Caracterização das propriedades dielétricas dos filmes utilizados

5.1 Introdução

Conforme discutido no capítulo 2, as propriedades dielétricas dos filmes dependem fortemente de fatores como o processo de fabricação, a qualidade estrutural e a espessura do filme, as condições de deposição (temperatura, pressão, etc.), o substrato e os condutores. Esta é uma das razões pelas quais existem diversas técnicas de caracterização dos filmes para determinar o comportamento dielétrico dos materiais. Em Chen (2004) foi feito um compêndio dos métodos de caracterização de materiais dielétricos em microondas. Nesse estudo estão incluídos métodos ressonantes e não ressonantes, diretos e indiretos usados para determinar as propriedades dielétricas de filmes finos e espessos.

Neste capítulo, a constante dielétrica e a tangente de perdas dos filmes utilizados na presente tese foram medidas usando-se dois métodos diferentes de caracterização: o método do ressoador linear CPW e o método da linha de transmissão CPW. O método do ressoador linear CPW foi desenvolvido inicialmente para caracterizar filmes espessos (Demenicis, 2007; Marulanda, 2009). Este método foi estendido e aperfeiçoado aqui pela primeira vez, para permitir a determinação das propriedades dielétricas de filmes finos.

Foram caracterizados filmes espessos de MTO-CTO, com diferentes razões de concentração de CTO, fabricados pela técnica de "screen-printing". Foram determinadas também as propriedades dielétricas de filmes finos de STO depositados pelo método de "RF Magnetron Sputtering". As medidas no domínio da freqüência, tanto para os filmes finos quanto para os espessos, foram feitas na faixa de freqüências entre 50 MHz e 20 GHz à temperatura ambiente usando um analisador de redes (HP 8720C).

Caracterização de filmes espessos de MTO-CTO

5.2.1

Caracterização de filmes espessos de MTO-CTO pelo método do ressoador linear CPW

Foram medidas as propriedades dielétricas de filmes espessos de MTO, CTO e de compostos $MTO_{(x)}$ -CTO_(1-x) com diferentes concentrações (x=0,95, 0,50) e 0,20) usando cinco ressoadores CPW gravados sobre substrato de alumina $(\varepsilon_{al} = 9.8; \tan \delta = 0.0001)$, com metalização de ouro (Piconics®), usando um processo de fotolitografia convencional no Laboratório de Semicondutores da Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Um diagrama dos ressoadores, mostrando os parâmetros considerados é apresentado na figura 11. Na figura 11 (a) é representada a seção transversal da estrutura. A altura e a largura do substrato de alumina são respectivamente $H = 635 \mu m e A = 5,0 mm e$ a espessura do filme (d) é medida acima da metalização de ouro do circuito. De acordo com a vista superior do ressoador ilustrado na figura 11 (b), o comprimento total da estrutura é de L = 25,4 mm, a seção média do ressoador é $L_1 = 15,3$ mm e as interrupções são D = 100 µm. A largura da fita central e as separações laterais são respectivamente $W = 500 \ \mu m$ e $G = 210 \ \mu m$. As fotografias da figura 12 mostram o aspecto final do ressoador uma vez montado sobre uma estrutura metálica adequada para preservar a configuração CPW.

Os filmes analisados nesta seção foram preparados pelo Grupo de Cerâmicas da Universidade Federal do Ceará, mediante a técnica de "screen-printing", usando o método de deposição de camada dupla sobre os ressoadores CPW previamente preparados. Após a deposição da primeira camada, os filmes foram secados mediante aquecimento a uma taxa de 1 °C/min, partindo da temperatura ambiente até atingir 400 °C. Posteriormente, a temperatura foi elevada de 400 °C para 900 °C a uma taxa de 5 °C/min. Depois que o filme esfriou para a temperatura ambiente, uma segunda camada foi depositada sobre a primeira. O mesmo tratamento térmico foi aplicado para a segunda camada. A espessura dos filmes (d) variou entre 105 e 165 µm, medida com um micrômetro

de precisão. Os filmes elaborados e suas respectivas espessuras são apresentados na tabela 1. Na fotografia da figura 13 é mostrada a montagem de um destes ressoadores prontos para serem medidos no analisador de rede. Na mesma figura é mostrado também um detalhe da superfície do filme elaborado pela técnica de "screen-printing".



Figura 11. Diagrama e parâmetros dos ressoadores: (a) seção transversal, (b) vista superior.



Figura 12. Montagem do ressoador linear CPW de ouro sem filme: (a) vista superior, (b) vista inferior.

Tanto as medidas experimentais quanto as simulações foram feitas no laboratório de Microcircuitos e Microondas do Grupo de Sistemas Ópticos e de Microondas (GSOM) do Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da PUC-Rio.

Composição do filme	Espessura medida d (μm)	
МТО	113	
MTO(0,95)-CTO(0,05)	165	
MTO(0,50)-CTO(0,50)	120	
MTO(0,20)-CTO(0,80)	135	
СТО	105	

Tabela 1. Composição e espessura dos filmes preparados por "screen-printing".



Figura 13. Ressoador linear CPW de ouro com filme de MTO-CTO. O detalhe mostra a superfície do filme, cuja imagem tem sido aumentada em 25 vezes.

Os resultados da resposta em frequência deste grupo de filmes depositados sobre os ressoadores CPW são apresentados na figura 14. Partindo-se de MTO puro e incrementando-se as concentrações de CTO, observa-se um deslocamento do pico de ressonância fundamental para freqüências cada vez mais baixas, até atingir o máximo deslocamento na frequência de ressonância com o ressoador elaborado com CTO puro.



Figura 14. Picos de ressonância fundamental para os ressoadores de MTO-CTO.

Uma vez medido o pico de ressonância fundamental e conhecida a espessura do filme, a constante dielétrica relativa do material cerâmico depositado pode ser determinada pela interpolação no conjunto de curvas teóricas (simuladas) mostradas na figura 15. Essas curvas representam a posição do pico da freqüência fundamental como função da constante dielétrica relativa do filme, e foram obtidas mediante múltiplas simulações de ressoadores CPW para filmes com diferentes constantes dielétricas e espessuras usando o aplicativo CST.

Com o intuito de refinar o valor obtido da constante dielétrica relativa, foi realizado um procedimento de otimização. Através de ajustes finos no valor da constante dielétrica, foi possível encontrar o valor que proporcionou a melhor concordância entre os resultados teóricos e os experimentais. Este procedimento foi feito para todos os filmes. Como um exemplo, a figura 16 mostra as perdas de inserção simulada e medida para o ressoador elaborado com $MTO_{(0,2)}$ - $CTO_{(0,8)}$, com um filme de 135 µm de espessura, constante dielétrica de 12,4 e tan δ = 0,009. Pode-se observar nesta figura uma excelente concordância entre os resultados teóricos e experimentais.



Figura 15. Previsões teóricas para a relação entre a freqüência fundamental de ressonância e a constante dielétrica relativa dos filmes para diferentes espessuras (d em μ m).



Figura 16. Perda de inserção medida e simulada para o ressoador com MTO_(0,2)-CTO_(0,8).

O maior valor obtido para a constante dielétrica medida no grupo analisado foi de 17,5 para o filme de CTO e o menor foi de 4,2 para o MTO. Observou-se uma forte relação entre a constante dielétrica do filme e a concentração de CTO (ou MTO) no composto, como pode se observar na figura 17, onde um ajuste exponencial foi feito a fim de estabelecer esta relação. Esta característica pode ser usada como um guia para formular um material que



satisfaça os requisitos de uma determinada constante dielétrica para uma

espessura dada do filme.

Figura 17. Relação entre a constante dielétrica relativa do filme e a concentração de CTO.

As perdas nos filmes para uma dada freqüência podem ser determinadas a partir da perda de inserção e do fator de qualidade Q_L do pico de ressonância medido. O valor de Q_L é calculado a partir da medida do parâmetro S_{21} por meio da expressão:

$$Q_L = f_R / \Delta f_{3dB} \tag{8}$$

onde f_R é a freqüência do pico e Δf_{3dB} é a largura de banda 3 dB do pico de ressonância. O fator de qualidade descarregado Q_0 pode ser calculado a partir de (Gupta, 1996):

$$Q_0(f_R) = \frac{Q_L(f_R)}{1 - 10^{\frac{S_{21}(f_R)}{20}}}$$
(9)

Finalmente, as perdas dielétricas dos filmes podem ser calculadas com a seguinte expressão aproximada:

$$\tan \delta \approx \frac{1}{Q_0} \tag{10}$$

A expressão (10) é usada assumindo-se que as perdas dielétricas são consideravelmente maiores do que as perdas devidas aos condutores e à radiação (Gupta, 1996). Os resultados para a tangente de perdas dos filmes analisados estão entre 0,0064 e 0,0098, para freqüências entre 3,22 e 3,89 GHz. As propriedades dielétricas obtidas para os filmes de MTO, CTO e $MTO_{(x)}$ – $CTO_{(1-x)}$ são apresentadas na tabela 2.

Composição do filme	Freqüência fundamental (GHz)	€r	Δf_{3dB}	Q_0	tan δ
МТО	3,89	4,2	0,039	154,9	0,0064
MTO(0,95)-CTO(0,05)	3,88	5,1	0,045	122,3	0,0082
MTO(0,50)-CTO(0,50)	3,66	8,3	0,040	152,2	0,0066
MTO(0,20)–CTO(0,80)	3,38	12,4	0,045	111,3	0,0090
СТО	3,22	17,5	0,045	108,2	0,0092

Tabela 2. Resultados experimentais para os filmes de MTO, CTO e $MTO_{(x)}$ -CTO_(1-x).

Um resultado interessante nesta série de caracterizações foi aquele obtido para o filme de CTO, que apresentou o maior valor para a constante dielétrica relativa do grupo analisado (17,5) para uma freqüência de 3,22 GHz e um fator de perda aceitável (tan $\delta < 10^{-2}$). Isto fez com que este material fosse escolhido para ser usado na confecção de um TLT que será apresentado no capítulo 6.

5.2.2

Caracterização de filmes espessos de CTO pelo método da linha de transmissão CPW

Para validar o resultado da caracterização do CTO feita na seção anterior foi elaborada uma linha de transmissão CPW de ouro com filme de CTO depositado sobre os condutores. Os parâmetros desta estrutura são mostrados na figura 4 (a) e as dimensões foram as mesmas que aquelas usadas para o caso dos ressoadores lineares CPW da seção 5.2.1 (L = 25,4 mm, A = 5,0 mm, H = 635 µm, $W = 500 \ \mu\text{m}$ e $G = 210 \ \mu\text{m}$, $t = 3 \ \mu\text{m}$). A espessura do filme de CTO depositado foi de 136 μ m. A simulação no domínio da freqüência foi realizada com o aplicativo HFSS (High Frequency Simulation Software), considerando um valor de constante dielétrica igual a 17,5 e uma tan δ de 0,009, que foram os valores obtidos com o método do ressoador linear CPW (tabela 2) para as dimensões anteriores. A razão de ter usado outro aplicativo na comparação de análises teóricas e medidas experimentais nesta seção (HFSS em vez do CST, usado nos capítulos e seções anteriores) é demonstrar que ambas as técnicas usadas na caracterização de materiais em microondas no presente trabalho são independentes do aplicativo utilizado. Nas figuras 18 e 19 pode-se observar excelente concordância entre os resultados teóricos e experimentais para a perda de retorno e para a perda de inserção da linha CPW com filme de CTO, respectivamente, confirmando os resultados da seção 5.2.1.



Figura 18. Perda de retorno medida e simulada para a linha CPW com filme de CTO.



Figura 19. Perda de inserção medida e simulada para a linha CPW com filme de CTO.

As Figuras 20 e 21 mostram as curvas de reflectometria no domínio do tempo obtidas usando-se um TDR (HP 54120B) para as linhas CPW de ouro sem e com o filme de CTO, respectivamente. Essas curvas mostram o comportamento do coeficiente de reflexão ρ ao longo das duas estruturas (quando a escala do eixo horizontal é convertida do domínio do tempo para distância). Sabendo-se que a impedância característica é obtida através da expressão:

$$Z_{linha} = \frac{1+\rho}{1-\rho} Z_0 \tag{11}$$

verifica-se que o filme de CTO efetivamente reduz a impedância característica da linha CPW sobre a qual é depositado. De fato, usando-se $Z_0 = 50 \Omega$ nesta expressão, as medidas feitas com o TDR deram como resultado uma impedância de 52 Ω para a linha CPW sem o filme e de 35 Ω para a mesma linha com filme de CTO depositado. Este resultado confirma o fato de que os filmes de alta constante dielétrica podem ser usados para reduzir a impedância característica de uma estrutura.



Figura 20. Curva de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a linha CPW de ouro sem filme.



Figura 21. Curva de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a linha CPW de ouro com filme de CTO.

5.3

Caracterização de filmes finos de SrTiO₃ (STO)

5.3.1

Caracterização de filmes finos de STO pelo método do ressoador linear CPW

Os filmes elaborados nesta seção foram depositados no Laboratório de Filmes Finos do Departamento de Física da PUC-Rio pelo método de "RF Magnetron Sputtering", usando um alvo de STO de 2 polegadas de diâmetro com 99,9% de pureza (Kurt J. Lesker Co). A potência foi fornecida por um gerador RF (13,56 MHz) adaptado ao alvo por uma rede sintonizável (Advanced Energy). Um filme de STO com espessura de 4,2 μ m foi depositado à temperatura ambiente com as seguintes condições de operação do sistema: potência RF de 200 W, pressão base de 6,9×10⁻⁷ Torr, pressão de trabalho de 5,5×10⁻⁵ Torr, distância alvo-substrato de 7 cm e uma taxa de deposição de 140 Å/min. A câmara de vácuo foi evacuada abaixo de 1x10⁻⁶ Torr antes de ser preenchida com argônio até a pressão de trabalho. Não foram feitos tratamentos térmicos aos filmes depositados. A espessura dos filmes (*d*) foi medida com um perfilômetro de precisão (Veeco, Dektak 150). A fotografia da figura 22 mostra a vista superior do ressoador CPW com o filme de STO depositado e devidamente montado para ser medido, como no caso dos ressoadores de MTO-CTO da seção 5.2.1. O aspecto do filme é semitransparente, levemente amarelado e a superfície é bastante regular, o que é importante para realizar metalizações que permitam a fabricação de linhas de microondas sobre o filme.



Figura 22. Ressoador linear CPW coberto com filme fino de STO de 4,2 μ m.

O método do ressoador linear CPW foi usado aqui pela primeira vez para caracterizar um filme fino, com 4,2 µm de espessura. Para isso, foi necessário tomar uma série de cuidados para adequar o método à medida de filmes finos. Um desses cuidados foi a necessidade de se considerar, nas simulações com o aplicativo HFSS, o degrau existente no filme quando depositado sobre os condutores do ressoador, dado que as dimensões das espessuras de ambos, filme e condutor, são comparáveis. A figura 23 mostra os picos de perda de inserção

obtidos experimentalmente para o ressoador CPW elaborado com o filme de STO, e os picos do ressoador de referência (com as mesmas dimensões físicas, mas sem o filme). Como pode ser visto nessa fígura, no caso do ressoador com filme, também ocorre um deslocamento dos picos de ressonância. Este efeito pode ser visto mais claramente na fígura 24, onde são apresentados só os picos de ressonância fundamental para os dois ressoadores. É sabido que quanto maior a constante dielétrica (ou a espessura do filme), maior a separação dos picos mencionados. Embora o filme STO tenha um valor de constante dielétrica alta, uma pequena mudança entre os picos de transmissão era esperada devido à sua espessura muito fina. A fim de garantir que a mudança observada fosse devida exclusivamente à camada de película dielétrica, foram realizadas medidas rigorosas para garantir que o processo de fabricação fosse bom o suficiente para evitar incertezas indesejáveis produzidas, por exemplo, por diferenças entre as dimensões dos ressoadores elaborados.



Figura 23. Medida da resposta en freqüência do ressoador com filme de STO (linha continua) e do ressoador de referencia (linha pontilhada) na faixa de 50 MHz - 20 GHz.



Figura 24. Picos de ressonância fundamental medidos para o ressoador com filme de STO (linha continua) em comparação com o ressoador de referência (linha pontilhada).

Devido à pequena espessura dos filmes de STO depositados pelo método de "RF Magnetron Sputtering", é necessário considerar o degrau formado pelo filme quando depositado sobre os condutores do ressoador linear CPW, como mostrado na figura 25 (a), onde é apresentada uma vista da seção transversal do ressoador elaborado neste caso. Na figura 25 (b) é mostrado um corte longitudinal da estrutura completa simulada com o HFSS, onde também se podem observar os degraus na superfície do filme. Este detalhe permitiu obter excelente concordância entre os resultados teóricos e experimentais na caracterização de filmes finos de STO.

Seguindo um procedimento análogo àquele usado para caracterizar os filmes de MTO-CTO descrito na seção 5.2.1, a constante dielétrica do filme de STO foi determinada como sendo igual a 95 para uma freqüência de 4,17 GHz. O valor obtido para a tangente de perdas foi baixo ($\tan \delta < 10^{-3}$). Estes resultados foram usados na análise teórica com o HFSS para estas estruturas, obtendo os picos simulados na figura 26. Como pode ser observado, os resultados teóricos e experimentais apresentam excelente concordância. Os valores encontrados nesta caracterização estão de acordo com a literatura (Taylor et al., 2003; Radhakrishnan et al., 2000; Akedo et al., 1999; Nam & Kim, 1992; Tanabe, 2000; Pennebaker, 1969), onde têm sido reportados valores entre 20 e 500 para a constante dielétrica de filmes finos de STO.

67



Figura 25. Ressoador 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.



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, $\varepsilon_r = 95$ e tan $\delta = 10^{-3}$.

Uma das condições necessárias para usar métodos de caracterização depositando filme sobre os condutores é que estes devem ficar completamente cobertos pelo filme. Isto significa que a espessura do filme deve ser maior que a da metalização. No caso prático de um filme com de espessura menor ou igual a 3 μ m, a espessura da metalização dos circuitos usada até agora, também de 3 μ m, torna-se inadequada, dado que, se d < t, existirão regiões metálicas descobertas, alterando assim, de forma indesejável, a configuração das linhas de campo eletromagnético. Nestes casos, é necessário então depositar uma camada condutora com espessura compatível, ou seja, inferior a 3 μ m sobre o substrato.

Esta condição foi levada em conta no caso particular da caracterização de um filme de STO de 3 μ m de espessura. Neste caso, uma camada de alumínio de 0,2 μ m de espessura foi depositada sobre um substrato de alumina pela técnica de "Chemical Vapor Deposition" (CVD), de modo a garantir que os condutores ficassem completamente cobertos pelo filme. É interessante salientar que a escolha do alumínio como material para a metalização do ressoador e a espessura de 0,2 μ m depositada como camada condutora, resultaram de limitações de infraestrutura do laboratório em que estes circuitos foram elaborados. Assim, sobre um circuito ressoador idêntico ao usado nos filmes anteriores, dessa vez elaborado com o alumínio de 0,2 μ m de espessura, foi depositado um filme de STO de 3 μ m também pelo método de "RF Magnetron Sputtering". Nesta deposição foram usadas as mesmas condições do caso anterior do filme de STO de 4,2 μ m de espessura, exceto pela potência do RF, que agora neste caso foi de 150 W, resultando numa taxa de deposição de 110 Å/min.

Os condutores de alumínio foram depositados empregando-se a técnica de "Chemical Vapor Deposition" (CVD) e sua espessura ficou limitada a 0,2 µm. Com esses valores de espessura da metalização, um cuidado adicional deve ser tomado durante a simulação, pois o efeito de profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos deve ser considerado. Na versão do HFSS utilizada neste trabalho existe um recurso específico para contabilizar este efeito ("skin depth"), mas esse recurso não é habilitado de forma automática. O usuário deve então habilitar esse recurso sempre que for o caso.

Os picos de ressonância fundamental medidos, para os ressoadores de referência e o com filme de STO com 3 µm de espessura depositado, são apresentados na figura 27. Observa-se mais uma vez o deslocamento relativo entre

os picos medidos dos ressoadores. Como nos casos anteriores, as propriedades dielétricas do filme foram extraídas a partir da comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos a partir de simulações. Nestas simulações em particular, foi utilizado o mesmo procedimento descrito anteriormente para o circuito com filme de STO com 4,2 µm de espessura, porém o recurso de "skin depth" foi habilitado. Conforme já mencionado, este recurso permite o modelamento adequado quando condutores muito finos são empregados.

Desta forma, obteve-se aqui como resultado uma constante dielétrica de 80 e uma tangente de perdas inferior a 10^{-3} para o filme de STO com 3 µm de espessura. Os picos de ressonância fundamental simulados com esses valores, para os ressoadores de referência e com filme também são apresentados na figura 27 e observa-se uma concordância bastante satisfatória entre as medidas e o resultado das simulações



Figura 27. Picos de ressonância fundamental medidos e simulados com o HFSS para os ressoadores de referência e com filme de STO de 3 μ m de espessura, ε_r =80 e tan δ <10⁻³.

5.3.2

Caracterização de filmes finos de STO pelo método da linha de transmissão CPW

Foi também elaborado um filme fino de 2 µm de espessura pelo método de "RF Magnetron Sputtering" com as mesmas condições de deposição do filme da seção anterior. Dessa vez o filme foi depositado sobre uma linha de transmissão CPW gravada em alumínio com 0,2 µm de espessura e usando um substrato de alumina de iguais características ao já usado. Através das simulações da perda de retorno, obteve-se para este filme uma constante dielétrica de 75 com perdas também muito baixas (< 10^{-3}). A figura 28 mostra os resultados teóricos (obtidos com o recurso de "skin depth" habilitado) e experimentais desse filme. Verifica-se também nesta figura que esses resultados correspondem a uma impedância característica igual a 72 Ω , decorrente da espessura muito fina dos condutores de alumínio.

É interessante mencionar que quando o efeito da profundidade de penetração ("skin depth") é desprezado, os resultados da simulação no HFSS fornecem uma impedância característica igual a 50 Ω para a linha CPW sem filme. Quando o efeito de profundidade de penetração é considerado na simulação, os valores teóricos e experimentais se aproximam (figura 28).



Figura 28. Perda de retorno da CPW de alumínio com filme de STO de 2 μ m por cima dos condutores com 0,2 μ m de espessura.

Essas estruturas, sem filme e com filme depositado, também foram analisadas no TDR e os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 29 e 30, respectivamente. Verificou-se novamente aqui a redução no valor da impedância característica da linha CPW pela deposição do filme de alta constante dielétrica sobre os condutores. Para a linha sem filme foi medida uma impedância de 72 Ω e de 65 Ω para a mesma linha com filme. Esses valores estão de acordo com aqueles obtidos logo acima para a mesma estrutura. Este resultado favorece a escolha do STO para ser usado na elaboração do TLT.



Figura 29. Traço obtido no TDR para a linha CPW de alumínio sem filme.



Figura 30. Traço obtido no TDR para a linha CPW de alumínio com filme fino de STO.

5.4 Conclusões

Neste capítulo foram caracterizados filmes finos de STO e filmes espessos de MTO, CTO e de compostos $MTO_{(x)}$ -CTO_(1-x), usando o método do ressoador linear CPW, com resultados que estão de acordo com a literatura. Alguns desses resultados foram validados pelo método da linha de transmissao CPW.

Apesar da superfície apresentada pelos filmes de CTO elaborados pela técnica de "screen-printing" ser bastante irregular, não permitindo uma metalização apropriada, foi proposta e implementada uma aplicação prática utilizando os filmes espessos de CTO ($d = 105 \mu m$, $\varepsilon_r = 17,5$ e tan $\delta = 0,0092$). Esta aplicação será apresentada na seção 6.2.1.

No caso do STO, todos os filmes finos deste material analisados neste capítulo apresentaram características físicas e dielétricas ótimas para a confecção dos TLTs. As constantes dielétricas elevadas (75, 80 e 95 para filmes de 2, 3 e 4,2 μ m, respectivamente) e as baixas perdas exibidas (< 10⁻³), além da boa qualidade obtida na superfície, fizeram com que o STO depositado pelo método de "RF Magnetron Sputtering" fosse escolhido para a confecção dos TLTs propostos no presente trabalho.

Nos ressoadores elaborados para a caracterização de filmes finos de STO $(d \le 3 \mu m)$ foram utilizados condutores muito finos $(t < 0,5 \mu m)$ que introduziram perdas significativas nos dispositivos devido ao efeito de profundidade de penetração ("skin depth"). Embora estas perdas fossem elevadas em comparação com as perdas dielétricas, foi demonstrada a validade do método do ressoador linear CPW na medida da constante dielétrica e das perdas nos filmes finos de STO, partindo da comparação dos resultados teóricos com as medidas experimentais. É importante ressaltar que o aplicativo usado na análise teórica (HFSS) tem um recurso que permitiu simular com boa aproximação a resposta em freqüência dos dispositivos elaborados com condutores muito finos.

A escolha dos materiais com os quais foram elaboradas as aplicações práticas que serão apresentadas no capítulo seguinte foi baseada nos resultados obtidos para a constante dielétrica e a tangente de perdas dos filmes analisados ao longo deste capítulo.