

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

No presente trabalho foi realizado um estudo teórico e experimental sobre a utilização de filmes de alta constante dielétrica em dispositivos passivos de microondas. A motivação deste estudo foi a de obter dispositivos casadores de impedância de tamanho reduzido com resposta banda larga. Aspectos tais como escolha do material mais adequado, possíveis configurações para implementação da estrutura e técnicas de fabricação de filmes de elevada constante dielétrica foram analisados em termos da viabilidade do seu uso na confecção dos dispositivos projetados no desenvolvimento desta tese.

Uma análise teórica de diferentes estruturas planares em microondas, feita mediante simulações no domínio da frequência com os aplicativos CST e HFSS, permitiu escolher a configuração QCPW ("Quase-Coplanar Waveguide") como a estrutura sobre a qual estariam baseados alguns dispositivos de adaptação de impedâncias projetados como aplicações práticas no presente trabalho. A flexibilidade em termos de dimensões exibida por este tipo de estrutura, sobretudo para alcançar impedâncias características tão baixas quanto 3Ω , foi um fator determinante nesta escolha.

Quanto aos materiais, e sendo as propriedades dielétricas deles um dos fatores mais importantes a ser levado em consideração nas aplicações práticas, a caracterização dos filmes tornou-se um capítulo importante na seleção dos materiais a serem utilizados na implementação dos circuitos apresentados no presente trabalho. Para determinar a constante dielétrica e a tangente de perdas dos materiais analisados foi desenvolvido o método do ressoador linear CPW que foi aplicado pela primeira vez para a caracterização de filmes finos. Os resultados obtidos a partir desse método foram bastante satisfatórios e concordam com os já reportados na literatura, demonstrando a efetividade desta técnica de caracterização em todos os casos em que foi aplicada. Em alguns desses casos, e como complemento, foram usadas linhas CPW com filme depositado sobre elas para extrair a constante dielétrica e a tangente de perdas com o intuito de compará-las com aquelas obtidas pelo método do ressoador CPW. Ambas as

técnicas basearam-se na comparação de medidas experimentais com resultados de simulações no domínio da frequência. Os resultados obtidos com ambas as técnicas concordaram satisfatoriamente.

Com a técnica do ressonador linear CPW para filmes espessos, foi caracterizada uma série de filmes elaborados com compostos MTO-CTO, depositados por "screen-printing", com espessuras entre 70 e 165 μm . Como resultado dessa análise foi escolhido o CTO para as aplicações com filmes espessos, dado que esse filme apresentou as seguintes características: boa qualidade de sua superfície, constante dielétrica igual a 17,5 e baixas perdas ($\tan\delta = 0,009$).

Os filmes finos analisados aqui foram obtidos usando um alvo comercial de STO com 99.9 % de pureza (Lesker) pelo método de "RF Magnetron Sputtering" na PUC-Rio. Foram fabricados filmes finos de STO com espessura variando de 2 a 4,2 μm , caracterizados pelo método do ressonador linear CPW aplicado a filmes finos, apresentado pela primeira vez nesta tese. Esse método forneceu resultados satisfatórios, tanto na obtenção do valor da constante dielétrica e da tangente de perdas dos materiais quanto em termos de repetibilidade. Estes filmes apresentaram características ótimas para os tipos de aplicação para os quais foram projetados, que são: alta constante dielétrica (entre 80 e 95), baixas perdas ($<10^{-3}$) e superfícies livres de defeitos que permitiram depositar camadas condutoras, dando a possibilidade de projetar dispositivos multicamada.

Também pela primeira vez, foram projetados e elaborados dispositivos TLT baseados na configuração QCPW utilizando filmes de alta constante dielétrica. Para avaliá-los, foram utilizados um analisador de rede, para as medidas no domínio da frequência, e um TDR, para a determinação do comportamento da impedância ao longo da estrutura. Para facilitar a caracterização experimental dos TLTs, foram empregados arranjos "back-to-back".

O TLT QCPW fabricado com filme espesso de CTO para adaptar uma impedância de 50 Ω a outra de 90 Ω apresentou comportamento bastante satisfatório. O desempenho desta estrutura, avaliado no TDR e no domínio da frequência, mostrou uma concordância excelente entre as medidas experimentais e as previsões teóricas.

Também foi demonstrada a viabilidade de aplicação da configuração QCPW na elaboração de TLTs para adaptar impedâncias de 50Ω a outras bem menores, usando filmes finos de alta constante dielétrica. Foram elaborados, também pela primeira vez, dois dispositivos TLTs para adaptar impedâncias de 50Ω a outra-uma década menor, usando filmes finos de STO com $3 \mu\text{m}$ de espessura. Um deles foi projetado com uma variação linear na separação dos planos laterais da configuração QCPW adotada, enquanto o outro foi implementado seguindo um perfil de impedância tal que ao longo de seu comprimento gerasse uma resposta em frequência Chebyshev.

Dado que uma das condições para os TLTs propostos com a configuração QCPW é que os filmes devem cobrir por completo a linha central gravada no substrato, quando filmes finos são usados, existe uma limitação na espessura dos condutores: o filme tem de ser mais espesso que o condutor. Os resultados obtidos com esses TLTs, que empregaram condutores bem finos de alumínio de $0,2 \mu\text{m}$, permitiram identificar um problema adicional na elaboração de estruturas de múltiplas camadas finas em microondas, relacionado à espessura dos condutores. Quando a espessura das camadas condutoras é muito fina, os efeitos decorrentes das perdas e da profundidade pelicular de campo devem ser levados em consideração e se manifestam através de um aumento significativo no valor da impedância mais baixa (que seria, nestes casos, de 3Ω caso tais efeitos fossem desprezíveis). É possível considerar os efeitos da profundidade de penetração nas simulações com o aplicativo HFSS, desde que alguns cuidados especiais sejam tomados durante as simulações e que se disponha de enorme capacidade computacional. As previsões teóricas, considerando os efeitos da profundidade de penetração, indicaram um aumento de 8Ω no valor da impedância mínima desejada, que passou a ser, então, igual a 11Ω . Esse valor se aproxima bastante do valor medido pelo TDR de 13Ω .

Conclui-se, então, a partir da elaboração e caracterização experimental desses últimos TLTs com filmes finos, que para se alcançar valores de impedâncias tão baixos quanto 3Ω em uma das extremidades do dispositivo, a camada de metalização deveria ser fabricada com uma espessura que fosse fina o suficiente para ser coberta pelo filme dielétrico e espessa o suficiente para evitar os efeitos decorrentes da profundidade pelicular. Para satisfazer esse

compromisso, considerando um filme de 3 μm de espessura, um valor de aproximadamente 1,5 μm , seria o apropriado para a espessura da metalização.

Uma vez superadas as limitações técnicas relativas à fabricação das camadas de metalização com espessuras de 1,5 μm , será possível confeccionar TLTs capazes de adaptarem 50 Ω a impedâncias tão baixas quanto 3 Ω .

Outra forma possível de superar a dificuldade na espessura da metalização seria depositar filmes utilizando técnicas que permitissem obter camadas dielétricas com espessuras maiores entre 5 e 10 μm . Desse modo, poderiam ser empregadas camadas metálicas comercialmente disponíveis (ouro de 3 μm) na elaboração dos circuitos a serem cobertos pelo filme. Essas duas últimas opções ficam como sugestões para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro.