristina Ribeiro Carvalho
Co-Orientador: Isabel Cristina dos Santos Carvalho

Rio de Janeiro, abril de 2008



Rodolfo Araujo de Azevedo Lima

**Tratamento Eletro Térmico de Substratos
Dielétricos para Circuitos Planares de
Microondas**

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.

Dra. Maria Cristina Ribeiro Carvalho
Orientadora

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho
Co-Orientadora

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dra. Luciene da Silva Demenicis
IME

Dr. Antonio Dias de Macedo Filho
Marinha do Brasil

Prof. Ricardo Guerra Pereira
UERJ

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

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2008.

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

Rodolfo Araujo de Azevedo Lima

Graduou-se em Engenharia Elétrica – ênfases em Telecomunicações e Eletrônica pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 1994. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo CETUC (Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC-Rio) em 1996. Trabalhou 10 anos como engenheiro de pesquisa no CETUC. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Telecomunicações Ópticos e de Microondas, atuando principalmente nos seguintes temas: circuitos de microondas, circuitos de RF, enlaces ópticos, fibra óptica, cálculo da taxa de erro e dispersão cromática.

Ficha Catalográfica

Lima, Rodolfo Araujo de Azevedo

Tratamento eletro térmico de substratos dielétricos para circuitos planares de microondas / Rodolfo Araujo de Azevedo Lima ; orientadora: Maria Cristina Ribeiro Carvalho; co-orientadora: Isabel Cristina dos Santos Carvalho. Rio de Janeiro, 2008.

127 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Polarização eletro-térmica. 3. Substrato de microondas. 4. Perdas Dielétricas. 5. Dispositivos optoeletrônicos. 6. Efeito ferroelétrico. I. Carvalho, Maria Cristina Ribeiro. II. Carvalho, Isabel Cristina dos Santos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais, Sergio (*in memoriam*) e Regina.

Agradecimentos

Às minhas orientadoras, Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho e Profa. Isabel Cristina dos Santos Carvalho, pela orientação na execução deste trabalho, pela dedicação, compreensão e pelos ensinamentos que me transmitiram.

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

À Professora Patrícia Lustoza de Souza e à equipe do Laboratório de Semicondutores (LabSem) do CETUC/PUC-Rio, cujo apoio viabilizou a confecção, nas instalações do LabSem, dos circuitos de microondas desenvolvidos nesta tese.

À Professora Luciene da Silva Demenicis, do Instituto Militar de Engenharia, IME, pelo apoio fundamental neste projeto.

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 ao seu aluno Rafael Mendes Barbosa dos Santos pela deposição dos filmes de alumínio.

Ao Laboratório de Filmes Finos (LFF) do IME (anteriormente chamado de Laboratório de Células Solares e Microeletrônica) pela deposição de filmes de alumínio, ao Prof. Carlos pela disponibilização da infra-estrutura e, em especial, à técnica Rosângela, pela dedicação e prestatividade.

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

Ao Dr. Lucio Baptista Trannin Cividanes, da Divisão de Eletrônica Aeroespacial do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, pela colaboração, disponibilizando suas instalações e equipamentos, e ao engenheiro Vicente de Paulo Damasceno da Costa Junior e o técnico Sergio Arantes Villela pelo apoio no laboratório do DEA.

À equipe do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, Dr. Marcos Henrique de Pinho Mauricio e Dr. Maurício de Jesus Monteiro, pelo suporte na análise microscópica das amostras.

À Professora Ivany Bott, do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, pela colaboração, cedendo equipamentos do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos para o corte dos circuitos.

Ao Professor Norbert Miekeley, do Departamento de Química da PUC-Rio, pela análise LA-ICP-MS das amostras.

Ao Dr. Michael Fokine, pesquisador visitante, pelas discussões.

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

E aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Resumo

Lima, Rodolfo Araujo de Azevedo. **Tratamento Eletro Térmico de Substratos Dielétricos para Circuitos Planares de Microondas**. Rio de Janeiro, 2008. 127p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversos fatores têm atraído esforços para o desenvolvimento de novas estruturas para circuitos planares de microondas. Várias propostas são encontradas na literatura técnica, explorando diferentes formas de miniaturização dos circuitos, melhoria de eficiência de acoplamento, aumento de banda ou redução de perdas. Entre elas, encontra-se a utilização de materiais ferroelétricos, cujas propriedades dielétricas podem ser alteradas com a aplicação de uma tensão elétrica, permitindo a fabricação de uma nova classe de dispositivos ativos compactos; contudo, esses materiais têm desvantagens como altas perdas e dificuldades de fabricação.

Em paralelo, a disseminação das telecomunicações ópticas gera uma demanda de novos componentes ópticos para os sistemas: mais eficientes, com maior capacidade e menor custo. A utilização de fibras ópticas de sílica em telecomunicações torna desejável que esses novos componentes sejam realizados em materiais compatíveis com a sílica, como por exemplo alguns tipos de vidro. A polarização eletro térmica surgiu como uma forma de produzir dispositivos eletro-ópticos ativos a partir de vidros utilizados como substratos de guias de onda ópticos passivos.

Neste trabalho, os processos de tratamento eletro-térmicos utilizados nos substratos ópticos são aplicados a substratos dielétricos para uso em microondas. São verificados os efeitos resultantes nas alterações das propriedades dielétricas na faixa de microondas e a aplicação potencial em componentes e circuitos. Os tratamentos se constituem fundamentalmente na aplicação de alta tensão ao substrato na presença de temperatura elevada, visando à migração controlada de íons no material. Os substratos estudados são a alumina, substrato tradicional de microondas com elevada constante dielétrica, e os vidros, boro-silicato e

sodo-cálcico, que estão atualmente sendo utilizados como substratos para guias ópticos e para construção de dispositivos ópticos ativos.

É caracterizada a perda dielétrica dos vidros tratados para utilização como substrato para circuitos planares de microondas. O desenvolvimento de dispositivos ópticos ativos em substratos vítreos também implica na fabricação de circuitos elétricos de microondas sobre o mesmo substrato, para alimentar esses dispositivos com dados em altas taxas. Os vidros possuem altas perdas dielétricas nessa faixa devido à presença de íons alcalinos. A criação, pelo tratamento eletro-térmico, de uma camada de depleção de íons, próxima à superfície abaixo do circuito, permite a redução dessas perdas efetivas em circuitos planares.

Outro efeito investigado é a possibilidade de se produzir um comportamento similar ao efeito ferroelétrico em um substrato de microondas. A camada de depleção criada pelo tratamento eletro-térmico provoca alterações na estrutura e permite a gravação de um campo elétrico estático devido ao deslocamento de íons. É estudada a influência desse campo dentro do material na variação de suas propriedades dielétricas, e a resposta à aplicação de uma tensão de controle externa. Estuda-se então a possibilidade de substituição por substratos tratados dos materiais ferroelétricos no desenvolvimento de componentes como chaves, acopladores e atenuadores variáveis e filtros de microondas.

Palavras Chave

Polarização eletro-térmica, substratos de microondas, circuitos planares de microondas, perdas dielétricas, efeito ferroelétrico.

Abstract

Lima, Rodolfo Araujo de Azevedo. **Electro-Thermal Treatment of Dielectric Substrates for Planar Microwave Circuits**. Rio de Janeiro, 2008. 127p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Several factors have been attracting research efforts to the development of new planar structures for microwave planar circuits. Various proposals can be found in the technical literature, exploring different ways of miniaturization of circuits, improvement of coupling efficiency, increase of bandwidth or reduction of losses. Among these is the use of ferroelectric materials, whose dielectric properties can be altered with the application of an electrical voltage, enabling the fabrication of a new class of compact active devices; however, such materials present some disadvantages, like very high losses and difficulties in manufacturing.

Parallel to that, the dissemination of optical telecommunications generates a demand for new optical components for the systems, with greater efficiency and capacity but lower cost. Due to the use of silica optical fibers in telecommunications, it is desirable that these new components are fabricated in materials compatible to silica, as for example some types of glass. The electro-thermal polarization emerged as a way of producing active electro-optical devices from glass substrates used for passive optical waveguides.

In this work, the processes of electro-thermal treatment used in optical substrates are applied to dielectric substrates for microwave use. The resulting effects on the changes in dielectric properties in the microwave frequency range and potential application in components and circuits are assessed. Such treatments are constituted fundamentally by the application of high voltage to the substrate in the presence of high temperature, aiming at the controlled migration of ions in the material. The substrates considered are alumina, conventional microwave substrate with high dielectric constant, and glasses, borosilicate and soda-lime,

which are currently being used as substrates for optical waveguides and for the construction of active optical devices.

The dielectric loss of treated glasses as substrates for planar microwave circuits is characterized. The development of active optical devices in vitreous substrates also implies the manufacture of microwave electrical circuits on the same substrate, in order to feed these devices with data at high rates. Glasses have high dielectric losses in this frequency range due to the presence of alkali ions. The creation by the electro-thermal treatment of an ion-depleted layer, near the surface below the planar circuit, enables the reduction of the effective losses in planar circuits.

Another investigated effect is the possibility of creating a behavior similar to the ferroelectric effect in the microwave substrate. The depletion layer created by the electro-thermal treatment causes alterations in the structure and allows the recording of a static electric field by the displacement of ions. The influence of this field within the material on the variation of its dielectric properties, and the response to the application of an external control voltage are assessed. Then, the substitution for treated substrates of ferroelectric materials in the development of components such as switches, variable couplers and attenuators and microwave filters is considered.

Keywords

Thermal poling, microwave substrates, planar microwave circuits, dielectric losses, ferroelectric effect.

Sumário

1	Introdução	18
2	Abordagem e motivação: uso de tratamento eletro-térmico em substratos para microondas	21
2.1.	Hipóteses	21
2.2.	Polarização eletro-térmica	23
2.3.	Aplicações da polarização eletro-térmica em óptica e eletrônica	26
2.4.	Desenvolvimentos recentes em microondas	27
3	Arranjo experimental para o tratamento eletro-térmico	29
3.1.	Circuito elétrico e equipamentos utilizados	29
3.2.	Montagem para tratamento em temperaturas até 300 °C	32
4	Substratos utilizados e caracterização microscópica	38
4.1.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	38
4.2.	Alumina	40
4.2.1.	Amostras de alumina utilizadas	41
4.2.2.	Análise no MEV	42
4.2.3.	Espectroscopia de massa	46
4.2.4.	Discussão sobre a análise da composição da alumina	48
4.3.	Vidros	48
4.4.	Vidro boro-silicato	49
4.5.	Vidro sodo-cálcico (<i>soda-lime glass</i>)	51
5	Caracterização macroscópica em microondas	55
5.1.	Ressorador linear	55
5.2.	Calibração TRL-Multilinha	59
5.3.	Realização prática e montagem dos circuitos de microondas	62
6	Resultados	66

6.1. Simulações Iniciais	66
6.2. Alumina	73
6.2.1. Tratamentos eletro-térmicos	74
6.2.2. Caracterização em microondas	80
6.3. Vidros	87
6.3.1. Tratamentos eletro-térmicos	87
6.3.2. Análise microscópica	93
6.3.3. Caracterização em microondas	97
6.3.4. Circuitos planares de microondas	103
7 Conclusões	108
8 Referências	112
Apêndice A. Código MatLab da rotina de calibração TRL-Multilinha	118

Lista de figuras

Figura 1. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica.	24
Figura 2. Fenômeno de polarização: (a) migração em bloco de cargas durante a polarização e; (b) região de depleção e campo elétrico DC gravado no material após a polarização.	24
Figura 3. Circuito elétrico utilizado para o tratamento eletro-térmico. O esquema também mostra o posicionamento da amostra dentro do forno.	30
Figura 4. Esquema da montagem do <i>setup</i> no forno adaptado com entrada traseira para os fios elétricos de alta tensão.	31
Figura 5. Foto do arranjo experimental utilizado nos procedimentos de polarização eletro-térmica.	32
Figura 6. Esquema do corte lateral da estrutura utilizada para polarização das amostras.	33
Figura 7. Foto da montagem de polarização: (a) detalhes da montagem (sem anodo e sem amostra) e; (b) dentro da câmara do forno Brasimet K150.	34
Figura 8. Foto da montagem para polarização em temperaturas acima de 300 °C: (a) <i>setup</i> montado com amostra de alumina; (b) a base e o braço horizontal de alumínio com o pistão de aço e; (c) a base de titanato de bário, o catodo (mais largo) e o anodo (menor, com dois níveis) de aço.	35
Figura 9. Esquema da montagem do <i>setup</i> no forno para temperaturas acima de 300 °C.	36
Figura 10. Ilustração de placa de alumina quebrada, indicando a superfície de corte para análise MEV.	43
Figura 11. Imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o corte transversal de amostra de alumina: (a) com ampliação de 1000 vezes e; (b) 3000 vezes.	43
Figura 12. Imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a superfície polida de amostra de alumina: (a) com ampliação de 1000 vezes e; (b) 3000 vezes.	45
Figura 13. Análise EDS da alumina.	46
Figura 14. Imagem SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a superfície de uma lâmina de vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B, com ampliação de 1000 vezes.	50
Figura 15. Imagem SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com	

- ampliação de 1000 vezes, para a superfície de lâminas de vidro sodo-cálcico das marcas (a) Corning™; (b) Solidor; e (c) de uma marca genérica. 53
- Figura 16. Vista superior do ressoador linear (a) em linha CPW e (b) *microstrip*. 56
- Figura 17. Conjuntos de padrões de calibração para os métodos (a) SOLT e (b) TRL. 60
- Figura 18. Definição dos planos de referência das medidas em analisador de redes utilizando calibração em duas camadas SOLT-TRL. 61
- Figura 19. Exemplos de circuitos impressos e cortados em (a) alumina com metalização NiCr/Au e; (b) vidro boro-silicato com metalização Al. (Escala 5:1.) 64
- Figura 20. Montagem do ressoador linear CPW: (a) caixa semi-montada; (b) ressoador montado na caixa e conectorizado. 65
- Figura 21. Esquema do corte transversal de uma linha CPW sobre um substrato com camada de depleção de íons e ilustração das linhas de campo elétrico. 67
- Figura 22. Simulação de resultados experimentais obtidos na literatura [6] para: (a) constante dielétrica efetiva e; (b) coeficiente de atenuação de uma linha de transmissão CPW. 69
- Figura 23. Simulação das características de duas linhas CPW para condutor central largo com $W = 500 \mu\text{m}$ e $G = 210 \mu\text{m}$ e linha de espaçamento estreito com $W = 250 \mu\text{m}$ e $G = 45 \mu\text{m}$: constante dielétrica efetiva (a) e (b); coeficiente de atenuação (c) e (d) e impedância característica (e) e (f) respectivamente. 71
- Figura 24. Esquema do corte transversal de uma linha CPW sobre um substrato com camada de depleção de íons e ilustração das linhas de campo elétrico. 72
- Figura 25. Simulação das características de linhas CPW com $W = 250 \mu\text{m}$ e $G = 45 \mu\text{m}$ para diversos valores da espessura da camada de depleção: (a) constante dielétrica efetiva; e (b) coeficiente de atenuação. 73
- Figura 26. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica das amostras de alumina. 75
- Figura 27. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de alumina a 290°C . Duração 05h50'; tensão 3,5 kV, aplicada em dois degraus progressivos. 76
- Figura 28. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de diversas amostras de alumina a 290°C . Durações 08h40', 10h30', 24h20'; tensão 4,0 kV, aplicada em degraus progressivos. Detalhe: comportamento nos primeiros 50 minutos. 77
- Figura 29. Catodo metalizado de amostra de alumina após o tratamento

eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da metalização. Escala 2:1.	78
Figura 30. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica dos ressoadores em alumina.	79
Figura 31. Representação da máscara com a topologia dos ressoadores lineares dimensionados para confecção nos substratos de alumina. Escala: 4:1.	81
Figura 32. Conector RADIAL padrão SNA/3,5 mm utilizado na montagem dos circuitos planares. Cotas em milímetro.	82
Figura 33. Parâmetro de transmissão ($20 \times \log_{10} S_{21} $) dos ressoadores da Figura 31.	83
Figura 34. Esquema para a aplicação de uma tensão de controle em um ressonador linear CPW em alumina para o deslocamento dos picos de ressonância.	84
Figura 35. Foto da montagem do circuito de aplicação da tensão de controle ao trecho central do ressonador linear em substrato de alumina.	85
Figura 36. Esquema da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão.	86
Figura 37. Foto da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão.	86
Figura 38. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica das amostras de vidro.	88
Figura 39. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro boro-silicato a 290 °C. Duração 20h40'; tensão 3,2 kV, aplicada em degraus progressivos. Detalhe: comportamento nos primeiros 30 minutos.	89
Figura 40. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico a 290 °C. Duração 14h20'; tensão 0,8 kV, aplicada em degraus progressivos.	91
Figura 41. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Corning™ a 290 °C. Duração 14h20'; tensão 0,8 kV, aplicada em degraus progressivos.	92
Figura 42. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Solidor a 290 °C. Duração 9h30'; tensão 1,2 kV, aplicada em degraus progressivos.	92
Figura 43. Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do corte transversal de um vidro boro-silicato com depleção de íons: (a) mapeamento EDS do sódio e; (b) imagem SE com o perfil de concentração de sódio em função da profundidade, extraído do mapeamento EDS em (a).	94
Figura 44. Catodo de amostra de vidro boro-silicato após o tratamento	

- eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da superfície do vidro. 95
- Figura 45. Imagem BSE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise EDS dos elementos presentes na superfície do catodo de uma amostra de boro-silicato após tratamento eletro-térmico: (a) em um ponto dentro (*Spectrum 1*) e; (b) em um ponto do catodo fora (*Spectrum 2*) de uma das manchas brancas observadas na Figura 44. 96
- Figura 46. Catodo de amostra de vidro sodo-cálcico após o tratamento eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da superfície do vidro. 97
- Figura 47. Ilustração do *taper* linear com passos discretos para adaptação da geometria da linha CPW3 ($W = 250 \mu\text{m}$ e $G = 45 \mu\text{m}$) para o conector: (a) *taper*; (b) configuração *back-to-back* para simulação. 99
- Figura 48. Simulação dos parâmetros de espalhamento do *taper* linear com passos discretos para adaptação da geometria da linha CPW3 para o conector, em configuração *back-to-back*: (a) transmissão e; (b) reflexão. 99
- Figura 49. Representação da máscara com a topologia dos padrões CPW de calibração TRL-multilinha dimensionados para confecção nos substratos de vidro. Escala: 4:1. (a) Padrões de curto (SHORT), linha direta (THRU) e linha 1 (LINE1), (b) padrão linha 2 (LINE2); e (c) padrão linha 3 (LINE3). 101
- Figura 50. Características medidas para a linha CPW com condutor central $W = 250 \mu\text{m}$ e espaçamento $G = 45 \mu\text{m}$: constante dielétrica efetiva e coeficiente de atenuação. As curvas simuladas são apresentadas para comparação. 102
- Figura 51. Características medidas para a linha *microstrip* com condutor central $W = 2,0 \text{ mm}$ sobre substrato de vidro tipo sodo-cálcico da marca Corning™: constante dielétrica efetiva e coeficiente de atenuação. 103
- Figura 52. Topologia do filtro realizado nos substratos vítreos [64]. Escala: 2:1. 104
- Figura 53. Modelo tridimensional do filtro da Figura 52 para simulação eletromagnética no aplicativo CST Microwave Studio™. 104
- Figura 54. Resultado da medida da resposta do filtro para substrato de vidro sodo-cálcico da marca Solidor, com e sem polarização: resposta de transmissão na banda de 1 a 6 GHz (a); detalhe da transmissão (b) e da perda de retorno (c) na primeira banda; detalhe da transmissão na segunda (d) e na terceira (e) bandas. 106
- Figura 55. Resultado da medida da resposta do filtro para substrato de vidro sodo-cálcico da marca Solidor, com e sem polarização: resposta de transmissão na banda de 1 a 6 GHz (a); detalhe da transmissão (b) e da perda de retorno (c) na primeira banda; detalhe da transmissão na segunda (d) e na terceira (e) bandas. 107

Lista de tabelas

Tabela 1. Propriedades da alumina Piconics.	41
Tabela 2. Composição química do vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B.	49
Tabela 3. Propriedades das lâminas de vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B.	50
Tabela 4. Composição química do vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B obtida por análise MEV/EDS.	51
Tabela 5. Composição química típica do vidro sodo-cálcico.	51
Tabela 6. Propriedades das lâminas de vidro sodo-cálcico Corning™.	52
Tabela 7. Composição química dos vidros sodo-cálcicos Corning™, Solidor e de uma marca genérica, obtidas por análise MEV/EDS.	54
Tabela 8. Características dos ressoadores lineares dimensionados para o substrato de alumina.	80
Tabela 9. Características dos padrões CPW de calibração TRL-multilinha dimensionados para o substrato de vidro boro-silicato.	100