

3

Estruturas planares de microondas com múltiplas camadas dielétricas

3.1

Introdução

Filmes dielétricos de elevada constante dielétrica vêm sendo amplamente estudados, pois encontram aplicação na realização de dispositivos planares integrados aos circuitos de microondas de dimensões reduzidas, tais como: capacitores MMIC, defasadores, filtros, antenas e outros.

Os filmes mais adequados para as aplicações em dispositivos de microondas são aqueles que possuem elevada constante dielétrica, baixas perdas, baixa dependência das propriedades dielétricas com a temperatura (alta estabilidade térmica) e que operem satisfatoriamente à temperatura ambiente (300 K) e na faixa de frequência de microondas.

No trabalho de Tanabe et al. (2000) foi demonstrada a viabilidade da confecção de um transformador de quarto de onda de uma seção CPW, depositando-se uma camada uniforme de filme fino de 1 μm de titanato de estrôncio (SrTiO_3), com ϵ_f da ordem de 150, imediatamente acima do substrato de arseneto de gálio (GaAs), com $\epsilon_s=12,85$, e com as fitas condutoras coplanares depositadas sobre o filme. Os resultados desse trabalho demonstraram que o uso do filme de alta constante dielétrica trouxe uma maior flexibilidade para o projeto do transformador de quarto de onda em questão, pois para as mesmas dimensões físicas (largura das fitas condutoras e dos espaçamentos entre as linhas) foram alcançados valores menores para a impedância característica da linha de transmissão (Z_c). Em média, foi obtida uma redução de 10Ω no valor da impedância apenas com a introdução do filme.

No trabalho de Demenicis (2005) foi proposto um transformador de impedância em linha de transmissão com uma configuração multicamada obtida pela deposição de filmes finos de elevada constante dielétrica sobre condutores coplanares impressos sobre substratos “bulk” convencionais (alumina). A

constante dielétrica efetiva resultante apresentou valores elevados, a dispersão foi muito baixa e a frequência de corte para os modos de ordem superior foi aumentada significativamente.

Portanto, a utilização de filmes de elevada constante dielétrica em linhas de transmissão tem-se mostrado bastante promissora. Valores entre 100 e 200 são frequentemente encontrados para a constante dielétrica na faixa de frequência de microondas dos filmes existentes. Com relação às perdas, é possível encontrar para esses filmes tangentes de perda variando de 0,006 até 0,2, de acordo com os dados de Gevorgian (2001). Evidentemente, quanto menor o valor da tangente de perdas do filme, melhor para o desempenho dos dispositivos fabricados com esse filme.

3.2

Análise teórica de estruturas planares em microondas

No presente trabalho, foi realizada uma análise teórica de diferentes configurações para implementação de estruturas planares com o objetivo de avaliar e comparar suas respectivas características, de modo a selecionar o tipo de configuração de linha de transmissão mais adequado para a elaboração dos TLT desejados.

Nesta seção serão apresentados os resultados da análise de diferentes configurações de estruturas planares de microondas realizada a partir de simulações no domínio da frequência usando o aplicativo CST Studio Suite (Computer Simulation Technology, 2010). Os critérios de seleção para a escolha da configuração mais adequada basearam-se no desempenho da estrutura, considerando principalmente a possibilidade de obter os valores para as impedâncias desejadas, valores aceitáveis para as perdas por inserção e a viabilidade de sua implementação quanto às dimensões físicas, os materiais e os processos de fabricação envolvidos. Todas as configurações analisadas nas simulações empregaram filmes de alta constante dielétrica na elaboração das linhas de transmissão.

3.2.1

Estruturas analisadas

A figura 4 mostra as seções transversais das configurações simuladas com os seus respectivos parâmetros. Nelas se distinguem: o substrato (ϵ_s), o filme depositado (ϵ_f) e a metalização (retângulos pretos). Em (a) e (b) são mostradas estruturas CPW e "microstrip" convencionais, respectivamente, que foram simuladas para fins de comparação com aquelas que possuem filme. Em (c) e (d) aparecem, respectivamente, as linhas CPW e "microstrip" com um filme de alta constante dielétrica depositado sobre as fitas condutoras. Na estrutura (e), a linha CPW é gravada sobre o filme, que por sua vez é depositado diretamente sobre o substrato, tal como no trabalho de (Tanabe, 2000). Em (f), o filme é depositado entre a linha central e os planos de terra laterais. Finalmente, em (g), o filme aparece entre o plano de terra (acima) e a linha central. As configurações das figuras 4 (c) e (f) foram amplamente analisadas nos trabalhos de Demenicis (2004, 2005) e denominadas OCPW (pela sigla em inglês "Overlayered-Coplanar Waveguide") e QCPW ("Quasi-Coplanar Waveguide"), respectivamente. Antes da presente tese, apenas as estruturas OCPW haviam sido implementadas.

Nas simulações desta seção, foram projetadas estruturas com 10 mm de comprimento (L) e 5,0 mm de largura (A). Tanto os condutores quanto os dielétricos foram considerados ideais (sem perdas); o substrato foi de alumina ($\epsilon_{al} = 9,8$), com uma altura de 635 μm (H); a largura da linha central em todos os casos foi de 0,5 mm (W); o espaçamento entre a linha central e os planos laterais foi de 200 μm (G); e a espessura de todas as partes metálicas (fitas condutoras e planos de terra) foi de 3 μm (t). Na estrutura mostrada na figura 4 (f), a separação entre os planos laterais foi de 900 μm (S). Em todas as estruturas com filme, este foi considerado com uma espessura de 10 μm (d , medida a partir da parte superior da metalização) e uma constante dielétrica relativa de 20. A faixa de frequências considerada nas simulações foi de 0,05 a 20 GHz.

3.2.2

Resultados e discussão

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas na seção 3.2.1 são apresentados na figura 5. Embora o valor da constante dielétrica usado para o filme não seja muito alto ($\epsilon_r = 20$) e as estruturas tenham sido simuladas como ideais, é possível comparar o comportamento das linhas de transmissão consideradas. Praticamente não se observa variações nas impedâncias em função da frequência na faixa considerada (0,05 a 20 GHz), como pode ser visto na figura 5. Com a configuração ilustrada na figura 4 (g) foi possível obter o valor mais baixo de impedância em relação ao das demais estruturas apresentadas. Do ponto de vista prático, tal como ocorre com as estruturas baseadas em linhas microstrip figuras 4 (b), (d) e (g)), esta configuração não é tão flexível para a obtenção do valor da impedância, pois dispõe como parâmetro de ajuste apenas a largura de sua linha central (W), sendo difícil obter impedâncias de 50Ω com dimensões confortáveis. Já nas estruturas baseadas em linhas CPW (figuras 4 (b), (d) e (g)), é possível também mudar o espaçamento entre a linha central e os planos laterais (G), o que confere mais flexibilidade ao projeto dos TLTs.

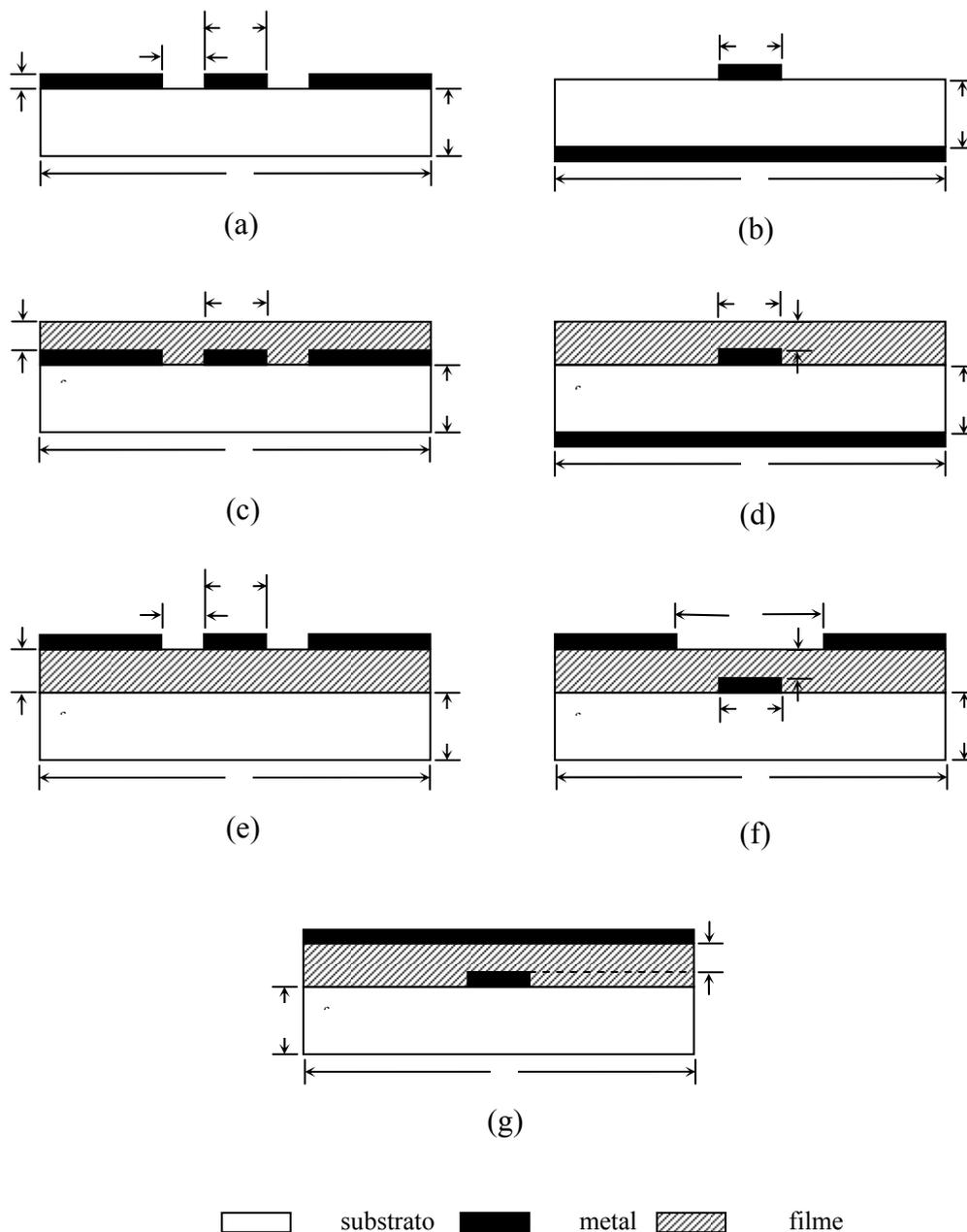


Figura 4. Seção transversal das estruturas simuladas. (a) CPW; (b) microstrip; (c) CPW com filme; (d) microstrip com filme; (e) CPW gravada sobre o filme; (f) filme depositado entre a linha central e os planos de terra laterais (QCPW); (g) filme entre o plano de terra e a linha central.

Uma configuração bem interessante é aquela representada na figura 4 (f), onde o filme é depositado entre a linha central e os planos laterais. No trabalho de Demenicis (2004), o desempenho desta estrutura foi analisado teoricamente para a elaboração dos TLTs, dado que apresentou uma grande flexibilidade para obter impedâncias tão altas quanto 50Ω e tão baixas quanto $3,5 \Omega$, mediante a variação do espaçamento S entre os planos laterais. Na seção 3.2.4, esta estrutura será

analisada com mais detalhe por apresentar características ótimas na elaboração dos TLTs.

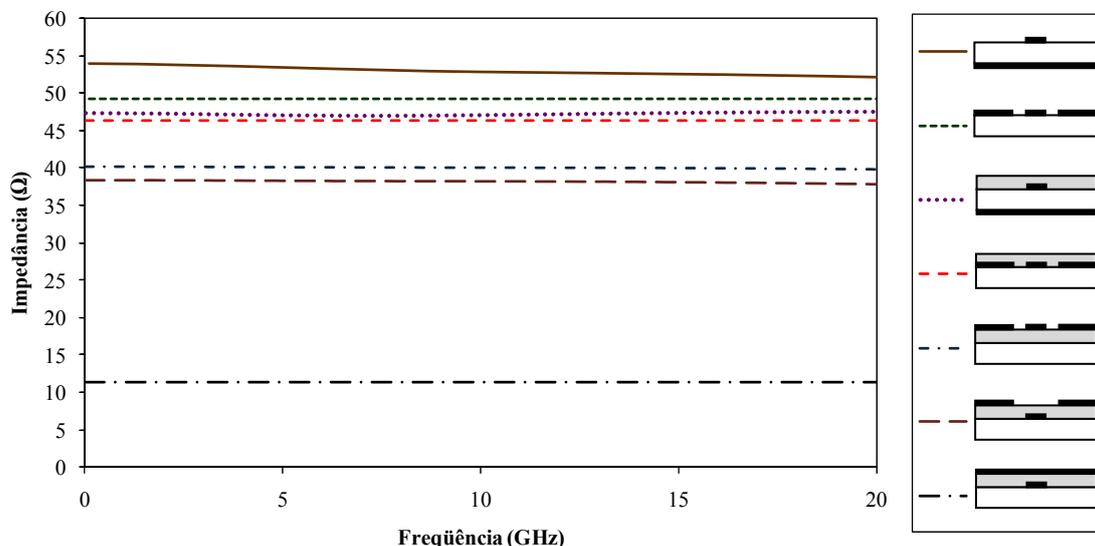


Figura 5. Impedância característica das linhas de transmissão apresentadas na figura 4.

A utilização do filme e seu posicionamento na estrutura, em relação ao plano dos condutores, permite, então, alterar significativamente o valor da impedância da estrutura. Por exemplo, comparando-se as estruturas da figura 4 (b), que não possui filme, com a da figura 4 (g), que utiliza um filme de espessura $d = 20 \mu\text{m}$ e com $\epsilon_r = 20$ é possível reduzir a impedância de 54Ω para aproximadamente 12Ω .

Essa variação no valor de Z_c pode ser ainda mais acentuada aumentando-se o valor de ϵ_r do filme e reduzindo-se sua espessura. Isto foi confirmado através de resultados teóricos das simulações com o CST.

3.2.3

Estruturas de baixa impedância utilizando filmes dielétricos e sua história

Para elaborar o dispositivo TLT proposto é fundamental dispor de uma estrutura planar que permita alcançar impedâncias tão baixas quanto 3Ω com dimensões confortáveis, tanto na fabricação quanto no manuseio final (caracterização, uso de conectores etc.).

As linhas de transmissão com baixa impedância característica têm aplicações importantes na adaptação de dispositivos optoeletrônicos, tais como lasers semicondutores, às fontes ou subsistemas do circuito. A elaboração deste tipo de linha usando estruturas planares convencionais oferece uma série de problemas práticos relacionados com os limites de fabricação e o desempenho da estrutura. Por exemplo, usando estruturas microstrip, as linhas seriam demasiado largas para serem práticas. Já usando linhas CPW, a separação entre um condutor central largo e os planos de terra laterais teria que ser demasiado pequena, o que geraria o aparecimento de modos de propagação indesejáveis (Guillick & Robertson, 1993).

Para diminuir a impedância característica de linhas CPW convencionais, têm sido propostas algumas técnicas. Uma delas consiste em depositar filmes de alta constante dielétrica acima ou abaixo dos condutores da CPW, como apresentado na figura 4 (c). Isto faz com que a constante dielétrica efetiva da estrutura seja maior, aumentando sua capacitância por unidade de comprimento, o que resulta na diminuição da impedância. Em (Demenicis et al., 2010), a impedância característica de uma CPW convencional de 50Ω caiu para 25Ω quando um filme de BaTiO_3 ($\epsilon_r \approx 125$) de $61 \mu\text{m}$ de espessura foi depositado sobre a estrutura. O problema apresentado por esta estrutura entretanto, foi o alto nível de perdas.

Em (Tanabe, 2000) é reportada uma estrutura obtida gravando-se uma linha CPW sobre um filme de SrTiO_3 de $1 \mu\text{m}$ de espessura sobre um substrato de GaAs ($\epsilon_r \approx 13$), da forma mostrada na figura 4 (e). Esta estrutura apresentou uma impedância característica de 18Ω , enquanto a CPW convencional com as mesmas dimensões era de 30Ω .

Linhas microstrip elaboradas com filmes finos (TFMS, pela sigla em inglês “Thin-Film Microstrip”), foram usadas para obter linhas de transmissão com impedâncias tão baixas quanto 3.5Ω (Guillick & Robertson, 1993). Nesta técnica, o filme fino depositado sobre um plano condutor serve como substrato para a microstrip, como é mostrado na figura 6.

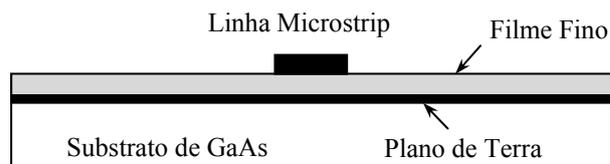


Figura 6. Estrutura “Thin Film Microstrip” (TFMS).

Outra técnica usada para reduzir a impedância característica de uma linha de transmissão consiste em elaborar estruturas multicamadas com filmes finos dielétricos que permitam a superposição das linhas condutoras com os planos de terra. Guillick & Robertson (1993) modificaram uma estrutura CPW estendendo o condutor central ou os planos de terra para fazer com que ficassem superpostos, da forma mostrada na figura 7. Dessa forma, uma porção do filme fino fica entre os condutores, o que aumenta a capacitância do sistema e reduzindo a impedância da estrutura. Com esta configuração foram atingidas impedâncias características de 7Ω com um desempenho superior ao das linhas TFMS da figura 6. O problema apresentado por este tipo de estrutura é a dificuldade na sua implementação.

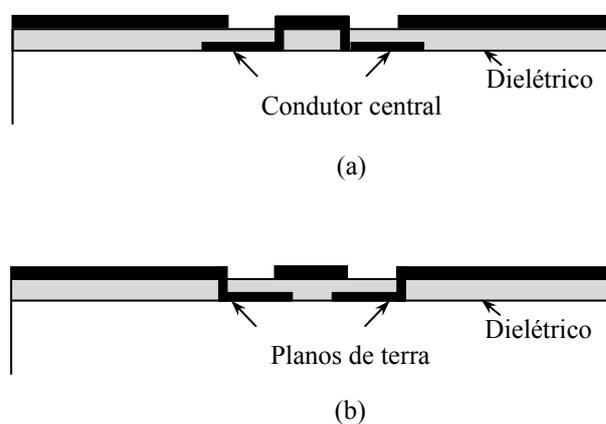


Figura 7. Configuração multicamada de linhas de transmissão de baixa impedância para (a) linha CPW com os planos de terra estendidos y (b) linha CPW com o condutor central estendido.

3.2.4

Linha de transmissão QCPW

A figura 4 (f) mostra a seção transversal de uma linha de transmissão QCPW, proposta pela primeira vez no trabalho de Demenicis (2004). Em comparação com as linhas de transmissão com condutores estendido da seção anterior, a realização prática de estruturas QCPW resulta bem mais simples, além de apresentar uma flexibilidade maior na hora de variar a separação entre os planos laterais.

Para analisar o desempenho dessa configuração, é necessário conhecer o comportamento dela em função dos seus parâmetros. Para isto, foram feitas múltiplas simulações com o aplicativo CST, considerando estruturas QCPW ideais (sem perdas nos dielétricos nem nos condutores), com o objetivo de estabelecer relações entre os parâmetros geométricos e as características elétricas.

A figura 8 mostra a impedância característica de linhas de transmissão QCPW em função da separação dos planos laterais (S), com valores que vão desde 100 até 1500 μm e para espessuras do filme (d) de 20, 50 e 100 μm . Nas simulações, o valor da constante dielétrica do filme foi considerado igual a 20. Os outros parâmetros foram os mesmos usados nas simulações da seção 3.2.2. Em todos os casos, independente da espessura do filme, existe um ponto de inflexão na curva, que ocorre quando o espaçamento S é de aproximadamente 600 μm . Para valores de S inferiores a 600 μm , a impedância tende a diminuir para os filmes mais finos. Para $S > 600$ a impedância tende a aumentar, sendo mais crítico também no caso dos filmes mais finos. Pode-se observar que, para uma espessura de filme de 20 μm , a impedância característica da linha pode variar entre 3 e 60 Ω , mediante variações suaves no espaçamento dos planos laterais da linha. Segundo esses resultados, é possível obter as impedâncias necessárias na elaboração do TLT com dimensões confortáveis.

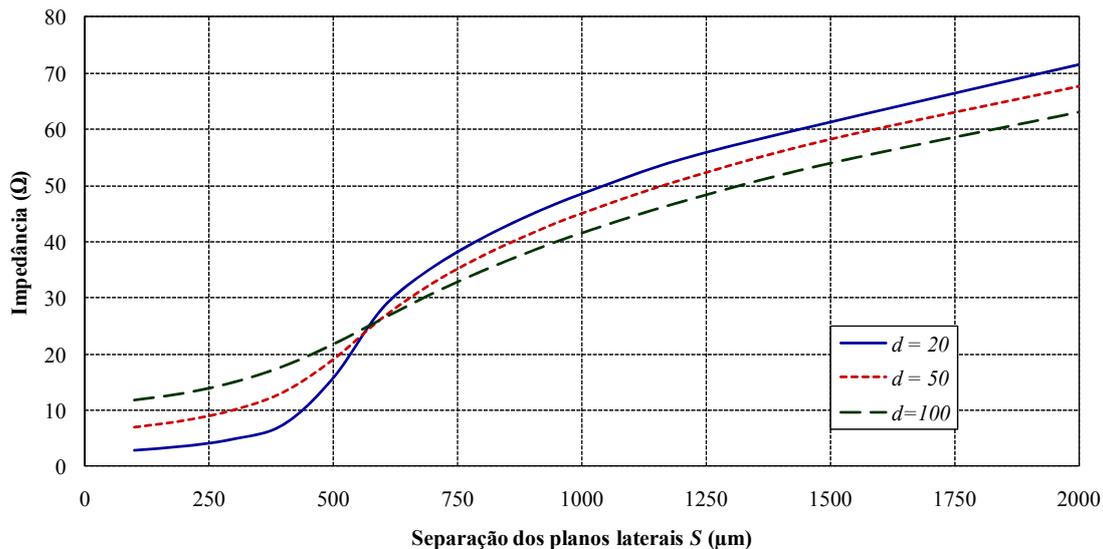


Figura 8. Impedância em função da separação (S) dos planos de terra laterais da estrutura QCPW da figura 4 (f), para diferentes valores da espessura (d , em μm) do filme depositado.

3.3

Conclusões

Foram feitas comparações dos valores da impedância de estruturas planares convencionais e não convencionais a partir de simulações com o aplicativo CST na faixa de frequências entre os 50 MHz e os 20 GHz. A estrutura QCPW foi simulada usando filmes sem perdas com uma espessura de $20 \mu\text{m}$ e $\epsilon_r = 20$, e mostrou resultados viáveis de serem empregados na confecção do dispositivo TLT proposto. Para filmes ainda mais finos com constantes dielétricas maiores é esperado que o comportamento da impedância das linhas de transmissão QCPW seja parecido com o apresentado nas figuras 5 e 7, uma vez contabilizados os efeitos de perdas nos dielétricos.

No projeto do TLT baseado na estrutura QCPW, deve-se ter um cuidado especial com as separações (S) dos planos laterais cujos valores sejam próximos à largura da linha central (W), pois nesta região a impedância pode variar drasticamente, dependendo da espessura do filme. Isto dificulta alcançar os valores desejados, dado que para os filmes mais finos ($d < 20 \mu\text{m}$), pequenas variações na separação dos planos quando $S \approx W$ podem levar a grandes variações na impedância da estrutura.