1 Introdução

Com a crescente demanda dos sistemas de comunicação móveis sem fio e de banda larga para transmissão de áudio, vídeo e dados, por exemplo, em WLANS (*Wireless Local Area Networks*), interconexão de computadores, sistemas de comunicações de satélites, e muitas outras aplicações, aumentou a procura por sistemas que associam a tecnologia de circuitos de microondas e de rádio-freqüência com a de fibras ópticas (Music et al., 2003). Com esta associação, é possível obter circuitos de alto desempenho, baixo custo, baixo consumo de potência e de tamanho reduzido. A redução no tamanho dos dispositivos é condição necessária à integração dos circuitos elétricos aos componentes optoeletrônicos.

A maioria dos lasers semicondutores encapsulados disponíveis comercialmente são inadequados para o emprego em freqüências de rádio-freqüência (RF) e de microondas devido ao descasamento de impedâncias entre a sua baixa impedância (tipicamente 3 a 5 Ω) e a impedância de 50 Ω das linhas de transmissão convencionais dos sistemas de alta freqüência. A introdução de uma estrutura capaz de promover a adaptação entre essas impedâncias é essencial para evitar o desperdício do sinal de RF ou de microondas a ser injetado no laser, bem como sua reflexão de volta para ao gerador. O acoplamento direto entre valores de impedâncias tão diferentes faz com que aproximadamente 70 % da potência elétrica seja refletida de volta para o gerador e não seja aproveitada pelo laser.

Para resolver este problema de reflexão da potência, os lasers comerciais já vêm de fábrica encapsulados com um resistor (com resistência da ordem de 47 Ω) em série com o componente optoeletrônico. A introdução deste resistor resolve o problema da reflexão de potência de volta para o gerador, mas ao mesmo tempo dissipa grande parte da potência destinada ao laser na forma de calor. A solução mais adequada consiste em introduzir um dispositivo que realize o casamento de impedâncias sem dissipar energia.

Estruturas de adaptação que operam numa faixa estreita de frequências são relativamente simples de serem projetadas, com elementos concentrados ou com STUBS, mas proporcionam o casamento de impedâncias apenas numa restrita faixa de frequências, como é o caso da solução proposta recentemente por Music et al. (2003), onde a utilização de um filtro passa-baixa LC, devidamente projetado, operando na faixa de 1.8 a 2.1 GHz proporcionou uma melhoria 15 dB na perda de retorno e 3 dB na potência transmitida ao laser. Para sistemas de alta velocidade, que operam com largas faixas de frequência esta solução é inadequada. Neste caso, o mais indicado é utilizar estruturas de adaptação de impedâncias banda larga.

Os transformadores de impedância em linha de transmissão (TLT) de banda larga permitem, então, o acoplamento entre as linhas convencionais de 50Ω aos componentes optoeletrônicos de alta velocidade e de baixa impedância, de forma eficiente (sem dissipação de energia) e em uma larga faixa de frequências. Trabalhos anteriores (Carvalho et al., 1991c) já demonstraram a melhoria no desempenho proporcionada pelo casamento adequado de impedâncias através do uso de transformadores de impedância banda larga. O dispositivo apresentado por Carvalho (1991c) foi implementado em linha de transmissão planar, e utilizou uma linha de transmissão afilada do tipo exponencial com resposta em frequência passa-alta. Para realizar os níveis de impedância desejados, foi necessário utilizar uma geometria bastante complexa, inadequada à integração aos dispositivos optoeletrônicos. Além disso, as dimensões transversais e longitudinais (da ordem de 5 cm) deste dispositivo são incompatíveis com as dimensões reduzidas dos dispositivos optoeletrônicos (da ordem de dezenas ou centenas de microns).

O objetivo desta tese foi, então, o de buscar soluções para superar as limitações e os problemas encontrados para a realização prática de transformadores de impedância em linha de transmissão (TLT) planar, banda larga, que tenham desempenho satisfatório e sejam compactos e com geometria simples.

Os transformadores de impedância apresentados nesta tese são do tipo linha de transmissão afilada, cuja resposta em frequência passa-alta é a mais indicada para aplicações de alta velocidade. Diferentemente do trabalho de Carvalho (1991c), optou-se aqui pela linha afilada Chebyshev, que conforme será

apresentado no capítulo 2 desta tese, apresenta uma série de vantagens em relação aos outros tipos de linhas.

O capítulo 2 é dedicado, então, às características dos transformadores de impedância em linha de transmissão e às análises teóricas dos mesmos. Será introduzido o conceito de associar aos substratos *bulk* convencionais de alumina, filmes de elevada constante dielétrica, permitindo a obtenção de linhas de transmissão planares com dimensões transversais mais confortáveis e seções transversais simples em relação aos casos em que é utilizado simplesmente um substrato *bulk*.

Ainda no capítulo 2 é apresentada uma descrição das técnicas utilizadas para a realização das análises teóricas desenvolvidas nesta tese. Foram feitas análises tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Para realizar as análises no domínio da frequência utilizou-se o método de análise de onda completa, pois este é o método mais adequado para analisar as estruturas não-TEM consideradas aqui. Uma ferramenta baseada na análise de onda completa, e no método de elementos finitos, que mostrou-se adequada às necessidades foi o aplicativo comercial HFSS 5.6 (*High-Frequency Structure Simulator*) (HP Agilent Technologies, 2000). O aplicativo HFSS é indicado para o modelamento eletromagnético de estruturas tridimensionais passivas de forma arbitrária, e foi utilizado tanto para projetar as estruturas apresentadas nesta tese, quanto para analisá-las no domínio da frequência. Apesar de ser uma ferramenta bastante poderosa, o HFSS não realiza análises no domínio do tempo. Para isto, foi necessário buscar uma outra ferramenta. Para realizar as análises no domínio do tempo e do desempenho de um sistema óptico digital completo quando as estruturas projetadas são inseridas no sistema foi utilizado o aplicativo MARTINS (Conrado, 1996).

O capítulo 3 apresenta e descreve diferentes tipos de configurações para a realização do transformador de impedância em linha de transmissão planar.

Na primeira configuração apresentada utiliza-se um substrato *bulk* de altíssima constante dielétrica ($\epsilon_r=80$) na configuração CPW (*CoPlanar Waveguide*) convencional. Conforme será visto a partir dos resultados teóricos obtidos para esta estrutura, esta configuração apresenta uma série de limitações. Com o objetivo de superar as limitações impostas pela configuração CPW convencional foram propostas duas outras alternativas, que introduzem duas novas configurações não-convencionais para a realização do TLT.

A primeira configuração proposta é obtida a partir da deposição de um filme de altíssima constante dielétrica sobre uma estrutura CPW convencional fabricada sobre substrato *bulk* de alumina convencional. Esta configuração foi denominada de OCPW (*Overlayered CoPlanar Waveguide*), que significa CPW com uma sobrecamada de filme. Como será visto, o desempenho do TLT na configuração OCPW é bem superior, em termos de dispersão e do aparecimento de modos de ordem superior, à configuração CPW convencional.

Na segunda configuração proposta também se associa ao substrato *bulk* de alumina, filmes de elevada constante dielétrica. Neste caso, a sobrecamada de filme é depositada sobre a linha condutora central, e abaixo dos planos de terra laterais. Esta configuração foi denominada, então, de QCPW (*Quasi-CoPlanar Waveguide*). Além de apresentar as mesmas vantagens que a configuração OCPW, a configuração QCPW proporciona ainda uma flexibilidade enorme em termos de projeto e permite realizar com facilidade impedâncias tão baixas quanto 3.5Ω . A descoberta da configuração QCPW é tão promissora que justificou o depósito de uma patente.

Ambas as configurações, OCPW e QCPW, utilizam filmes de elevada constante dielétrica. O capítulo 4 trata, então, dos filmes de elevada constante dielétrica, onde são apresentados os filmes existentes na literatura, bem como suas principais características. É feita também, uma descrição dos filmes desenvolvidos especialmente para esta tese, com a finalidade de permitir a realização prática dos TLTs nas configurações propostas e a comprovação experimental das previsões teóricas acerca do desempenho dos mesmos. Os filmes utilizados, de titanato de bário (BTO), foram desenvolvidos em colaboração com os especialistas da UFC (Universidade Federal do Ceará). Este capítulo aborda o método empregado na fabricação destes filmes, bem como os resultados de sua caracterização físico-química e das propriedades dielétricas (constante dielétrica e tangente de perdas) em baixa frequência.

É importante ressaltar que, a obtenção de filmes de elevada constante dielétrica com as características adequadas não é uma tarefa simples, e ainda não é uma questão bem estabelecida (Gevorgian & Kolberg, 2001). Tais filmes vêm sendo amplamente investigados para serem empregados na realização de diversos dispositivos de microondas, tais como: capacitores de *by-pass* em MMIC, controladores de fase de conjunto de antenas (*phased array antennas*), memórias

DRAM e NVRAM (*Dynamic and Non-Volatile Random Access Memories*); filtros e ressoadores para uso em sistemas de comunicações móveis, de satélites e muitas outras aplicações (Nishitsuji et al., 1994; Lahiry et al., 2000; Pontes et al., 2000; Rao et al. 2001). Isto porque, a utilização de filmes de elevada constante dielétrica torna os circuitos mais compactos. Devido a este crescente interesse, em pouco tempo as questões relacionadas à obtenção destes filmes deverão estar superadas. Existe, inclusive, um grande projeto envolvendo a Comunidade Européia (Projeto MELODY - *Microwave ELectrOnics with Tuneable Dielectric LaYers*) que tem como objetivo o desenvolvimento de filmes de elevada constante dielétrica (European Communities, 2002; Sorrentino et al., 2002).

Atualmente, entretanto, a obtenção dos filmes está restrita a alguns grupos de pesquisa e ainda não é uma questão totalmente dominada. Como será visto, o comportamento das propriedades dielétricas dos filmes de elevada constante dielétrica varia em função de diversos parâmetros, tais como: método de fabricação, frequência de caracterização, temperatura e outros. Para o projeto dos TLTs nas configurações propostas, OCPW e QCPW, é fundamental conhecer, a priori, as propriedades dielétricas (constante dielétrica e tangente de perdas) dos filmes envolvidos na faixa de frequência de microondas. As propriedades dielétricas em alta frequência não podem ser obtidas a partir das propriedades em baixa frequência. Por isso, surgiu a necessidade de desenvolver um método para a caracterização das propriedades dielétricas na faixa de frequências de microondas dos filmes utilizados aqui.

No capítulo 5 é apresentada a técnica, desenvolvida especialmente para esta tese, para caracterizar, na faixa de frequências de microondas, os filmes dielétricos fabricados. Esta técnica associa os resultados experimentais de medidas utilizando ressoadores lineares CPW com uma sobrecamada de filme aos resultados obtidos a partir de simulações. Os resultados obtidos através desta técnica para diversos filmes dielétricos fabricados são apresentados. Eles mostram que dentre os diversos filmes fabricados apenas os filmes da família do BTO apresentam valores adequados (elevados) para a constante dielétrica relativa, da ordem de 150. Entretanto, tais filmes apresentam perdas bastante elevadas e uma qualidade mecânica aquém das necessidades. Foram feitas diversas tentativas no sentido de melhorar a qualidade mecânica e de diminuir as perdas nestes filmes. Apesar dos esforços, o valor das perdas permaneceu elevado. Com a qualidade

mecânica dos filmes disponíveis não foi possível implementar a configuração QCPW.

No capítulo 6 são mostrados os resultados experimentais obtidos para um transformador de impedância em linha de transmissão planar fabricado na configuração proposta OCPW empregando-se filmes de BTO. Conforme será visto, os resultados experimentais corresponderam às previsões teóricas, mas o desempenho do TLT ficou bastante comprometido devido às perdas extremamente elevadas dos filmes.

Finalmente no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.