

5

Caracterização das propriedades dielétricas de filmes utilizando ressoadores lineares CPW

5.1.Introdução

O projeto de um TLT utilizando filme requer o conhecimento preciso das propriedades dielétricas do filme em questão.

Devido à complexa dependência das propriedades dielétricas dos filmes com relação aos seus parâmetros, tanto de fabricação quanto de caracterização, tais como: frequência da caracterização, temperatura de fabricação e de caracterização, métodos de fabricação e espessura do filme, conforme abordado no capítulo 4, surgiu a necessidade de um método para caracterizar o filme. Foi desenvolvido, então, um método de caracterização para permitir a medida da constante dielétrica relativa dos filmes ϵ_f e de suas perdas na faixa de frequências de microondas à temperatura ambiente, e utilizando filmes de espessura similar aos filmes a serem utilizados nos transformadores de impedância realizados nas configurações propostas no capítulo 3.

Esse método de medida da constante dielétrica e das perdas no filme baseia-se na medida do parâmetro de transmissão (S_{21}) de um circuito ressoador linear CPW confeccionado sobre substrato de alumina sobre o qual o filme a ser caracterizado é depositado.

Recentemente, 2002 e 2003, alguns autores apresentaram técnicas alternativas para caracterização de substratos *bulk* utilizando circuitos ressoadores em linha de transmissão. Peterson (2002) utilizou um ressoador CPW na configuração em T, e Bray & Roy (2003) utilizaram um ressoador *microstrip* em anel. Tais estruturas também permitem a caracterização de filmes dielétricos, mas esta possibilidade não foi explorada nos referidos artigos. No trabalho de Nurgaliev (2001), um filme de BaSrTiO₃ com espessura inferior a 1 μm foi caracterizado experimentalmente a 77 K utilizando uma linha CPW periódica confeccionada com supercondutores de YBCO (HTS). Não foi encontrado na

literatura nenhum método simples e direto de caracterização, no domínio da frequência e à temperatura ambiente, de filmes dielétricos finos ou espessos.

Neste capítulo são apresentados o projeto, a análise teórica, o método proposto e os resultados experimentais de caracterização de filmes dielétricos utilizando os ressoadores CPW fabricados. Tanto o projeto, quanto a análise teórica dos ressoadores foram feitas utilizando-se o aplicativo HFSS.

Para validar a metodologia proposta, de caracterização dos filmes dielétricos através dos ressoadores, seria necessário dispor de um filme dielétrico padrão, previamente caracterizado, de referência. Devido à indisponibilidade deste filme padrão, os resultados obtidos através das medidas com os ressoadores foram confrontados com os resultados experimentais obtidos utilizando-se linhas de transmissão CPW simples com filme dielétrico depositado sobre a mesma (Gupta et al., 1996). Comparando-se os valores da constante dielétrica e das perdas de um mesmo filme caracterizado pelos dois métodos mencionados, verificou-se que as medidas com os ressoadores são confiáveis.

5.2. Análise teórica do ressoador linear

O ressoador linear CPW estudado neste trabalho, consiste de um condutor central e dois planos de terra laterais de $3\ \mu\text{m}$ de espessura, coplanares sobre substrato de alumina de $635\ \mu\text{m}$ de espessura (H). A estrutura tem $5\ \text{mm}$ de largura (A) e $25.4\ \text{mm}$ de comprimento total (L). A fita condutora central de $500\ \mu\text{m}$ de largura (W) é interrompida duas vezes gerando três seções, ficando a seção intermediária com comprimento L_I . A figura 66 mostra uma vista superior do ressoador linear CPW.

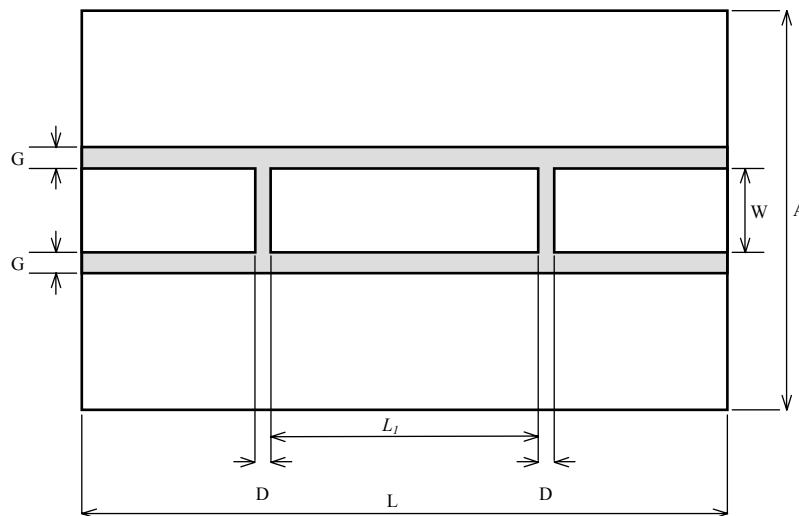


Figura 66 - Vista superior do ressoador linear CPW.

O espaçamento transversal (G) entre a fita condutora central e os semi-planos de terra laterais determina a impedância característica da linha. O comprimento das discontinuidades (D) da fita condutora central está relacionado com o fator de qualidade do ressoador. E o comprimento da seção intermediária (L_I) determina a frequência de ressonância do ressoador. Quando há ressonância, o circuito permite a passagem de campo eletromagnético, fora da frequência de ressonância, a transmissão é degradada. Desta forma, no espectro de transmissão do ressoador observam-se picos de transmissão nas frequências de ressonância, e a largura dos picos será tão menor quanto maior o valor de D .

As dimensões da estrutura foram escolhidas de forma a facilitar a implementação prática (manuseio, realização de soldas e a colocação de conectores). A largura da fita central, de $500\ \mu\text{m}$, é compatível com a largura dos conectores SMA utilizados e o valor de $D=100\ \mu\text{m}$ mostrou-se satisfatório. Esse

circuito ressoador foi projetado para, na ausência de filmes, ter uma impedância característica de 50Ω ($G=210 \mu\text{m}$) e uma frequência de ressonância fundamental em 4.15 GHz, que corresponde a $L_1=15.300 \mu\text{m}$.

Nesse ressoador linear CPW, a ressonância ocorre quando o comprimento, L_1 , é igual a um múltiplo inteiro de $\lambda_m/2$, sendo λ_m o comprimento de onda no meio de propagação. A partir da medida da frequência de ressonância, f_{Rn} , a constante dielétrica efetiva da estrutura, ϵ_{eff} , pode ser determinada de acordo com a eq. (5.1) (Gupta et al., 1996):

$$\epsilon_{eff}(f_{Rn}) = \left(\frac{nc}{2.L_1.f_{Rn}} \right)^2, \quad (5.1)$$

onde n é um número inteiro e c é a velocidade da luz no vácuo.

Na figura 67, encontra-se o espectro de transmissão do ressoador linear apresentado. Este espectro foi obtido através de uma análise teórica com o HFSS, considerando as dimensões descritas anteriormente. De acordo com o resultado da simulação, a frequência de ressonância fundamental para esta estrutura ocorre em 4.15 GHz. Este valor de frequência, que corresponde à ressonância da estrutura quando não há filme dielétrico depositado sobre a mesma, será tomado como referência.

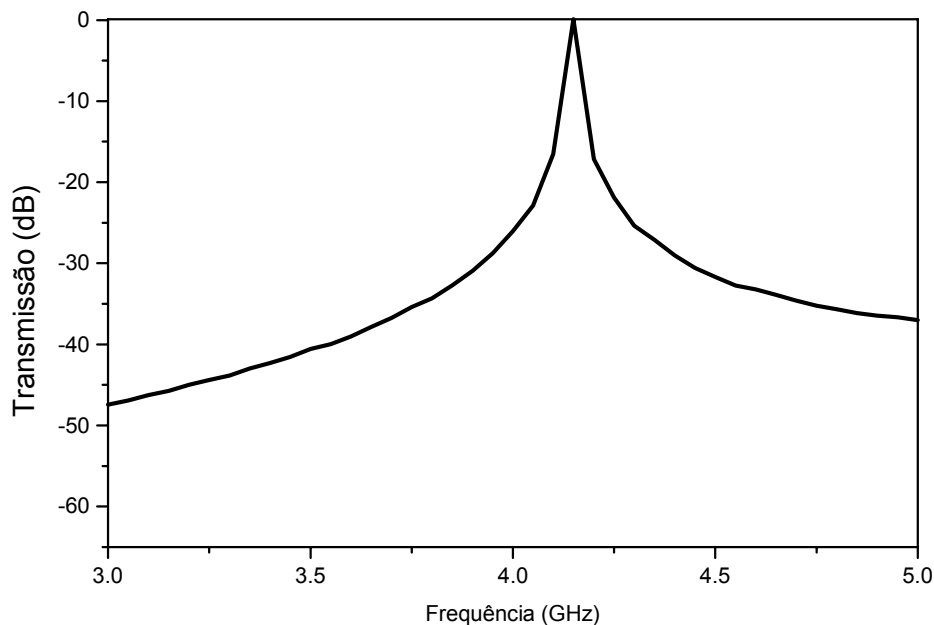


Figura 67 - Resultado teórico do espectro da transmissão do ressoador linear CPW.

O fator de qualidade descarregado deste ressoador na frequência de ressonância, $Q(f_{Rn})$, depende do seu fator de qualidade carregado $Q_L(f_{Rn})$ e do valor da perda por inserção (ou seja, da transmissão) na frequência de ressonância $S_{21}(f_{Rn})$, de acordo com a eq. (5.2) (Hoffman et al., 1987):

$$Q(f_{Rn}) = \frac{Q_L(f_{Rn})}{1 - 10^{\frac{S_{21}(f_{Rn})}{20}}}, \quad (5.2)$$

O fator de qualidade carregado do ressoador, $Q_L(f_{Rn})$, é determinado pela relação entre a frequência de ressonância, f_{Rn} e os pontos de -3 dB, f_2 e f_1 , da curva de S_{21} em função da frequência em torno de f_{Rn} , conforme mostra a eq. (5.3):

$$Q_L(f_{Rn}) = \frac{f_{Rn}}{f_2 - f_1}. \quad (5.3)$$

A partir do espectro de transmissão mostrado na figura 67, é possível observar que o valor do fator de qualidade carregado para esta estrutura é igual a 207.

O fator Q_L é o fator de qualidade do ressoador quando o mesmo está conectado à fonte e à carga, considerando assim, o efeito do sistema de medida sobre o desempenho do ressoador. O fator de qualidade de maior interesse é o descarregado, pois traduz o grau de seletividade da estrutura de forma isolada.

O fator de qualidade descarregado Q depende da geometria da estrutura e das perdas existentes na linha de transmissão. Os principais fatores responsáveis pela atenuação do sinal em linhas de transmissão CPW são os seguintes: perda no dielétrico, perda nos condutores centrais e laterais, e perda por radiação. A cada perda é possível associar um fator de qualidade correspondente, e o fator de qualidade total é dado pela eq. (5.4):

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_R} + \frac{1}{Q_d}, \quad (5.4)$$

onde Q_c , Q_R e Q_d , correspondem, respectivamente, aos fatores de qualidade relativos ao condutor, à radiação e ao dielétrico.

Em geral, quando é possível escolher um substrato dielétrico adequado, como é o caso da alumina, com tangente de perdas da ordem de 0.0001, e o efeito da radiação pode ser desprezado, as perdas nos condutores são as mais críticas e podem ser obtidas de acordo com as expressões do livro de Collin (1992, p.178).

Entretanto, em algumas situações tais como as tratadas neste trabalho, nem sempre é possível obter um material dielétrico com as propriedades desejadas, e eventualmente as perdas no dielétrico dominam. O fator de qualidade pode, neste caso, ser aproximado pelo fator de qualidade do substrato dielétrico. O valor da tangente de perdas no substrato pode, então, ser obtida como sendo o inverso do fator de qualidade.

No caso de uma linha CPW convencional, a perda no substrato dielétrico, α_d , em dB/unidade de comprimento, pode ser obtida a partir da tangente de perdas de acordo com a eq. (5.5) (Collin, 1992; Hsieh et al., 2002):

$$\alpha_d = \frac{20\pi}{\ln 10} \frac{\epsilon_r}{(\epsilon_r - 1)} \frac{(\epsilon_{eff} - 1) \tan \delta}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \lambda_o}, \quad (5.5)$$

onde ϵ_r é a constante dielétrica relativa do substrato, ϵ_{eff} é constante dielétrica relativa efetiva e λ_o é o comprimento de onda no espaço livre. Numa linha CPW convencional, a fita condutora central e os semi-planos de terra laterais encontram-se sobre o substrato *bulk* dielétrico e acima delas existe ar; ϵ_{eff} depende de ϵ_r , da constante dielétrica relativa do ar (que é igual a 1) e da geometria da estrutura.

Quando um filme (fino ou espesso) de constante dielétrica ϵ_f é depositado sobre o circuito ressonador ilustrado na figura 67, a distribuição das linhas de campo elétrico é alterada pela presença do filme dielétrico, e ocorre uma série de alterações na resposta do ressonador, descritas a seguir. Na figura 68 encontra-se uma vista em perspectiva do ressonador linear CPW com uma camada de filme dielétrico, de espessura d , depositada sobre o mesmo. A seção transversal das extremidades do ressonador com filme depositado sobre o mesmo é igual à seção transversal das linhas OCPW apresentadas no capítulo 3. Os filmes de interesse são aqueles que possuem ϵ_f muito maiores (da ordem de 10 vezes) do que ϵ_r . Nesta estrutura, a fita condutora central e os semi-planos de terra laterais têm no plano inferior, o substrato *bulk* dielétrico com ϵ_r , e no plano superior, o filme dielétrico com ϵ_f . Parte do campo eletromagnético está contida no filme dielétrico, parte no substrato *bulk* e parte no ar. Utilizando-se um substrato *bulk* com perdas desprezíveis, é possível atribuir as perdas no dielétrico apenas ao filme. Medindo-se então, o fator de qualidade do ressonador é possível estimar a tangente de perdas do filme dielétrico.

A deposição do filme de elevada constante dielétrica sobre a estrutura provoca as seguintes alterações nas características do ressoador: eleva a constante dielétrica efetiva, diminui a impedância característica da linha, altera o fator de qualidade do ressoador e desloca a frequência de ressonância fundamental para valores menores.

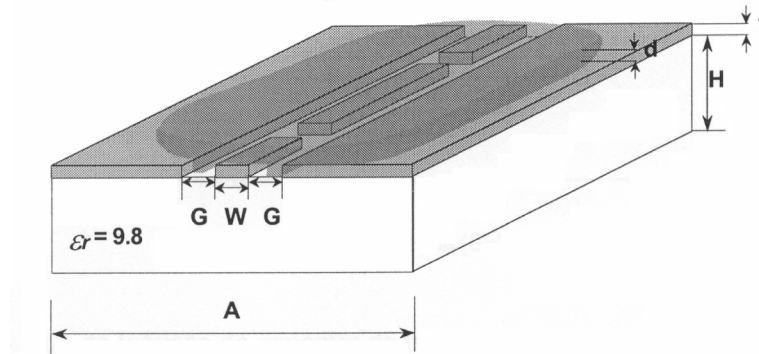


Figura 68 - Vista em perspectiva do ressoador linear CPW com uma camada de filme depositada sobre o mesmo.

O efeito da deposição de filmes dielétricos sobre o ressoador linear CPW pode ser diretamente percebida a partir da resposta em frequência da transmissão do ressoador, tal como pode ser observado a partir da figura 69. Nesta figura, são mostradas as curvas teóricas da transmissão do ressoador obtidas quando são depositados sobre ele filmes finos de $1\ \mu\text{m}$ de espessura com constantes dielétricas relativas iguais a 100, 200 e 300. Nesta figura encontra-se também a curva de transmissão do ressoador sem filme depositado. Observa-se a partir das curvas mostradas na figura que, à medida que a constante dielétrica aumenta, a frequência de ressonância fundamental diminui a partir do valor de 4.15 GHz.

Analogamente ao caso de um ressoador CPW sem filme depositado, a partir da medida da frequência de ressonância, f_{Rn} , do ressoador e do valor de S_{21} em f_{Rn} , é possível obter tanto a constante dielétrica efetiva da estrutura, ϵ_{eff} , quanto o fator de qualidade descarregado Q . No caso em que um filme de constante dielétrica relativa ϵ_f e tangente de perdas $\tan\delta$ é depositado sobre o ressoador, a constante dielétrica efetiva estará relacionada com a constante dielétrica relativa do filme e o fator de qualidade Q , à tangente de perdas do filme.

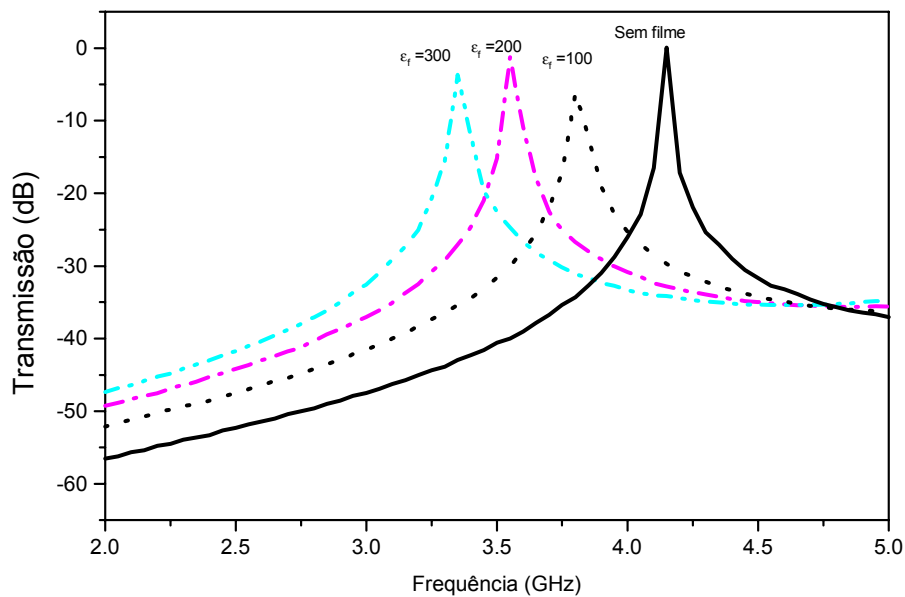


Figura 69 - Curvas teóricas do espectro de transmissão do ressonador linear CPW obtidas quando filmes finos de 1 μm de espessura com constante dielétrica relativa iguais a 100, 200 e 300 são depositados sobre o ressonador.

Para extrair o valor de ϵ_f a partir do valor de ϵ_{eff} obtido através da eq. (5.1), é necessário confrontar os resultados experimentais com os resultados teóricos de simulação. Através do aplicativo HFSS, é possível simular o comportamento do ressonador linear quando um determinado filme é depositado sobre o mesmo. Nesta análise, a geometria da estrutura e as características de todos os elementos (substrato de alumina, fita condutora central, espaçamento entre a fita condutora e os semi-planos de terra laterais, etc.) são definidas baseado nas características reais da estrutura. Quando todos os parâmetros do ressonador, incluindo a espessura do filme, são conhecidos, é possível determinar sua constante dielétrica relativa através da posição da frequência de ressonância fundamental do ressonador.

A fim de utilizar o circuito ressonador como uma ferramenta de medida da constante dielétrica de filmes dielétricos, diversas simulações foram feitas de modo a mapear a relação entre o valor da frequência de ressonância fundamental do ressonador e o valor de ϵ_f . Na figura 70 é mostrada a curva que relaciona o valor da frequência de ressonância fundamental ao correspondente valor de ϵ_f do filme, para filmes com espessuras variando de 20 μm a 120 μm . A partir deste gráfico,

torna-se possível determinar o valor de ϵ_f do filme através da medida do espectro de transmissão do ressoador e da determinação da frequência de ressonância fundamental. Estes resultados foram obtidos para o ressoador com as dimensões descritas anteriormente. É importante ressaltar que, caso sejam utilizados ressoadores com dimensões diferentes é necessário realizar novas simulações e obter suas respectivas curvas. Observa-se que, quanto maior o valor de G (que é o parâmetro que determina a impedância da linha), menor a inclinação das curvas. Neste caso, grandes variações no valor de ϵ_f acarretam pequenas variações no valor da frequência de ressonância fundamental e o uso do ressoador como ferramenta de medida de ϵ_f perde resolução.

A partir do gráfico da figura 70 observa-se que, quanto maior a constante dielétrica do filme, ou mais espesso o filme, menor a frequência de ressonância, ou seja, mais afastada de 4.15 GHz (situação sem filme) encontra-se a ressonância.

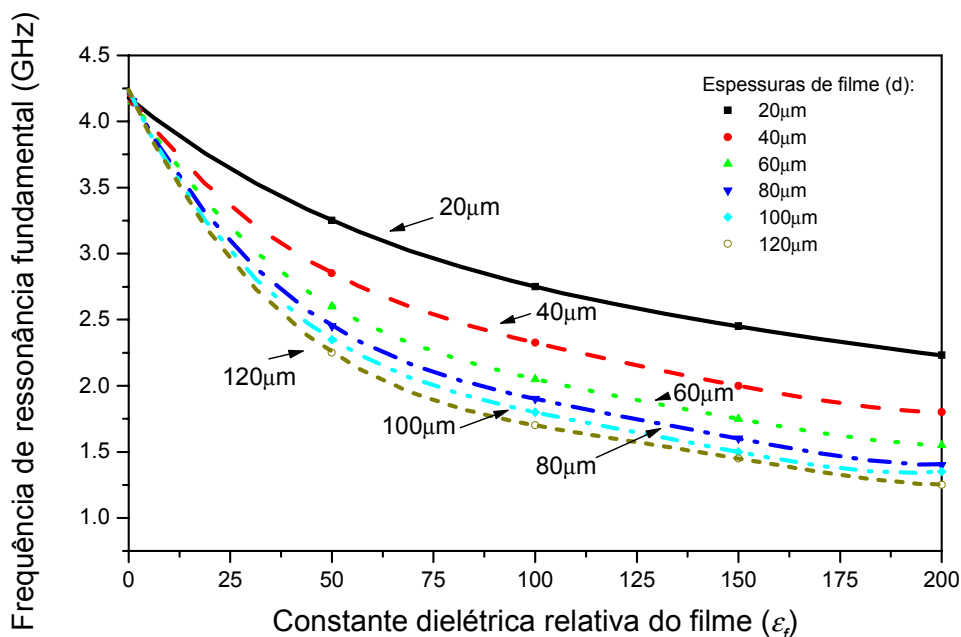


Figura 70 - Relação entre a frequência de ressonância fundamental e o valor da constante dielétrica relativa do filme depositado sobre o ressoador linear CPW para diferentes espessuras de filme.

De modo análogo, a tangente de perdas do filme pode ser obtida por comparação dos resultados medidos com os teóricos. Neste caso, diferentes valores para a $\tan\delta$ são analisados na simulação até encontrar o valor que gere uma curva de S_{21} com a mesma largura à meia altura que a curva de S_{21} medida. Entretanto, devido às imperfeições na montagem e nas conexões do circuito, os valores do fator de qualidade medidos são bem piores do que os respectivos valores previstos. Sendo assim, a forma mais adequada de se obter o valor da tangente de perdas é através da obtenção do fator de qualidade Q , de acordo com as equações (5.3) e (5.2), diretamente a partir dos resultados experimentais. No caso dos filmes utilizados, com perdas elevadas, é possível fazer a aproximação de que a tangente de perdas do filme é o inverso do fator de qualidade descarregado.

5.3. Realização prática dos circuitos passivos de microondas

Todos os circuitos em linha de transmissão planar, ressoadores e transformadores de impedância, implementados durante o desenvolvimento do presente trabalho foram confeccionados através de fotolitografia nas instalações do Laboratório de Semicondutores da PUC-Rio (LabSem) seguindo as etapas descritas a seguir.

O processo de fabricação de um circuito ressoador com filme consiste de sete passos: 1. dimensionar o circuito ressoador com o auxílio do aplicativo HFSS; 2. providenciar uma fotoferramenta (máscara) capaz de realizar o projeto (encomendado à FACTI-Fundação de Apoio ao CTI em São Paulo para circuitos com resolução superior a 50 μm , ou fotolito convencional para os demais casos); 3. realizar o processo de fotolitografia na sala limpa do LabSem (Maissel e Leon, 1970) utilizando os seguintes componentes: a fotoferramenta, um substrato de alumina metalizado (NiCr e Au) e a fotoresina; 4. realizar o ataque químico em cada uma das camadas metálicas (NiCr e Au) para definir a geometria do circuito; 5. cortar o substrato de alumina com serra diamantada para definir o tamanho do circuito; 6. depositar o filme a ser caracterizado sobre o ressoador; e 7. finalizar a montagem do circuito dentro de uma caixa metálica (preferencialmente de latão banhado a ouro) realizando as soldas, com fitas de ouro ou com EPOXY de prata, e colocando os conectores SMA.

O processo de fabricação de um transformador de impedância realizado na configuração OCPW é idêntico ao do circuito ressoador. Já o processo de fabricação do transformador de impedância na configuração QCPW, requer a deposição de uma camada metálica extra, acima do filme. Para isso, além das etapas 1. a 6. existem outras duas antes da finalização. Após a deposição do filme, uma camada de 100-200 nm de Ni (ou de Cr) deve ser depositada por *electron-beam*, e sobre a mesma, uma camada de ouro é depositada. Idealmente, a camada de ouro deve ter de 2 a 3 μm , e pode ser obtida por engrossamento eletrolítico. Para originar a geometria dos planos laterais os passos 2., 3. e 4. são repetidos, ou a técnica de *lift-off* pode ser utilizada. No caso da técnica de *lift-off* a fotogração é feita antes da metalização e a remoção do metal indesejado dispensa ataques químicos com ácidos (utiliza apenas acetona).

De modo a minimizar as perdas nos condutores, foram utilizados substratos de alumina (Al_2O_3) polida metalizados, com uma fina camada de aderência de 100-200 nm de NiCr e com uma camada condutora de 3 μm de ouro (a espessura deve ser superior à profundidade de penetração na camada de ouro, que é 1.7 μm em 2 GHz), adquiridos da empresa PICONICS INC. (USA). Essa alumina possui as especificações recomendadas por diversos autores (Hoffman et al., 1987, p. 43).

A etapa 6. do processo foi realizada em cooperação com outras instituições. Na próxima seção serão apresentados resultados experimentais obtidos utilizando-se os circuitos ressoadores fabricados e os filmes descritos no capítulo 4.

5.4. Resultados experimentais de medidas utilizando ressoadores

A transmissão (ou perda por inserção) do circuito ressoador foi obtida experimentalmente utilizando-se um Analisador de Redes HP 8720 (que opera de 0.5 a 20 GHz). Para isto, foram fabricados diversos circuitos ressoadores e seus respectivos espectros de transmissão foram medidos. Na figura 71 encontra-se um exemplo de circuito ressoador fabricado pronto para ser utilizado. O ressoador CPW, fabricado em substrato de alumina metalizado com ouro, foi montado dentro de uma caixa metálica apropriada, e aterrado à mesma, através de seus planos de terra laterais utilizando-se fios de ouro ou EPOXY de prata. A figura mostra que os contatos à fita condutora central foram feitos através de conectores SMA, os quais definem as duas portas do circuito.

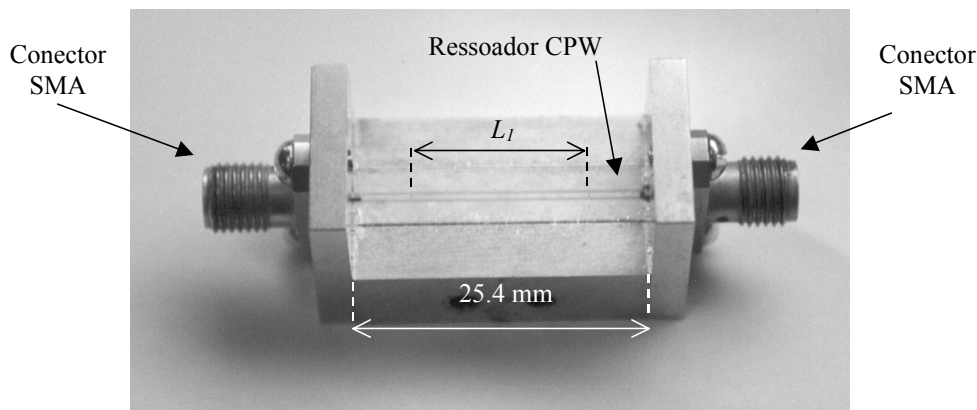


Figura 71 - Circuito ressoador linear CPW montado.

Na figura 72 encontram-se duas curvas obtidas experimentalmente do espectro de transmissão de dois circuitos fabricados. São mostrados nesta figura outros picos de ressonância, além do pico de ressonância fundamental. Como pode ser observado, as duas curvas se superpõem, indicando que tanto o processo de fabricação dos ressoadores CPW, quanto o de medição, são reproduzíveis. Tal como previsto teoricamente, a frequência de ressonância fundamental ocorre próximo de 4.2 GHz. O fator de qualidade carregado medido foi de 84.6, e o valor da transmissão (ou perda por inserção) na frequência de ressonância fundamental (f_{Rn}) foi de -10 dB, resultando num Q descarregado de 124. No caso de um ressoador CPW convencional, sem filme depositado sobre o mesmo, não é válido

afirmar que as perdas no substrato são dominantes, pois a tangente de perdas da alumina é da ordem 0.0001. Neste caso, as perdas nos condutores e as perdas associadas à configuração e à montagem são dominantes. O valor do fator de qualidade medido mostra que, estes circuitos ressoadores são adequados para caracterizar filmes que possuam tangente de perdas superior a 0.008.

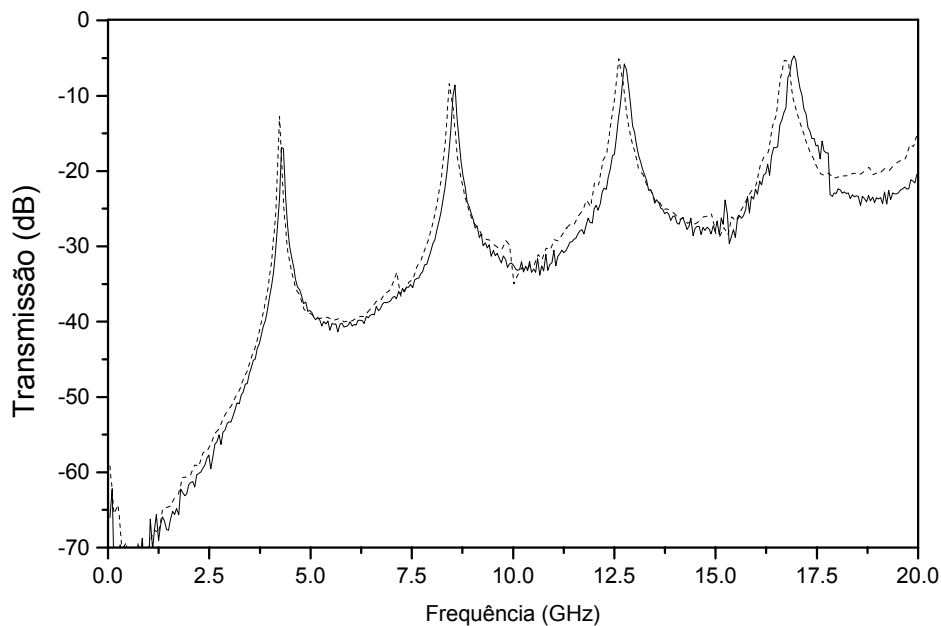


Figura 72 - Medida da transmissão para dois exemplares de ressoadores sem filme depositado.

Para caracterizar o filme dielétrico de interesse, basta depositá-lo sobre o circuito ressoador e medir o novo espectro de transmissão do circuito. Na figura 73 é mostrada uma foto com o circuito ressoador linear CPW com filme dielétrico depositado sobre o mesmo, pronto para ser medido.

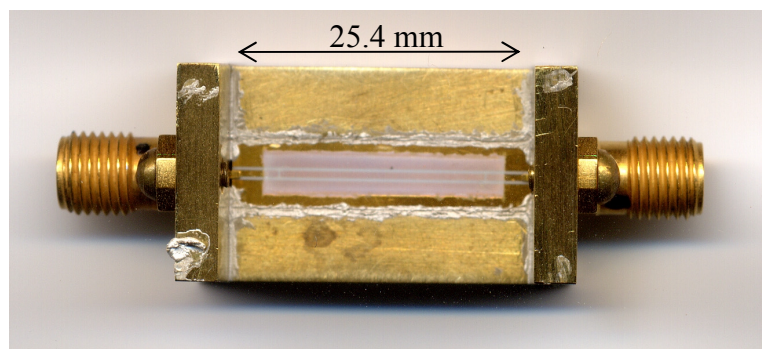


Figura 73 - Circuito ressoador linear CPW montado com filme dielétrico depositado.

Serão apresentados aqui, os resultados obtidos para os filmes de BTO e CCTO, e suas variações, que foram preparados na UFC e descritos na seção 4.3. Nas figuras 74 e 75 são mostrados, respectivamente, os espectros de transmissão obtidos experimentalmente para os filmes de CCTO e de BTO. Em cada uma das figuras é mostrado também o espectro de transmissão do circuito ressoador antes da deposição do filme dielétrico. Como pode ser observado a partir da figura 74, o espectro de transmissão do circuito recoberto com filme de CCTO sofreu um pequeno deslocamento para a esquerda em relação ao espectro obtido antes da deposição do filme. Isto indica que a constante dielétrica do filme de CCTO possui um valor não muito elevado. Consultando as curvas da figura 70, e sabendo-se que este filme possui 118 μm de espessura, observa-se que o valor da constante dielétrica é igual a 25, que é um valor baixo para os objetivos do presente trabalho. O espectro de transmissão medido mostra também que, os picos de ressonância praticamente não sofreram alargamento, indicando que o filme de CCTO introduziu poucas perdas no circuito. Medindo-se a largura à meia altura da transmissão correspondente à frequência de ressonância fundamental verifica-se que o fator de qualidade Q é da ordem de 75, o que corresponde a uma tangente de perdas do filme da ordem de 0.015, que seria um valor adequado para os objetivos desta tese.

Na figura 75 é mostrado o espectro de transmissão do circuito recoberto com filme de BTO com 99 μm de espessura. Diferentemente do espectro obtido no caso do CCTO, houve um grande afastamento entre os picos de ressonância do circuito com filme e sem filme depositado, indicando que a constante dielétrica do filme de BTO apresenta um valor elevado. Consultando novamente as curvas da figura 70, observa-se que o valor da constante dielétrica é igual a 160. Outra grande diferença com relação ao caso anterior é o grande alargamento dos picos de ressonância, que indicam uma grande degradação do fator de qualidade do ressoador ($Q=3.5$), em função das perdas elevadas associadas ao filme de BTO. A tangente de perdas deste filme de BTO é da ordem de 0.29.

Estes resultados mostraram então, que o filme de CCTO apresenta baixa perda e baixa constante dielétrica; enquanto que filme de BTO apresenta alta perda e alta constante dielétrica. Desta forma, nenhum dos dois filmes atende aos requisitos necessários para confeccionar os transformadores de impedância nas configurações OCPW ou QCPW, que são: baixa perda e alta constante dielétrica.

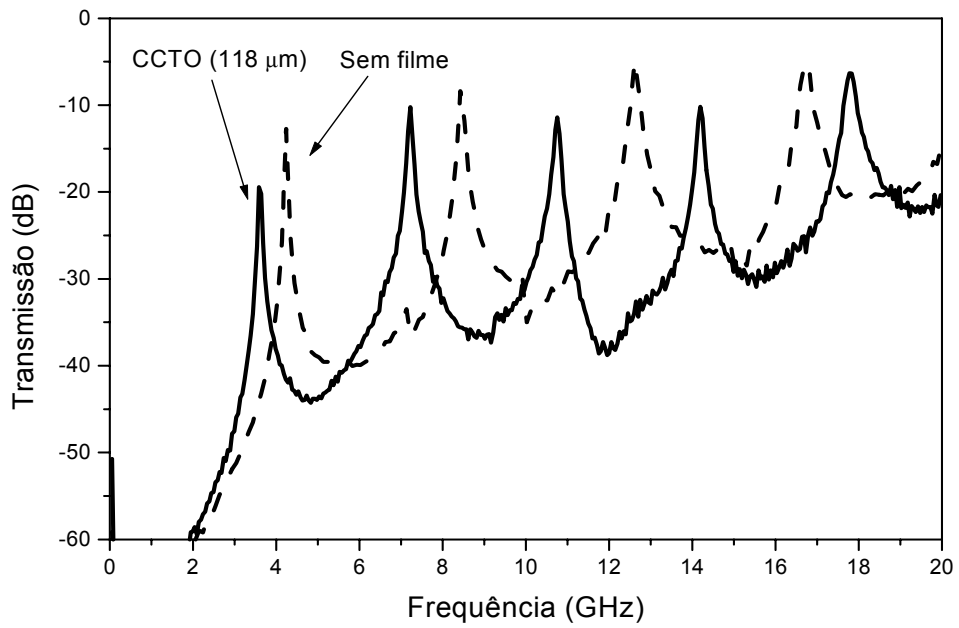


Figura 74 - Espectro de transmissão medido do circuito ressoador CPW, antes da deposição do filme (linha pontilhada) e depois da deposição do filme de CCTO de 118 μm de espessura (linha cheia).

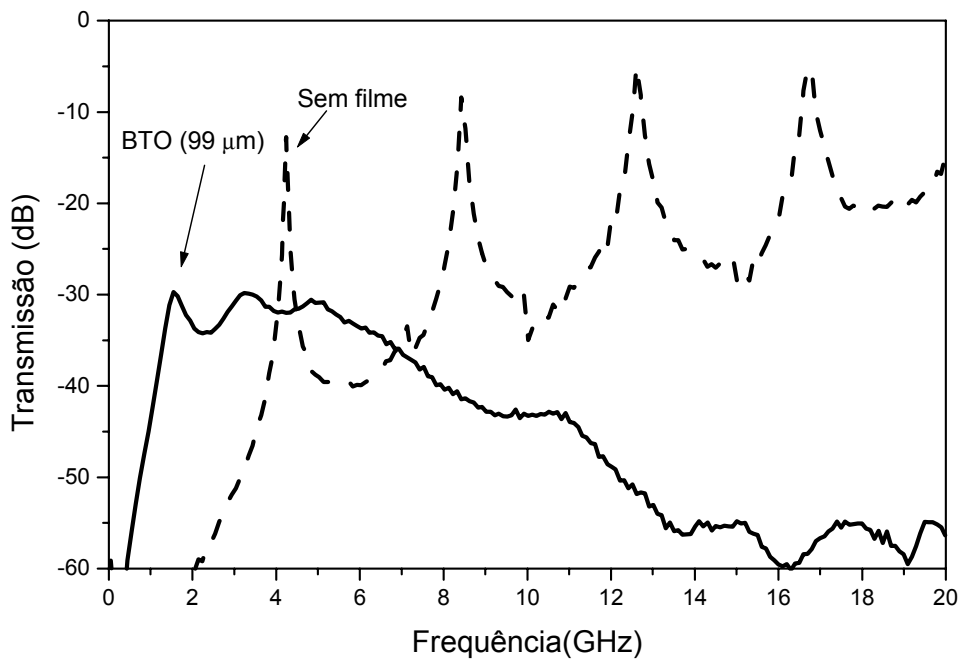


Figura 75 - Espectro de transmissão medido do circuito ressoador CPW, antes da deposição do filme (linha pontilhada) e depois da deposição do filme de BTO de 99 μm de espessura (linha cheia).

Foram fabricados e caracterizados diversos filmes de $\text{BTO}(x):\text{CCTO}(1-x)$, obtidos através da composição dos filmes de BTO com o de CCTO utilizando-se x igual a: 0.2, 0.5 e 0.8. Na figura 76 são mostrados os espectros de transmissão de vários circuitos ressoadores recobertos pelos diferentes filmes de $\text{BTO}(x):\text{CCTO}(1-x)$. Os filmes com x igual a 0.2, 0.5 e 0.8 possuem respectivamente os seguintes valores de espessura: 144 μm , 103 μm e 105 μm .

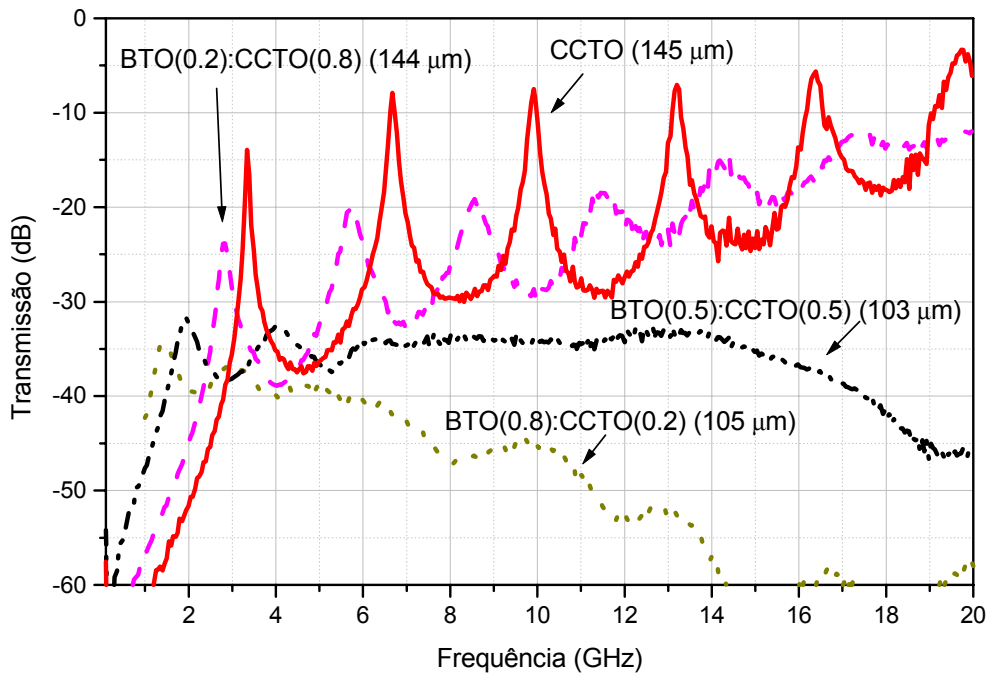


Figura 76 - Espectro de transmissão dos ressoadores CPW medidos com os seguintes filmes de $\text{BTO}(x):\text{CCTO}(1-x)$ depositados: $x=0$ com 145 μm de espessura, $x=0.2$ com 144 μm , $x=0.5$ com 103 μm e $x=0.8$ com 105 μm de espessura.

É possível observar a partir do gráfico da figura 76 que à medida que aumenta a concentração de BTO no composto, o pico de ressonância fundamental torna-se mais afastado de 4.15 GHz e a largura do pico aumenta. Isto significa que o aumento da concentração de BTO no composto torna os valores da constante dielétrica e das perdas mais elevados. Foram encontrados os seguintes valores para a constante dielétrica relativa e para a tangente de perdas destes filmes: para $x=0.2$, $\epsilon_f=27$ e $\tan\delta=0.078$; para $x=0.5$, $\epsilon_f=81$ e $\tan\delta=0.21$ e para $x=0.8$, $\epsilon_f=168$ e $\tan\delta=0.32$.

O gráfico da figura 77 mostra a relação entre a constante dielétrica relativa e o fator de qualidade para os filmes de BTO(x):CCTO(1-x), com x=0, 0.2, 0.5 e 0.8. Observa-se que o valor da constante dielétrica é inversamente proporcional ao valor do fator de qualidade. Isto significa que para se obter um valor de fator de qualidade superior a 20, necessariamente para estes filmes a constante dielétrica terá um valor inferior a 20.

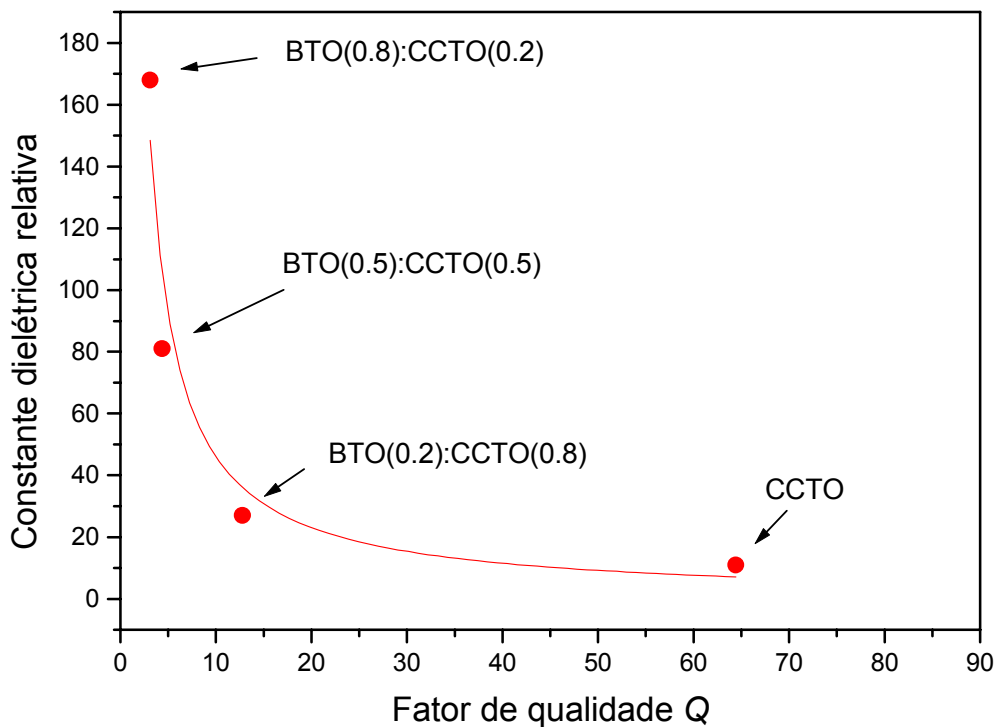


Figura 77 - Relação entre a constante dielétrica relativa e o fator de qualidade para os filmes de BTO(x):CCTO(1-x), com x=0, 0.2, 0.5 e 0.8.

A adição do CCTO ao filme de BTO fez com que o valor da constante dielétrica decrescesse muito, enquanto os níveis de perdas mantiveram-se ainda elevados. Conclui-se então, que com a adição de CCTO ao filme de BTO, não é possível diminuir suas perdas e simultaneamente manter elevado o valor da constante dielétrica. Faz-se necessário introduzir algum outro tipo de modificação no sentido de deslocar a curva de ϵ_f versus Q para longe da origem.

O valor da constante dielétrica do filme de BTO atende perfeitamente aos objetivos do presente trabalho, por isso foram feitas algumas tentativas no sentido

de diminuir o valor de suas perdas. Foram fabricados diversos filmes de BTO com o intuito de observar a reprodutibilidade dos valores encontrados para a constante dielétrica relativa e para a tangente de perdas. Na tabela a seguir encontram-se os dados obtidos para três filmes de BTO. Observa-se que o valor da constante dielétrica ficou entre 145 e 200 e que a tangente de perdas ficou entre 0.23 e 0.31. Convém ressaltar que o menor valor de perda foi aquele obtido para o filme menos espesso. Entretanto, a fabricação de filmes de BTO com espessura reduzida, utilizando-se a técnica empregada, não se mostrou adequada. Além disso, o valor de 0.23 para a tangente de perdas ainda está fora dos níveis desejados.

Espessura do filme (μm)	ϵ_r	$\tan\delta$
99	145	0.31
91	200	0.29
52	150	0.23

Tabela 4 - Resultados obtidos para três filmes de BTO.

Com o intuito de reduzir as perdas dos filmes de BTO para níveis aceitáveis, recorreu-se à técnica de dopagem sugerida pelo artigo de Weil et al. (2001b). Os filmes de BTO foram, então, dopados, com uma concentração de 1 % de impureza. Foram fabricados três filmes de BTO, cada um deles com um dos seguintes tipos de impurezas: Fe_2O_3 , GeO_2 e Nb_2O_5 . Na figura 78 encontram-se os espectros de transmissão para estes filmes. Todos os filmes dopados possuem 80 μm de espessura.

Comparando-se os valores das perdas para os filmes de BTO não dopados e dopados, não foi observada nenhuma tendência significativa de redução do valor da tangente de perdas com a introdução da dopagem. Os valores das tangentes de perdas para os filmes dopados com Fe_2O_3 , GeO_2 e Nb_2O_5 foram iguais respectivamente a: 0.22, 0.23 e 0.28, e os valores das respectivas constantes dielétricas iguais a: 200, 155 e 197. Tanto os valores das perdas quanto os da constante dielétrica dos filmes de BTO dopados encontram-se dentro da faixa de tolerância dos filmes de BTO não dopado. Comparando-se os filmes dopados uns com os outros observa-se que a dopagem com o filme de Fe_2O_3 foi a que apresentou perdas ligeiramente melhores, e ao mesmo tempo, apresentou um valor

da constante dielétrica ligeiramente maior. O objetivo de reduzir drasticamente o valor das perdas não foi alcançado com a dopagem realizada.

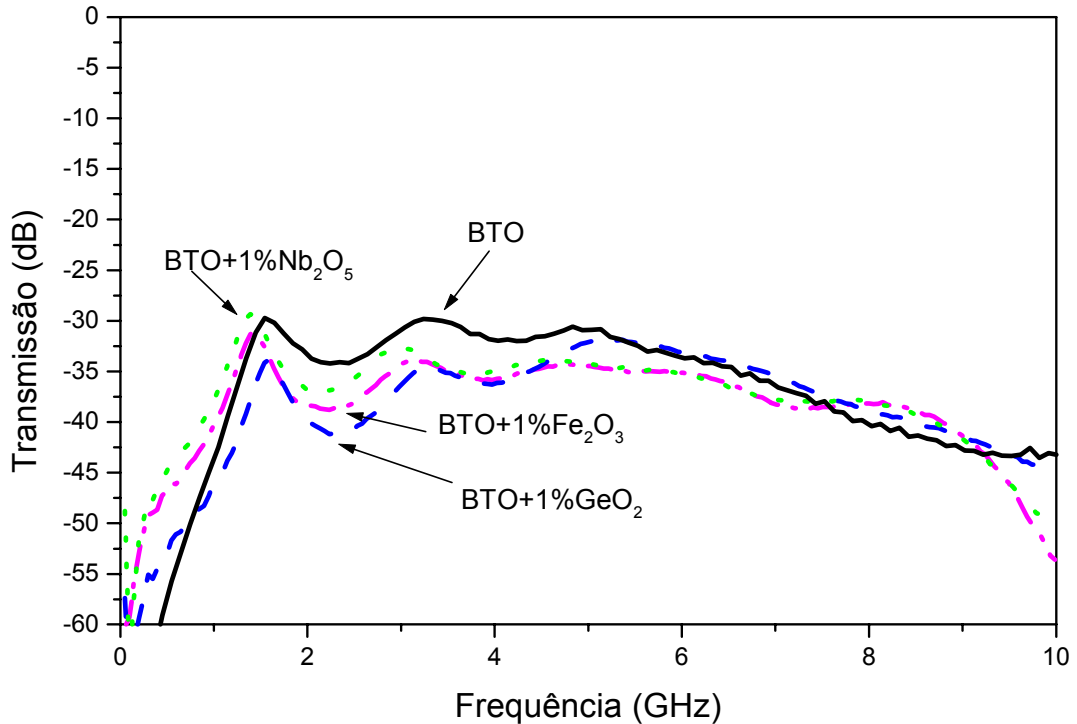


Figura 78 - Espectro de transmissão dos ressoadores CPW medido para os filmes de BTO com diferentes dopagens.

Outro recurso empregado com o intuito de reduzir as perdas foi o recozimento (*annealing*) dos filmes. Como mostra o trabalho de Van Keuls et al. (1999) é possível remover imperfeições de filmes de BaSrTiO₃ realizando o recozimento (*annealing*) do material. Os filmes de BTO, dopados e não dopados foram, então, submetidos a um tratamento térmico adicional. Não foi observada nenhuma tendência de redução das perdas com este recozimento.

Antes de encerrar esta seção é importante ressaltar que, comparando-se os valores obtidos para a constante dielétrica, e para as perdas, em baixa frequência com os respectivos valores obtidos em alta frequência observa-se que eles diferem bastante entre si.

No capítulo 4 (seção 4.3.2) foram apresentados o procedimento utilizado e os resultados obtidos das medidas em baixa frequência. Comparando-se estes resultados com os aqui apresentados, obtidos em alta frequência, podem ser feitas as seguintes observações. Na tabela 5 encontram-se os resultados obtidos experimentalmente em cada faixa de frequências. Em todos os casos, o valor da constante dielétrica diminuiu com o aumento da frequência. No caso do filme de BTO, o valor da constante dielétrica relativa, da ordem de 600 em 1 kHz, decresceu em alta frequência para 160. Para o filme de CCTO, este valor diminuiu de 400 para 25. No caso do filme composto de BTO(0.5):CCTO(0.5), o valor da constante dielétrica em alta frequência apresentou um valor intermediário (81) entre 160 (do BTO) e 25 (do CCTO). É interessante observar que em baixa frequência, este composto apresentou um valor bastante elevado para a constante dielétrica em relação aos valores obtidos para o BTO e para o CCTO, de 1304 (mais do que duas vezes superior aos valores obtidos para o BTO e para o CCTO). Para os filme de BTO e do composto, as perdas aumentaram com o aumento da frequência. Para o filme de BTO, que apresentou baixas perdas em 1 kHz ($\tan\delta=0.01$), as perdas aumentaram consideravelmente ($\tan\delta=0.29$) em alta frequência. No caso do filme composto de BTO(0.5):CCTO(0.5), o valor da tangente de perdas ficou em torno de 0.05 até 0.1 MHz, aumentando abruptamente até 1 MHz para 0.4 e decrescendo para 0.21 na faixa de microondas. Já para o filme de CCTO, o valor da tangente de perdas que oscila entre 0.15 e 0.32 na faixa de 0.1 kHz a 1 MHz, é reduzido drasticamente para 0.02 na faixa de microondas.

Filme	Medida em alta frequência (2 GHz)			Medida em baixa frequência (1 kHz)		
	Espessura (μm)	ϵ_f	$\tan\delta$	Espessura (μm)	ϵ_f	$\tan\delta$
BTO	99	160	0.29	142	592	0.01
BTO(0.5):CCTO(0.5)	103	81	0.21	135	1304	0.05
CCTO	118	25	0.02	147	403	0.31

Tabela 5 - Resultados obtidos experimentalmente em alta e baixa frequência.

Estes resultados mostraram que os valores da constante dielétrica e das perdas destes filmes em alta frequência diferem muito dos respectivos valores em baixa frequência. Isto explica a necessidade de caracterização dos filmes na faixa de frequências de interesse (faixa de microondas).

5.5. Validação da metodologia através da medida com linhas CPW

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através das medidas da perda por inserção e da perda de retorno de linhas de transmissão CPW recobertas com filmes de BTO. Estas medidas foram feitas com o intuito de confrontar e validar os resultados obtidos com a metodologia proposta utilizando os circuitos ressoadores, uma vez que não se dispunha de um filme padrão de referência.

A diferença entre as linhas CPW e os circuitos ressoadores é a inexistência de interrupções da fita condutora central ao longo do seu comprimento, que existem nos ressoadores. Tal como no caso dos ressoadores, as linhas CPW foram projetadas para terem impedância característica de 50Ω na ausência de filme dielétrico depositado sobre elas.

Através da medida da perda de retorno da linha CPW, é possível verificar o valor de sua impedância característica. Na figura 79 é mostrada a curva da perda de retorno em função da frequência obtida experimentalmente para uma linha CPW de 25 mm de comprimento. A cada múltiplo inteiro de meios comprimentos de onda ocorre um casamento de impedâncias perfeito, correspondendo aos pontos onde a perda de retorno foi melhor do que -30 dB. Os sucessivos pontos de máximos da curva correspondem a múltiplos inteiros de quartos de comprimento de onda. Nestes pontos, a impedância de entrada é igual ao quadrado da impedância característica da linha dividido pela impedância da carga (que neste caso é de 50Ω). Para obter o valor de -20 dB de perda de retorno observado na figura, o valor da impedância característica da linha é da ordem de 55Ω . Este valor também foi confirmado através de medidas de reflectometria no domínio do tempo.

A medida da perda por inserção de uma linha CPW de 50Ω permite a obtenção direta da atenuação causada pela inserção da linha de transmissão. Para descontar os efeitos das imperfeições da fabricação, e da montagem, foram medidas as perdas por inserção de duas linhas de transmissão CPW (Gupta et al., 1996). Foram fabricadas duas linhas CPW de seção transversal idênticas com comprimentos distintos, de 25.4 mm e 8 mm. A constante de atenuação dada em dB por unidade de comprimento foi, então, obtida como sendo a diferença dos valores das perdas por inserção de cada uma das duas linhas dividido pela diferença entre seus respectivos comprimentos.

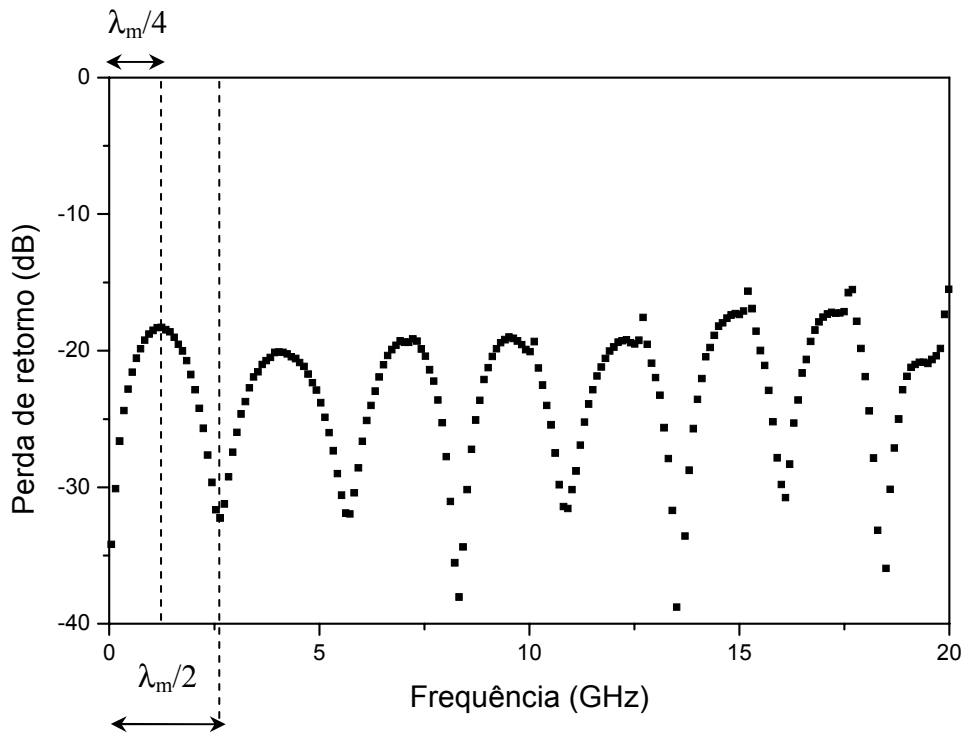


Figura 79 - Perda de retorno em função da frequência obtida experimentalmente para uma linha CPW de 25 mm de comprimento.

Na figura 80 encontram-se as curvas da perda por inserção das duas linhas de transmissão. É possível observar que ambas as linhas CPW introduziram uma perda por inserção bem baixa. Em 10 GHz a linha mais curta apresentou uma perda por inserção de 0.5 dB e a linha mais longa de 0.8 dB.

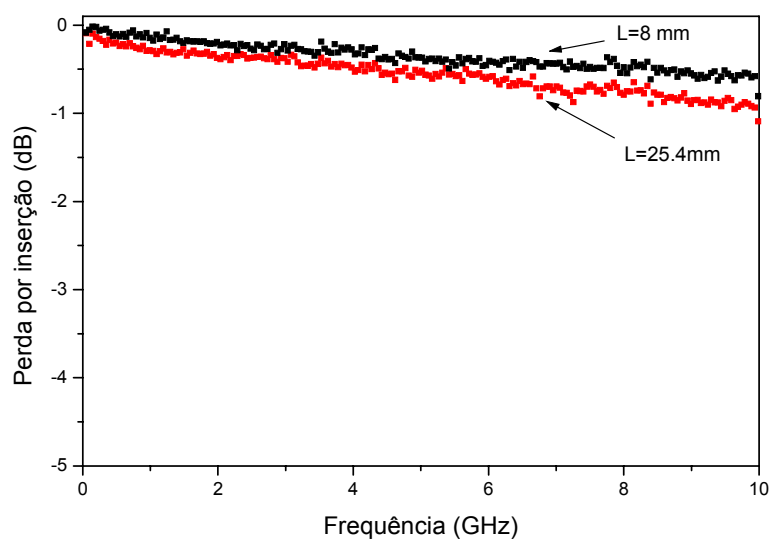


Figura 80 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimentalmente para as linhas CPW de 8 mm e 25 mm de comprimento.

Na figura 81 é mostrada a curva da constante de atenuação em dB/cm em função da frequência obtida através da diferença entre os valores das perdas por inserção de cada uma das duas linhas dividida pela diferença entre seus comprimentos. Como pode ser observado, quando não há filme depositado sobre a linha CPW, a atenuação causada pela linha é inferior a 0.25 dB/cm mesmo em 10 GHz.

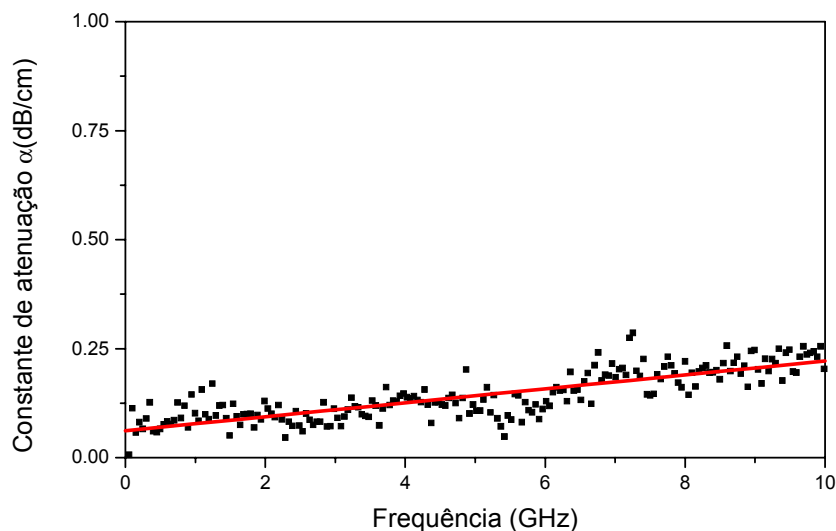


Figura 81 - Constante de atenuação em dB/cm em função da frequência obtida experimentalmente para a linha CPW fabricada.

Quando um filme de BTO de 61 μm de espessura é depositado sobre a linha CPW de 25.4 mm de comprimento as curvas da perda de retorno e da perda por inserção sofrem grandes modificações. Na figura 82 são mostradas as curvas da perda de retorno medida e simulada para este caso. Comparando-se as curvas medidas das figuras 79 e 82 observa-se que as perdas no filme dielétrico introduziram uma modulação (atenuação) na amplitude dos pontos de máximo da perda de retorno. Além disso, a deposição do filme tornou a constante dielétrica efetiva mais elevada e a impedância característica da linha CPW menor, tal como esperado. Com o aumento da constante dielétrica efetiva, o valor da frequência correspondente a meio comprimento de onda deslocou-se de 2.5 GHz para 1.4 GHz. Uma forma alternativa de se obter o valor da constante dielétrica do filme poderia ser através desta variação de frequência. Através do valor do

primeiro máximo da curva (perda de retorno da ordem de menos 5 dB) é possível verificar que a impedância característica da linha diminuiu para 25Ω .

Os resultados teóricos apresentados aqui foram obtidos através de simulação no domínio da frequência utilizando o aplicativo HFSS. Nesta simulação foi considerada uma linha CPW sobre substrato de alumina com as mesmas dimensões que as da linha em questão, e com um filme dielétrico depositado sobre a mesma com as seguintes características: espessura igual a $61 \mu\text{m}$, ϵ_r igual a 100 e tangente de perdas igual a 0.3. Os valores utilizados na simulação descrevem bem o comportamento obtido na prática e concordam com aqueles obtidos através das medidas com a técnica que utiliza os ressoadores lineares CPW.

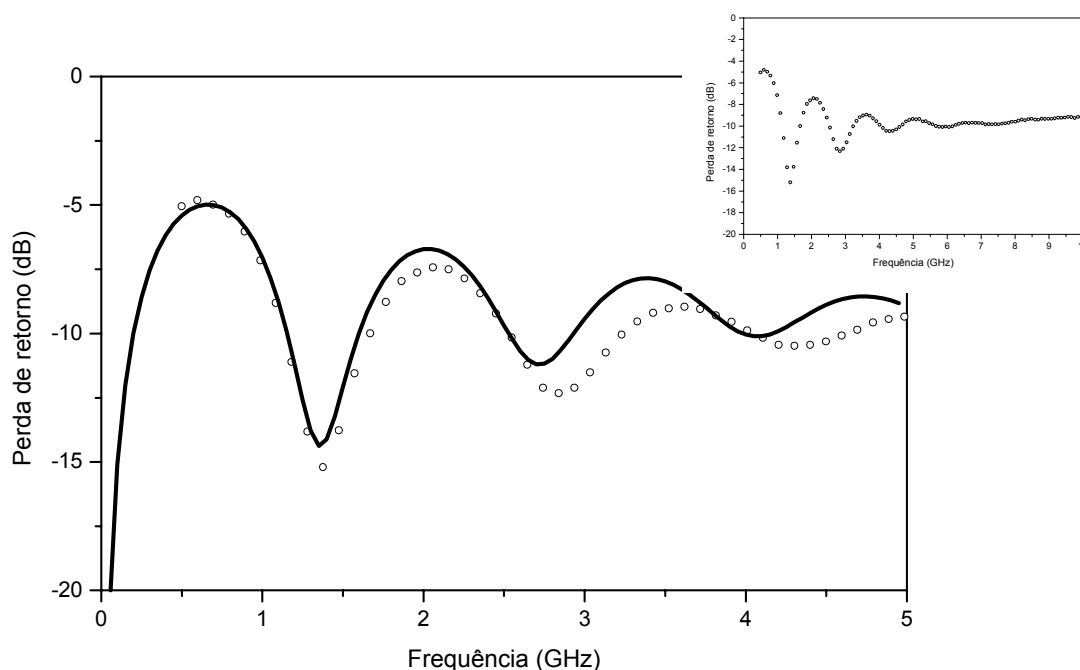


Figura 82 - Perda de retorno em função da frequência obtida experimental e teoricamente para uma linha CPW de 25.4 mm de comprimento com um filme de BTO de $61 \mu\text{m}$ de espessura depositado sobre ela.

Na figura 83 são mostradas as curvas da perda por inserção medida e simulada para a mesma linha CPW com filme de BTO depositado. Comparando-se as curvas das figuras 80 e 83 observa-se uma forte degradação da perda por inserção no caso da CPW com filme depositado. Já em 5 GHz a perda por inserção é de 15 dB, e em 10 GHz de 30 dB. Isto significa que toda a potência elétrica está sendo dissipada pelas perdas introduzidas pelo filme dielétrico. Comparando-se os resultados teóricos com os medidos, verifica-se, mais uma vez

que, os valores utilizados na simulação descrevem bem o comportamento obtido na prática.

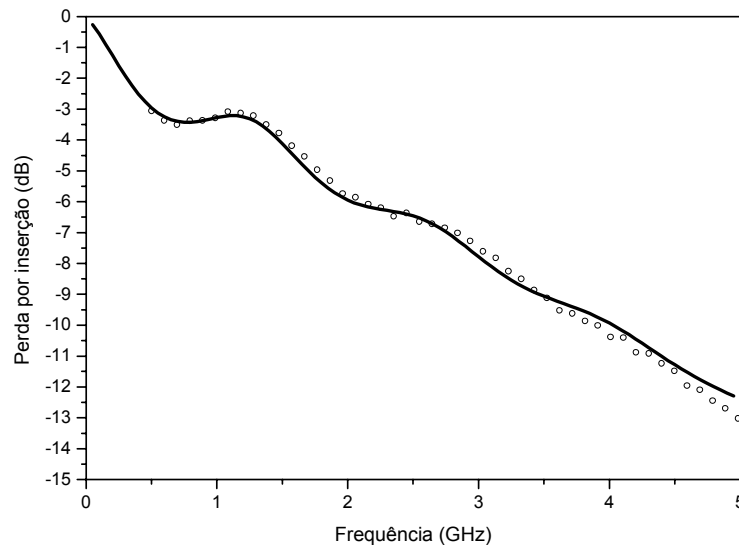


Figura 83 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimental e teoricamente para uma linha CPW de 25.4 mm de comprimento com um filme de BTO de 61 μ m de espessura depositado sobre ela.

Na figura 84 são mostradas as curvas da perda por inserção medidas de duas linhas CPW, de 25.4 mm e 8 mm de comprimento. Observa-se que mesmo para a linha de menor comprimento, a perda por inserção em 10 GHz é de 10 dB.

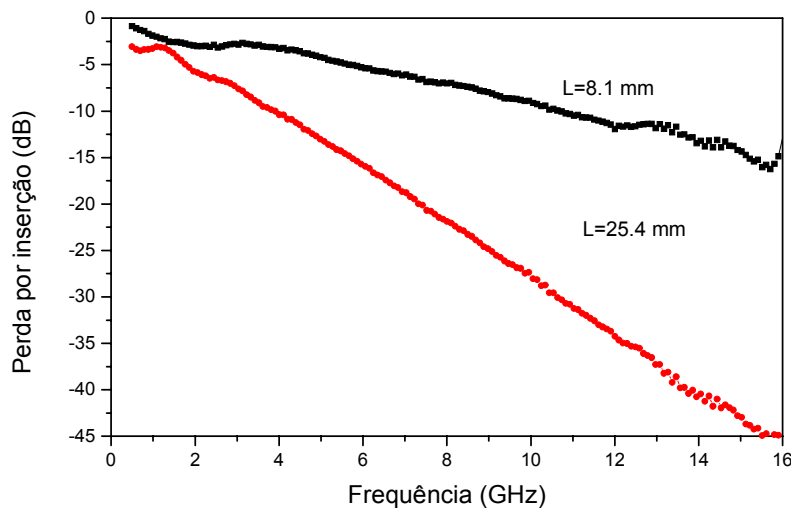


Figura 84 - Perda por inserção em função da frequência obtida experimentalmente para duas linhas CPW, de 8 mm e 25.4 mm de comprimento, recobertas com filme de BTO de 61 μ m de espessura.

Além das medidas da perda de retorno e da perda por inserção, foram realizadas, também com estas duas linhas CPW de comprimentos diferentes, medidas da sua resposta temporal a pulsos elétricos curtos de excitação.

O trem de pulsos elétricos curtos de tensão de 50 ps de duração foram obtidos associando-se ao gerador senoidal modelo HP83752B operando em 1 GHz, um diodo de recuperação SRD (*Step Recovery Diode*) modelo HP33005A. Com a montagem esquematizada pelo diagrama de blocos mostrado na figura 85 é possível gerar um trem pulsos de 50 ps de duração com uma taxa de repetição de 1 GHz. Uma pequena parte do sinal de 0 dBm do gerador senoidal é utilizada como *trigger* do osciloscópio digital modelo HP54120B, de 50 GHz de banda, e a maior parte do sinal é amplificada em 30 dB para alimentar o SRD.

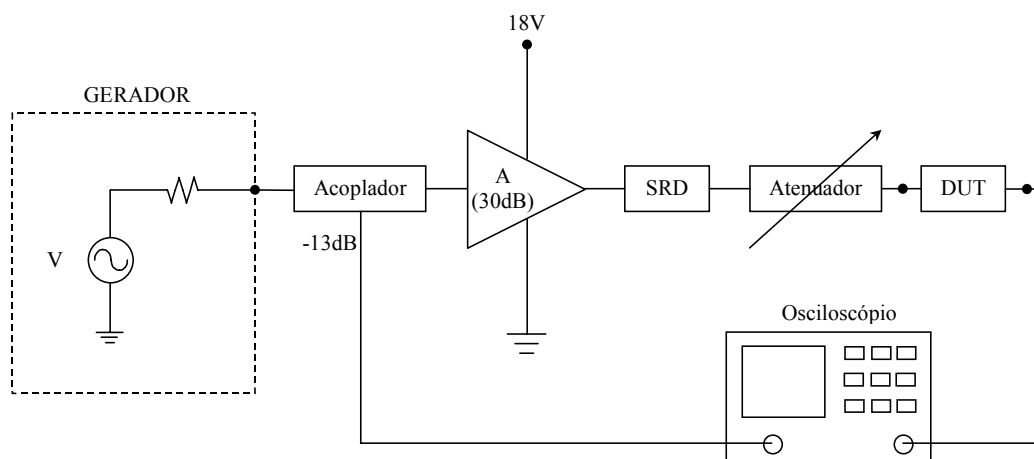


Figura 85 - Diagrama de blocos da montagem experimental utilizada para medir a resposta do DUT (*Device Under Test*) a pulsos elétricos curtos.

Para obter a resposta temporal das linhas CPW recobertas com filme, estes pulsos curtos foram introduzidos num dos lados da linha CPW, e coletados no outro lado. Os pulsos de tensão após atravessar a linha CPW de 25.4 mm de comprimento foram amostrados no osciloscópio e comparados ao caso no qual a conexão fora feita através da linha CPW de 8 mm.

A figura 86 mostra os pulsos de tensão em função do tempo observados no osciloscópio após atravessar cada uma das linhas CPW e para efeito de comparação foram incluídos os resultados das previsões teóricas.

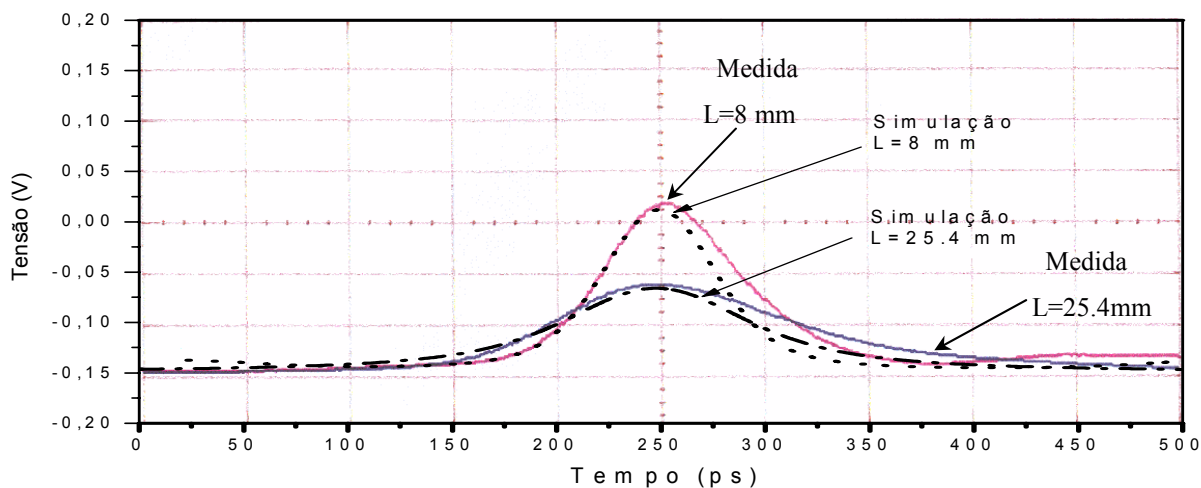


Figura 86 - Pulso de tensão em função do tempo após atravessar as linhas CPW de 8 mm e 25.4 mm, ambas com filme de BTO depositado sobre as mesmas. São mostradas também as respectivas previsões teóricas.

Observam-se a partir da figura 86 os efeitos de distorção da forma de onda dos pulsos curtos devido às perdas do filme. Os pulsos de entrada apresentavam uma forma Gaussiana, bem simétrica e com 50 ps de duração à meia altura, como pode ser observado a partir da figura 87.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116436/CB

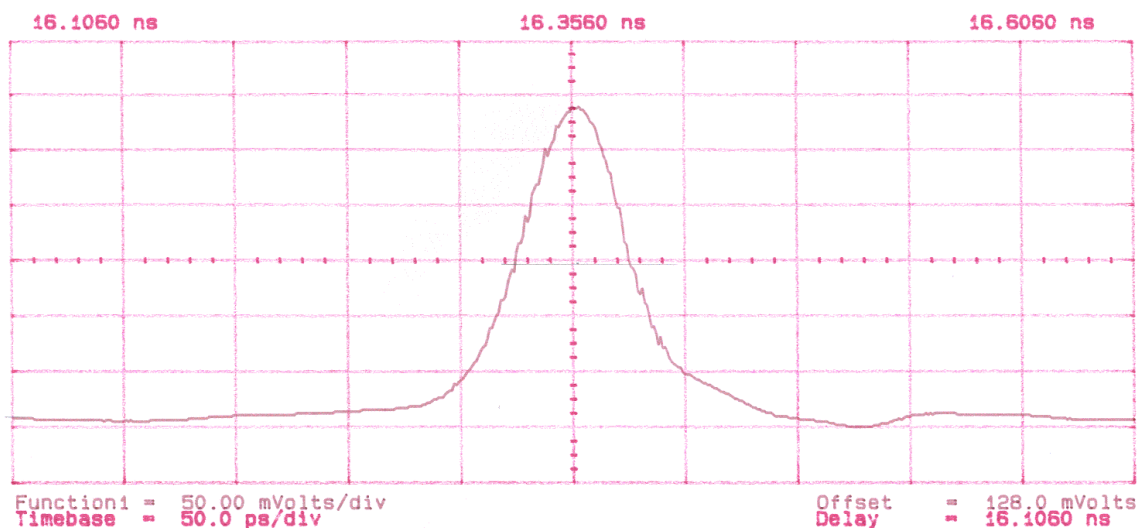


Figura 87 - Pulso de tensão de entrada.

A atenuação da amplitude do sinal de tensão e o aumento da sua duração, devidos às perdas, são mais acentuados na linha CPW mais longa. A amplitude do sinal correspondente à linha CPW de 8 mm diminuiu uma vez e meia em relação

ao sinal de tensão que seria obtido caso o filme não apresentasse perdas, e diminuiu mais de três vezes para o caso da linha CPW de 25.4 mm de comprimento. O pulso de tensão que originalmente tinha 50 ps de largura, após a linha mais curta ficou com aproximadamente 80 ps de largura, e após a linha mais longa ficou com 125 ps de largura.

Comparando-se os resultados obtidos experimentalmente com as simulações, que também estão mostradas na figura 86, é possível estimar os valores da constante dielétrica relativa e das perdas do filme de BTO. Mais uma vez, os valores obtidos para a constante dielétrica (125 ± 25) e a tangente de perdas (0.25 ± 0.05) foram confirmados.

5.6. Conclusões

Foram fabricados e caracterizados diversos filmes de $\text{BTO}(x):\text{CCTO}(1-x)$ com diferentes especificações. Os filmes de BTO apresentam constante dielétrica da ordem de 160 e tangente de perdas da ordem de 0.3. Nos melhores casos, a tangente de perdas reduz-se para 0.2, que ainda é um valor extremamente elevado.

A técnica utilizada para medir os valores da constante dielétrica e das perdas dos filmes na faixa de microondas dos filmes dielétricos foi desenvolvida especialmente para a presente tese. Esta técnica baseia-se na medida do espectro de transmissão de um ressoador linear CPW recoberto com o filme a ser caracterizado. Foram confeccionados diversos ressoadores e os diferentes filmes fabricados foram, então, caracterizados. A técnica desenvolvida proporciona grande simplicidade e rapidez na obtenção dos valores da constante dielétrica e da tangente de perdas. Além disso, ela permite a caracterização dos filmes em condições semelhantes às condições nas quais os filmes se encontrarão quando depositados sobre o TLT de interesse. Conforme visto no capítulo 4, as propriedades dielétricas dos filmes de elevada constante dielétrica diferem das propriedades do respectivo material *bulk*. E, para o mesmo filme, fabricado a partir da mesma técnica e sob as mesmas condições, ainda assim as propriedades dielétricas variam em função dos seguintes parâmetros: frequência de caracterização, espessura do filme e temperatura da caracterização. A semelhança entre as condições de caracterização dos filmes e as condições de utilização dos mesmos, é, portanto, fundamental.

A técnica proposta mostrou-se adequada para caracterizar filmes dielétricos espessos com constante dielétrica relativa variando de 20 a 200, e tangente de perdas variando entre 0.015 a 0.3. Esta técnica pode também ser empregada na caracterização de filmes dielétricos finos.

A fim de validar a metodologia proposta, os filmes dielétricos foram caracterizados utilizando-se também outros métodos. Os resultados experimentais obtidos através do procedimento proposto, utilizando-se os circuitos ressoadores CPW, concordaram com os resultados obtidos através das medidas no domínio do tempo e da frequência das linhas CPW.