

## Introdução

Com o aumento constante na demanda da eletrônica sem fio e dos sistemas de comunicações ópticas, tem-se tornado essencial a elaboração de dispositivos de alta frequência que sejam confiáveis, de tamanho reduzido e de baixo custo com altos níveis de desempenho. Estas condições são de particular interesse na integração de elementos passivos, dado que estes últimos ocupam aproximadamente 60 % da área total dos dispositivos portáteis (Setter et al., 2006). A redução no tamanho dos dispositivos é condição necessária à integração dos circuitos elétricos aos componentes optoeletrônicos (Hsieh et al., 2007).

Em geral, os dispositivos optoeletrônicos possuem impedâncias de entrada bastante diferentes daquelas apresentadas pelas fontes que fornecem o sinal modulante de alta frequência. O casamento de impedâncias é então uma etapa fundamental no projeto de qualquer subsistema de microondas que inclua um desses dispositivos. No caso particular dos sistemas de comunicações ópticas, é preciso integrar dispositivos optoeletrônicos de baixas impedâncias (entre 3 e 5  $\Omega$ ) com outros elementos ou subsistemas que possuem impedâncias típicas de 50  $\Omega$ . Neste procedimento de integração ocorrem perdas elevadas de potência provocadas pela reflexão do sinal nas interfaces entre elementos que apresentam diferença de impedâncias entre eles. Problema análogo ocorre quando se deseja conectar linhas de 50  $\Omega$  a dispositivos com impedâncias de entrada mais elevadas, como, por exemplo, 75  $\Omega$  de antenas (Matthaei et al., 1985) ou mesmo impedâncias mais elevadas como a dos moduladores de eletro-absorção (Chang, 2005).

As alternativas para solucionar esses problemas recaem na adaptação de impedâncias entre elementos de um sistema de microondas. O acoplamento direto entre valores de impedâncias tão diferentes (como por exemplo, de 50 para 3 ou para 5  $\Omega$ ) faz com que aproximadamente 70 % da potência seja refletida de volta para o gerador. Estruturas de adaptação de impedâncias são relativamente simples de serem projetadas, com elementos concentrados ou com “stubs”. Entretanto

esses dispositivos proporcionam o casamento de impedâncias apenas numa faixa restrita de frequências (Music et al., 2003).

Soluções mais elaboradas para esses problemas utilizam transformadores de impedância em linha de transmissão (TLTs), de larga banda passante, e que permitem o acoplamento de forma eficiente entre as linhas convencionais de  $50 \Omega$  e os componentes optoeletrônicos de alta velocidade e de baixa impedância, tais como os lasers semicondutores (tipicamente com 3 a  $5 \Omega$  de resistência de entrada) (Tang & Li, 1995). Nesse contexto, tem sido demonstrado que uma linha de transmissão afilada (“taper”) com perfil Chebyshev apresenta o melhor desempenho no procedimento de adaptação de impedâncias entre dois elementos ou subsistemas em microondas (Collin, 1992).

Por outro lado, para atender as demandas de miniaturização de dispositivos, materiais de alta constante dielétrica vêm sendo amplamente investigados, pois permitem reduzir o tamanho dos circuitos nos quais são incluídos (Kretly et al., 2004). Recentemente (Demenicis et al., 2005), foi proposto um transformador de impedância em linha de transmissão com uma configuração multicamada obtida por deposição de filmes finos de elevada constante dielétrica sobre condutores impressos sobre substratos “bulk” convencionais (alumina). A constante dielétrica efetiva resultante apresentou valores altos, a dispersão foi muito baixa e a frequência de corte para os modos de ordem superior foi aumentada significativamente.

No trabalho de Demenicis (2004) foi projetada e simulada uma estrutura para a adaptação de impedâncias de uma linha convencional de  $50 \Omega$  para outra de  $3,5 \Omega$ , com resultados teóricos bastante promissores. Nesse trabalho, tal estrutura foi denominada QCPW (da sigla em inglês “Quasi Coplanar Waveguide”). Com essa estrutura, seria possível realizar impedâncias tão baixas quanto  $3,5 \Omega$ , sem comprometer o lado de alta impedância ( $50 \Omega$ ), utilizando-se uma geometria da seção transversal bem simples e com dimensões transversais confortáveis. Até o momento esta estrutura ainda não foi usada na implementação de TLTs. No presente trabalho esta configuração será chamada de QCPW.

O presente trabalho teve como propósito realizar um estudo teórico e experimental sobre materiais de alta constante dielétrica e suas aplicações na elaboração de dispositivos passivos de microondas com configurações de

múltiplas camadas dielétricas. Foi bastante explorado aqui o uso dessas configurações para o projeto, simulação e caracterização experimental de diversos dispositivos de adaptação em linha de transmissão, com diferentes níveis de impedâncias.

Como uma das exigências impostas aos dispositivos aqui analisados é que apresentem dimensões reduzidas, da ordem de milímetros, foi feita então a otimização e implementação de diversos transformadores de impedância em linha de transmissão (TLTs) usando estruturas planares não convencionais e filmes de alta constante dielétrica. Os projetos envolveram uma razão de transformação de impedâncias elevada (da ordem de 10), uma perda de retorno máxima na banda passante de 20 dB e comprimentos totais das estruturas iguais ou inferiores a 10 mm.

No capítulo 2 são apresentados os filmes dielétricos mais adequados para serem empregados nos TLTs. As principais características que o filme dielétrico deve possuir são: elevada constante dielétrica, baixas perdas e baixa dependência das propriedades dielétricas com a temperatura (alta estabilidade térmica). Essas características devem valer à temperatura ambiente (300° K) e nas frequências de microondas. Os filmes mais promissores são obtidos a partir de cerâmicas de alta constante dielétrica e alguns são ferroelétricos. O comportamento desses últimos materiais ainda não é totalmente compreendido e suas propriedades dielétricas variam com a frequência, com a temperatura e com a aplicação de um campo elétrico DC (“bias”).

As características elétricas dos filmes dependem fortemente do processo de fabricação, da qualidade e da espessura do filme, do substrato, dos eletrodos (metais ou supercondutores em altas temperaturas, “HTS”), e das condições da caracterização (frequência, temperatura e aplicação de campo elétrico DC). Devido a essa grande diversidade de parâmetros, é de fundamental importância realizar a caracterização experimental do filme com o qual se pretende trabalhar, na faixa de frequências pretendida, de modo a realizar um projeto que considere as características reais do filme em questão.

No capítulo 3 são apresentadas algumas estruturas planares convencionais de microondas e são mostradas comparações com estruturas de múltiplas camadas dielétricas, entre elas as linhas de transmissão QCPW. O estudo teórico das estruturas planares foi feito com o objetivo de comparar características

importantes para a elaboração dos TLTs, tais como o valor da impedância com as dimensões envolvidas e a resposta em frequência. Algumas delas são estruturas convencionais (CPW, “microstrip”, etc.) que são mostradas somente para fins de comparação. A partir dos resultados obtidos com simulações feitas no domínio da frequência é possível obter as dimensões físicas e as características dos materiais a serem usados na fabricação do dispositivo. Além disso, é possível escolher a estrutura que melhor cumpra com as especificações exigidas no projeto. É também analisado o efeito da aplicação de filmes de elevada constante dielétrica na confecção de TLTs, e as alternativas propostas são avaliadas.

No capítulo 4 é analisado com detalhe o perfil Chebyshev para projetar transformadores de impedância de larga banda passante. As análises teóricas foram realizadas no domínio da frequência usando os aplicativos comerciais CST Studio Suite (Computer Simulation Technology, 2010) e HFSS (Ansoft High Frequency Simulation Software - 3D Full-Wave Electromagnetic Field Simulation), para o modelamento eletromagnético de estruturas tridimensionais. Estes aplicativos foram utilizados tanto para projetar as estruturas quanto para analisá-las no domínio da frequência.

A caracterização experimental dos materiais utilizados, que consiste na obtenção dos valores da constante dielétrica e da tangente de perdas dos filmes, é apresentada no capítulo 5. Ela foi realizada utilizando-se diferentes técnicas. Foi desenvolvido um método empregando ressoadores lineares CPW, semelhante ao apresentado em (Demenicis et al., 2007), mas que foi aqui aperfeiçoado e adequado para ser usado pela primeira vez na caracterização de filmes finos. Os resultados obtidos com este novo método de caracterização de filmes finos foram comparados aqui com os obtidos por métodos convencionais, como o da simples linha de transmissão e apresentaram excelente concordância.

No capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais dos TLTs elaborados com a aplicação de filmes de alta constante dielétrica em frequências de microondas. Foram confeccionadas e analisadas estruturas utilizando-se filmes finos e filmes espessos. São apresentados resultados obtidos a partir de diferentes estruturas tais como linhas de transmissão QCPW e TLTs com perfis do tipo linear e Chebyshev. Os resultados experimentais no domínio da frequência obtidos a partir de um analisador de redes são comparados com os resultados de simulações feitas com o aplicativo HFSS. A partir desta comparação, o

desempenho dos TLTs elaborados foi avaliado e obteve-se excelente concordância entre os resultados medidos e as previsões teóricas. Medidas de reflectometria no domínio do tempo, TDR, são também apresentadas e usadas para avaliar os perfis de variação de impedância ao longo dos TLTs.

Finalmente, conclusões e propostas a serem trabalhadas no futuro são apresentadas no capítulo 7.