

6

Realização prática de um TLT na configuração OCPW utilizando filme espesso de elevada constante dielétrica

6.1.Introdução

No capítulo 3 foram propostas duas novas configurações para realizar o transformador de impedância em linha de transmissão planar. Ambas apresentam um desempenho bem superior, em termos de dispersão e de aparecimento de modos de ordem superior, em comparação com a configuração CPW convencional realizada sobre substrato de elevada constante dielétrica. Além de apresentarem desempenho superior, as configurações propostas utilizam uma geometria da seção transversal bastante simples, e aproveitam os substratos convencionais, por exemplo, de alumina, amplamente utilizados em circuitos de microondas para os quais já existe toda uma tecnologia de fabricação bem estabelecida.

As duas configurações propostas, OCPW e QCPW, associam filmes dielétricos aos substratos convencionais de alumina. Os filmes dielétricos ideais para este fim são aqueles que possuem, na faixa de frequências de microondas e à temperatura ambiente, as seguintes características: elevada constante dielétrica, baixas perdas, boa compatibilidade química com metais (Ni, Cr, Au ou Pt) e com o substrato de alumina, e baixa susceptibilidade às variações de temperatura. Conforme tratado no capítulo 4, alguns filmes dielétricos atendem aos requisitos mencionados e poderiam ser utilizados para realizar as configurações propostas. Uma vez dominada a tecnologia de fabricação e deposição destes filmes dielétricos, as configurações propostas poderão ser implementadas sem grandes dificuldades.

Do ponto de vista de realização prática, a configuração OCPW não difere muito da configuração CPW convencional. Para realizar o TLT OCPW, apenas uma etapa adicional deve ser acrescentada ao processamento, que é a etapa de deposição do filme dielétrico com a espessura desejada.

A configuração QCPW, além de apresentar as mesmas vantagens em termos de desempenho que a configuração OCPW, proporciona ainda uma enorme flexibilidade na escolha dos valores das dimensões transversais dos TLTs, e permite, deste modo, realizar valores de impedância tão baixos quanto 3.5Ω . Apesar desta configuração ser superior às demais em termos de desempenho, sua realização prática é um pouco mais complexa, pois requer: uma maior precisão nos valores das dimensões transversais da estrutura durante a fabricação (principalmente quando são utilizados filmes finos); um número maior de etapas de processamento; e um filme com qualidade mecânica superior. Sobre a camada de filme dielétrico, devem ser depositados e processados os planos de terra da estrutura. Neste caso, a qualidade do filme dielétrico tem um papel fundamental. Rachaduras, fissuras, má aderência e variações na espessura do filme, que já eram indesejáveis na primeira configuração, são agora inaceitáveis. Devido à indisponibilidade de um filme dielétrico livre dos defeitos mencionados, a configuração QCPW não pôde ser avaliada experimentalmente. Na figura 88 encontra-se uma foto de um filme de BTO depositado sobre um circuito, onde é dado destaque ao problema de fissuras e rachaduras encontrados nos filmes disponíveis. Ao longo dos trabalhos de desenvolvimento dos filmes estes problemas foram sendo minimizados, mas ainda não foram completamente superados.

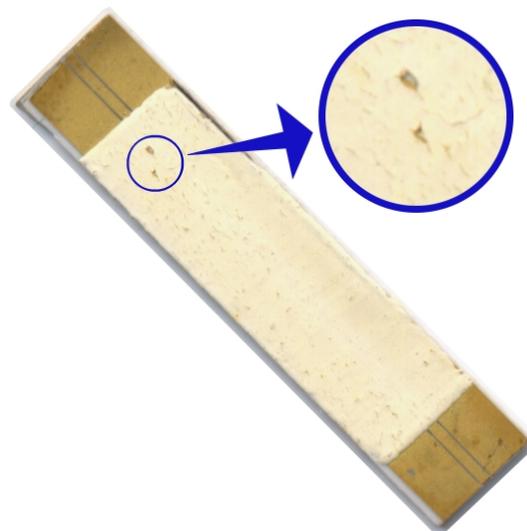


Figura 88 - Foto do filme de BTO depositado sobre um circuito, onde é dado destaque ao problema de fissuras e rachaduras dos filmes disponíveis.

Com os filmes de elevada constante dielétrica disponíveis, que foram os filmes de Titanato de Bário (BTO) desenvolvidos na UFC, foi possível apenas, implementar o TLT OCPW. Para isto, foi feito um projeto de um transformador em linha de transmissão planar exclusivamente dedicado às características (valor da constante dielétrica e espessura) do filme disponível. Evidentemente, no futuro, quando a tecnologia de fabricação dos filmes estiver dominada, os TLTs serão projetados em função das necessidades do sistema, e o filme desejado será fabricado com as características solicitadas.

Antes de projetar o TLT, a constante dielétrica e as perdas dos filmes, na faixa de microondas, foram medidas utilizando-se a técnica de caracterização de filmes dielétricos descrita no capítulo 5. Com os ressoadores lineares CPW fabricados, foi possível determinar que os filmes de BTO, com espessura variando entre 80 μm e 120 μm , apresentam uma constante dielétrica de 150 ± 50 e uma tangente de perdas da ordem de 0.3. Depois de caracterizar o filme, o TLT foi projetado considerando os valores nominais de espessura e constante dielétrica relativa (ϵ_f) do filme iguais, respectivamente, a 80 μm e 150.

Neste capítulo serão mostradas as medidas realizadas com o TLT implementado. Devido à grande dificuldade em se obter um filme com espessura e constante dielétrica iguais aos respectivos valores nominais para os quais o TLT fora projetado, foi feita uma análise teórica, que será mostrada na seção 6.2, para avaliar os efeitos da variação destes parâmetros na resposta do TLT.

Na seção 6.3 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente utilizando-se as estruturas fabricadas. Como será visto, o desempenho dos TLTs ficou bastante comprometido devido à não uniformidade da espessura e/ou do valor da constante dielétrica ao longo da estrutura, e devido, sobretudo, às elevadas perdas introduzidas pelo filme.

6.2. Análise de tolerância às características do filme

Devido a dificuldade em se obter um filme de BTO de espessura e constante dielétrica iguais aos respectivos valores nominais para os quais o TLT fora projetado, foi feita uma análise teórica no domínio da frequência para avaliar os efeitos da variação destes parâmetros na resposta do TLT.

Foi considerado nesta análise, um TLT OCPW capaz de adaptar uma impedância de 50Ω a uma carga de 7.2Ω . Para um filme dielétrico de $100 \mu\text{m}$ de espessura e $\epsilon_f=150$, o espaçamento entre a fita condutora central e os semi-planos de terra laterais variou gradativamente de $1135 \mu\text{m}$ (no lado de alta impedância) até $23 \mu\text{m}$ (no lado de baixa impedância).

As alterações no comportamento da perda de retorno deste TLT decorrentes das variações no valor de ϵ_f e no valor da espessura, em torno dos respectivos valores nominais, foram avaliadas. A influência da variação no valor da constante dielétrica do filme foi investigada considerando dois filmes com espessura nominal ($100 \mu\text{m}$): um com $\epsilon_f=100$ (33 % inferior ao valor nominal) e outro com $\epsilon_f=200$ (33 % superior ao valor nominal). A influência da variação no valor da espessura do filme foi investigada apenas para um caso, supondo um filme com $\epsilon_f=150$ (valor nominal) e com espessura de $70 \mu\text{m}$ (30 % inferior ao valor nominal).

A figura 89 mostra o comportamento da perda de retorno para as quatro situações analisadas: a linha cheia corresponde ao TLT com o filme desejado com os valores nominais de espessura ($100 \mu\text{m}$) e constante dielétrica relativa ($\epsilon_f=150$); a linha pontilhada correspondente ao caso em que $\epsilon_f=100$ e $d=100 \mu\text{m}$; a linha tracejada ao caso de $\epsilon_f=150$ e $d=70 \mu\text{m}$; e a linha tracejada interrompida por pontos corresponde ao caso de $\epsilon_f=200$ e $d=100 \mu\text{m}$.

Como pode ser observado pela figura 89, variações no valor da constante dielétrica e na espessura alteram o comportamento da perda de retorno, modificando a frequência de corte do TLT e degradando o valor da perda de retorno tolerada na banda. Para frequências inferiores a 3.5 GHz, uma redução na espessura de 30 % é equivalente a uma redução da constante dielétrica na mesma percentagem. Entretanto, a diminuição da espessura degradou menos a perda de retorno na banda, até 10 GHz, do que a diminuição da constante dielétrica.

Observa-se também que, conforme esperado, para um filme de constante dielétrica mais elevada, a frequência de corte desloca-se para valores menores, enquanto que para valores de constante dielétricas menores a frequência de corte desloca-se para valores maiores em relação ao valor da frequência de corte para a situação original.

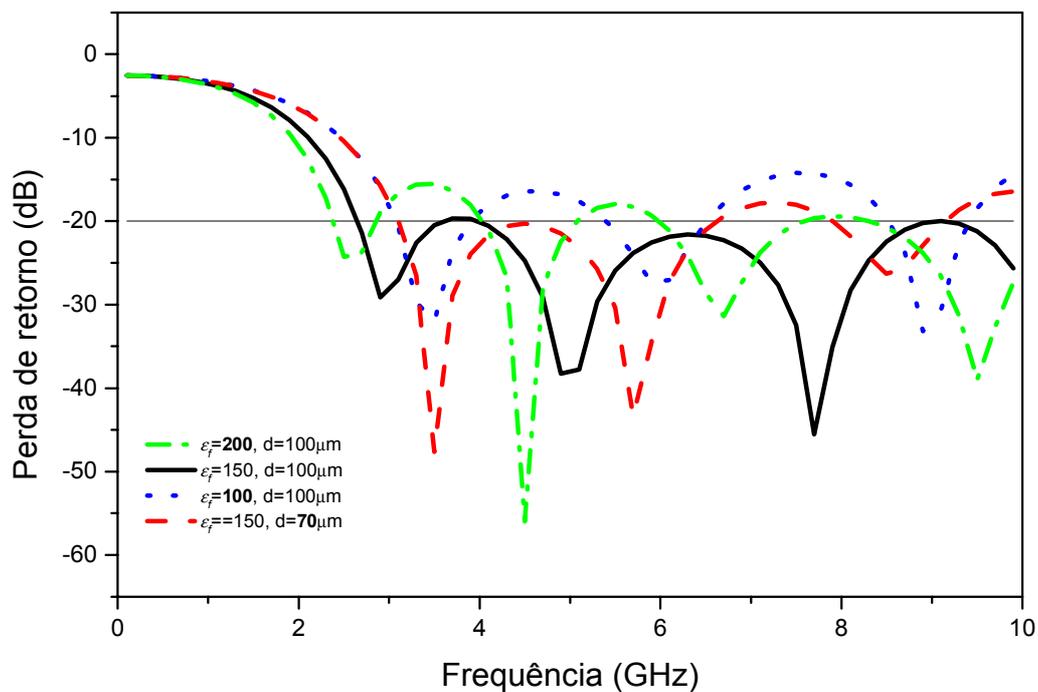


Figura 89 - Perda de retorno de um TLT OCPW para quatro filmes diferentes. A linha cheia corresponde a um filme dielétrico com valores nominais de $d=100\ \mu\text{m}$ e $\epsilon_r=150$.

Apesar de ocorrerem alterações no comportamento da perda de retorno do TLT quando se utiliza um filme fora das especificações, para uma variação na constante dielétrica de 30 % para mais ou para menos, ou para uma variação de 30 % para menos na espessura, o comportamento da perda de retorno manteve-se passa-alta e com uma tolerância na banda superior a 15 dB, até 10 GHz. Isto mostra que esta configuração é relativamente tolerante às variações da especificação do filme. É bom lembrar que na prática, poderão ocorrer simultaneamente, erros no valor da constante dielétrica e da espessura.

6.3.Caracterização do TLT implementado

Para caracterizar experimentalmente o TLT OCPW utilizando filme espesso de BTO ($\epsilon_f=150$) de 80 μm de espessura, foram fabricados e montados dois arranjos diferentes.

No primeiro arranjo, ilustrado na figura 90 foi fabricado um TLT *back-to-back*, de 20 mm de comprimento, montado em uma caixa metálica com conectores SMA de 50 Ω de ambos os lados. Na figura 90, do lado esquerdo, é mostrada uma foto da vista superior do TLT *back-to-back* já inserido na caixa metálica antes (TLT CPW) e após a deposição do filme dielétrico (TLT OCPW). Na figura 90, do lado direito, encontra-se uma foto da vista inferior das respectivas caixas, mostrando que ambas foram projetadas de modo a evitar a existência de um plano de terra na face inferior da alumina. O TLT CPW, fora da caixa metálica, fabricado no arranjo *back-to-back* antes da deposição do filme dielétrico é mostrado na figura 91.

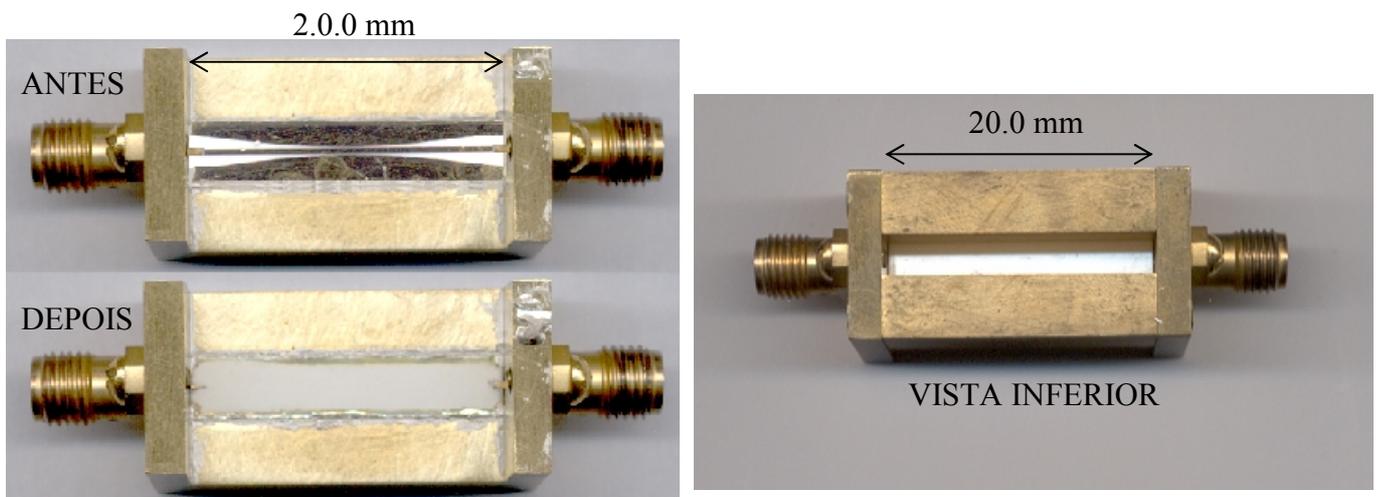


Figura 90 – Do lado esquerdo, foto da vista superior do TLT *back-to-back* inserido na caixa metálica antes e após a deposição do filme dielétrico. Do lado direito, foto da vista inferior da montagem.

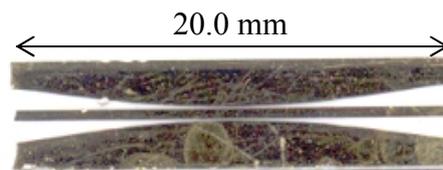


Figura 91 - TLT fabricado no arranjo *back-to-back* antes da deposição do filme dielétrico e da montagem final.

Como mostra a figura 91, neste arranjo, dois TLTs idênticos são montados de modo que a impedância vista pelas duas extremidades desta estrutura, cujo comprimento é igual a duas vezes o comprimento do TLT original, seja adequada para se conectar à impedância de 50Ω . A medida realizada com o TLT *back-to-back* dispensa, então, o uso de uma carga resistiva específica com resposta em frequência banda larga para terminar o TLT do lado de baixa impedância.

O TLT *back-to-back* foi utilizado para realizar as seguintes medidas: reflectometria no domínio do tempo (TDR), caracterização no domínio da frequência e resposta a pulsos elétricos curtos de excitação.

A medida de reflectometria no domínio do tempo (TDR) foi utilizada para verificar o nível de impedância ao longo da estrutura e é mostrada na seção 6.3.1. A caracterização no domínio da frequência foi feita através da medida da perda de retorno e da perda por inserção da estrutura, tal como mostrado na seção 6.3.2.

No segundo arranjo, esquematicamente ilustrado na figura 92, o TLT, de 10 mm de comprimento, foi montado em uma caixa metálica com um conector SMA do lado de 50Ω e o laser semiconductor do lado de baixa impedância. Este arranjo permite caracterizar a resposta óptica do laser a pulsos elétricos quando o mesmo é alimentado pelo TLT, e compará-la com a resposta do laser quando alimentado pelas formas convencionais (utilizando uma linha de transmissão de 50Ω ou uma carga resistiva de casamento de impedâncias), tal como discutido na seção 6.3.3.

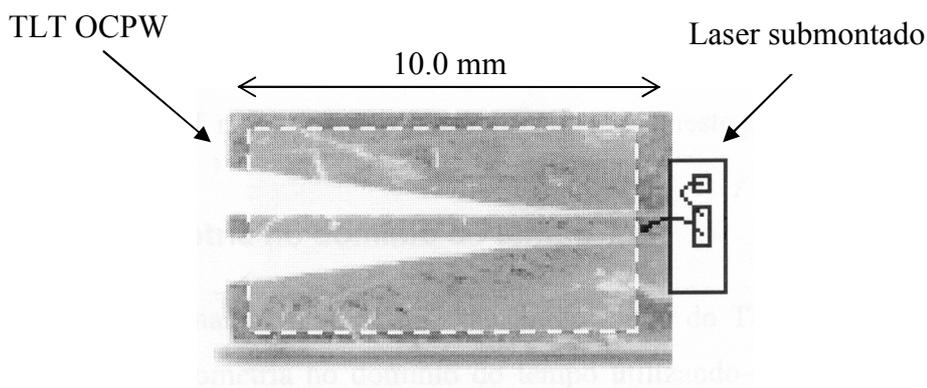


Figura 92 - Esquema da vista superior do TLT OCPW acoplado ao laser semiconductor submontado através de fios de ouro.

Em geral, num sistema de altas taxas serão encontrados lasers de alta velocidade operando em $1.55 \mu\text{m}$, com impedância resistiva da ordem de 5Ω e

com os parasitas associados à montagem desprezíveis. Entretanto, devido à dificuldade em adquirir um laser submontado com estas características, foi adotado como carga o único laser submontado disponível. Diferentemente do laser ideal, o laser disponível opera em $1.3 \mu\text{m}$ e sua impedância resistiva é da ordem de 9.5Ω , de acordo com a caracterização realizada (Tucker et al., 1983).

Por isso, o TLT implementado foi projetado para adaptar a impedância de 50Ω a uma carga puramente resistiva de 9.5Ω . Neste projeto, a seção transversal da fita condutora central foi mantida constante ao longo de todo o comprimento do TLT, sua largura (W) foi escolhida igual a $500 \mu\text{m}$ permitindo a utilização de conectores do tipo SMA disponíveis, e sua espessura de $3 \mu\text{m}$ corresponde às especificações da metalização dos substratos *bulk* de alumina ($\epsilon_r=9.8$ e $H=635 \mu\text{m}$) adquiridos da empresa PICONICS. O espaçamento (G) entre a fita condutora central e os semi-planos de terra laterais variou gradativamente de $1000 \mu\text{m}$ (no lado de alta impedância) até $50 \mu\text{m}$ (no lado de baixa impedância). A largura do TLT igual a 5 mm foi escolhida para viabilizar a deposição do filme dielétrico e o comprimento de 10 mm mostrou-se adequado, tanto ao seu manuseio quanto à sua eventual utilização em sistemas que possuam taxa de repetição da ordem de 2.5 Gbit/s , de acordo com as considerações de desempenho abordadas no capítulo 2.

As dimensões do TLT foram escolhidas, em função das características do filme disponível, e considerando, também, diversos aspectos de ordem prática a fim de viabilizar a execução do projeto com os meios e recursos disponíveis nas instalações da PUC-Rio. Sendo assim, os critérios de determinação das dimensões baseados no aparecimento de modos de ordem superior, e nas dimensões transversais do TLT reduzidas não foram considerados neste projeto.

6.3.1. Reflectometria no domínio do tempo

Para determinar o valor da impedância ao longo do TLT foram realizadas medidas de reflectometria no domínio do tempo utilizando-se um TDR modelo HP 1815B com diodo túnel (HP 1817A) de 25 ps de tempo de subida com resolução espacial de 1.2 mm . O TLT foi montado *back-to-back* de modo a se ter maior precisão no comportamento da impedância do TLT ao longo da estrutura. A figura 93 apresenta o traço observado na tela do TDR para um TLT *back-to-back*

implementado, onde é mostrado o comportamento da primeira metade do TLT *back-to-back*. O eixo das ordenadas corresponde ao coeficiente de reflexão e o das abscissas ao tempo. Neste traço observa-se um pico entre a linha de $50\ \Omega$ e o início do TLT. É possível demonstrar que este pico se deve a imperfeições nas conexões.

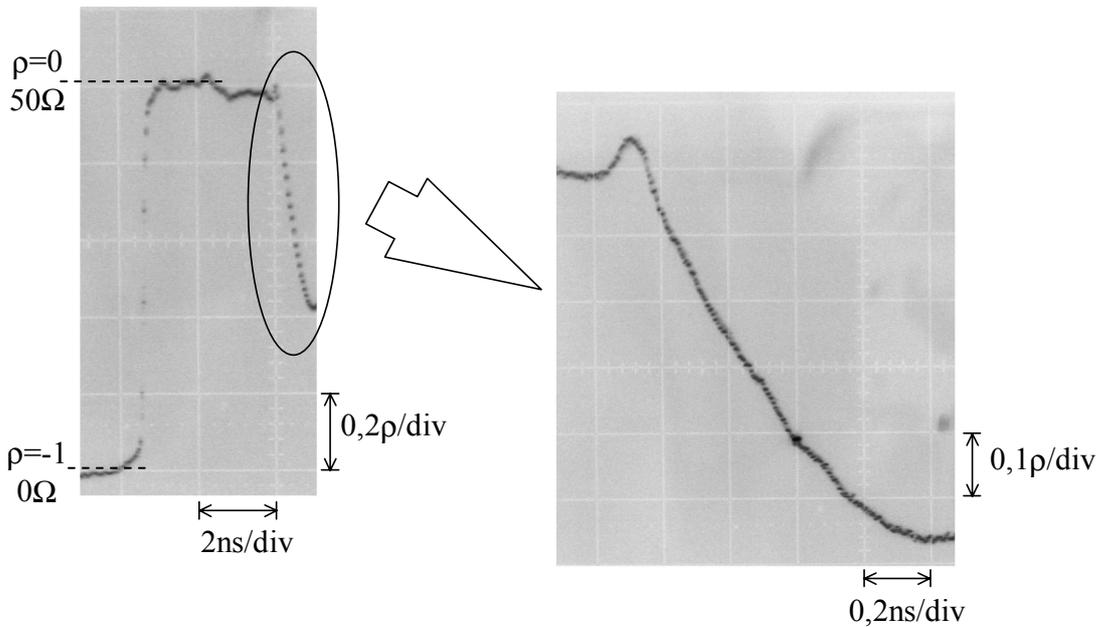


Figura 93 - Tela do TDR mostrando a variação do coeficiente de reflexão em função do tempo para o TLT B. O gráfico da direita mostra com mais detalhe o comportamento da primeira metade do TLT OCPW *back-to-back* implementado.

A impedância em cada ponto ao longo do TLT pode ser inferida a partir do coeficiente de reflexão do sinal medido, e a distância ao longo do comprimento do TLT pode ser obtida a partir do tempo que o pulso leva para retornar. É mostrada na figura 94 a variação da impedância do TLT, obtida a partir do traço do TDR, em função do seu comprimento para os TLTs A e B. Os TLTs A e B são idênticos, exceto pelos filmes dielétricos depositados. No TLT A, foi utilizado um filme de BTO com espessura nominal de $120\ \mu\text{m}$, e no TLT B um filme de BTO dopado com 1 % Germânio com espessura nominal de $83\ \mu\text{m}$. Para ambos os filmes, o valor nominal da constante dielétrica relativa é de 150.

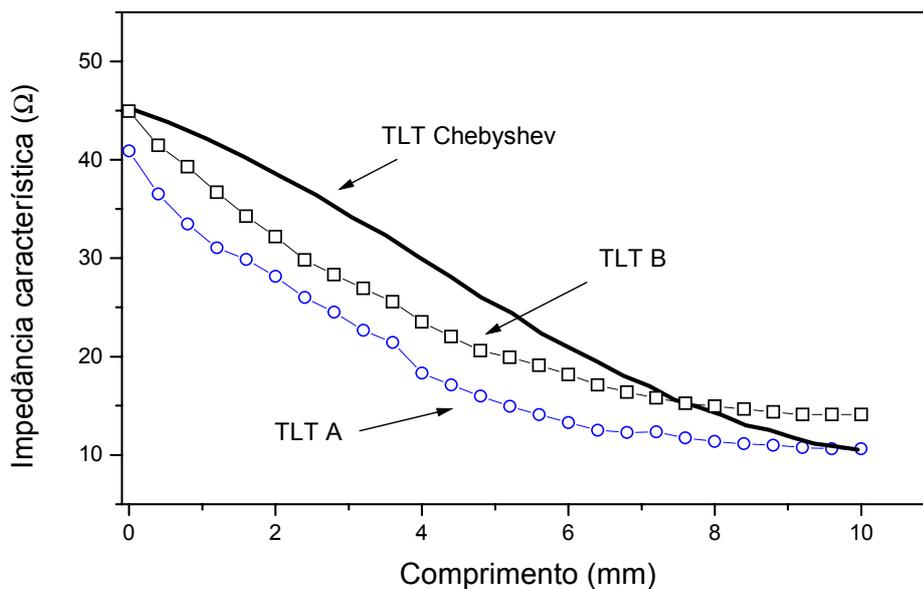


Figura 94 - Impedância ao longo do comprimento para os TLTs A e B. A linha cheia mostra os valores de impedância correspondentes ao TLT Chebyshev desejado.

A figura 94 mostra que, nos dois casos, a impedância característica decresceu gradualmente ao longo do comprimento, seguindo, porém, um comportamento diferente do perfil desejado para o TLT Chebyshev, que também é mostrado nesta figura. A variação da impedância do TLT A ao longo do mesmo não seguiu rigorosamente o comportamento desejado, mas o valor mínimo de impedância de 10.6 Ω , foi atingido. Para o TLT B, o valor mínimo de impedância obtido foi de 14 Ω .

A grande diferença entre os valores medidos, principalmente para o TLT A, e os valores previstos teoricamente correspondentes ao TLT Chebyshev é atribuída às variações na espessura do filme de BTO ao longo do seu comprimento e ao longo da seção transversal. Para que a impedância resulte menor do que o valor nominal, ou a constante dielétrica, ou a espessura do filme, são maiores do que os respectivos valores considerados nominais.

Esta discrepância não se deve às imperfeições das dimensões do TLT decorrentes do processo de fabricação. A figura 95 mostra os valores do espaçamento G entre a fita condutora central e os planos de terra laterais para o caso ideal e para três TLTs fabricados. Os valores de G foram medidos utilizando-se um medidor de perfil, e mostram que eles tendem a ser ligeiramente superiores

aos valores nominais. Isto significa que, se o filme atendesse exatamente às expectativas, os valores de impedância ao longo do TLT deveriam ser sempre superiores aos valores nominais, e não inferiores como mostra a curva do TLT A na figura 94.

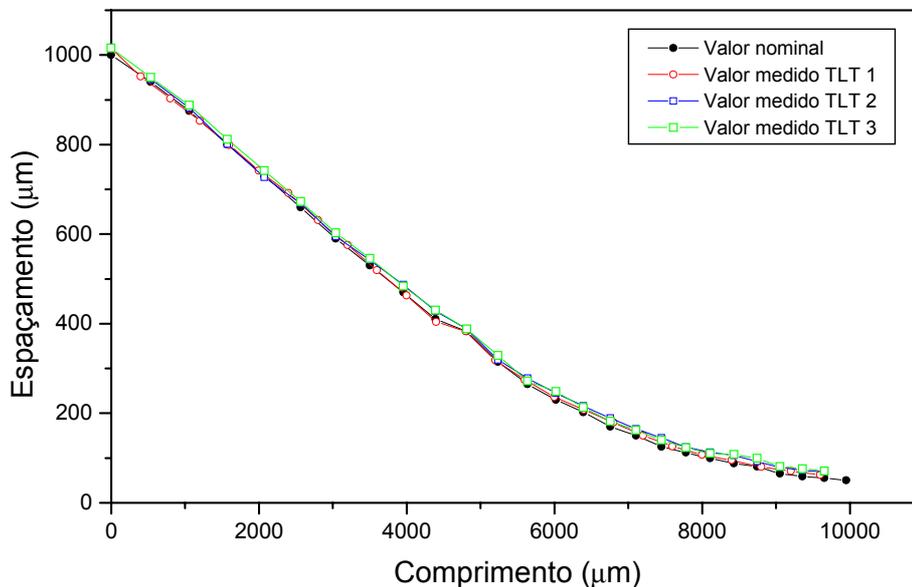


Figura 95 - Espaçoamento G entre a fita condutora central e os planos de terra laterais em função do comprimento do TLT para o TLT original e três TLTs fabricados.

Como pode ser observado a partir da figura 94, a variação da impedância não obedeceu ao comportamento previsto teoricamente, e portanto a resposta em frequência do respectivo TLT não corresponde a de um TLT Chebyshev.

Para demonstrar isto, foi feita uma simulação no domínio da frequência considerando a variação de impedância medida para o TLT A, conforme mostrado na figura 94. Nesta simulação não foram considerados os efeitos da dispersão, nem do aparecimento de modos de ordem superior e as perdas foram consideradas nulas. Na figura 96, encontram-se os resultados desta simulação para a perda de retorno e para a perda por inserção. Para cada curva é mostrada também a resposta desejada para este TLT *back-to-back*, caso a variação de impedância seguisse o comportamento correspondente ao de um TLT Chebyshev.

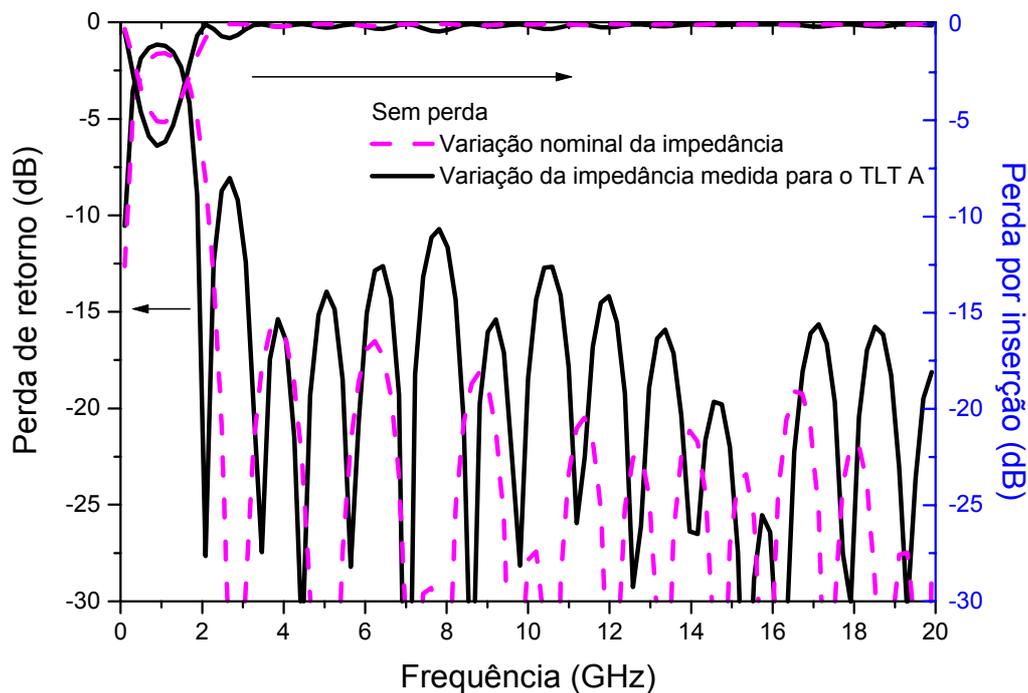


Figura 96 - Perda de retorno e perda por inserção simuladas para o TLT *back-to-back* A considerado sem perdas. A linha tracejada corresponde à resposta desejada, e a linha cheia corresponde ao TLT A cuja variação da impedância ao longo do TLT é mostrada na figura 94.

Conforme esperado, a resposta em frequência do TLT A não apresenta o comportamento Chebyshev desejado, e o mesmo vale para o TLT B. Ainda assim, se o filme não apresentasse perdas, o TLT fabricado possuiria uma resposta em frequência passa-alta aceitável. Entretanto, como mostrado na seção seguinte, não é possível desconsiderar as perdas deste TLT, que por serem muito elevadas modificam ainda mais a resposta em frequência. Finalmente, observando-se a figura 96, verifica-se que a perda de retorno é muito mais sensível à variação do perfil de impedância do que a perda por inserção.

6.3.2. Caracterização do TLT no domínio da frequência

A caracterização experimental do TLT no domínio da frequência, através da medida de seus parâmetros S, foi feita utilizando-se o TLT *back-to-back*, que possui 50 Ω de impedância nas suas duas portas, e por isso, pode ser diretamente conectado ao Analisador de Rede (*Network Analyser*).

A perda de retorno na entrada e a perda por inserção do TLT *back-to-back* foram obtidas com o Analisador de Rede (*Network Analyser*) HP87120, na faixa de 500 MHz a 10 GHz. Os resultados experimentais das medidas da perda de retorno e da perda por inserção são mostrados, respectivamente, nas figuras 97 e 98, para o TLT A. Observa-se a partir da curva da perda por inserção que as perdas deste filme são extremamente elevadas, e isto se reflete na curva da perda de retorno através do desaparecimento dos vários lóbulos esperados.

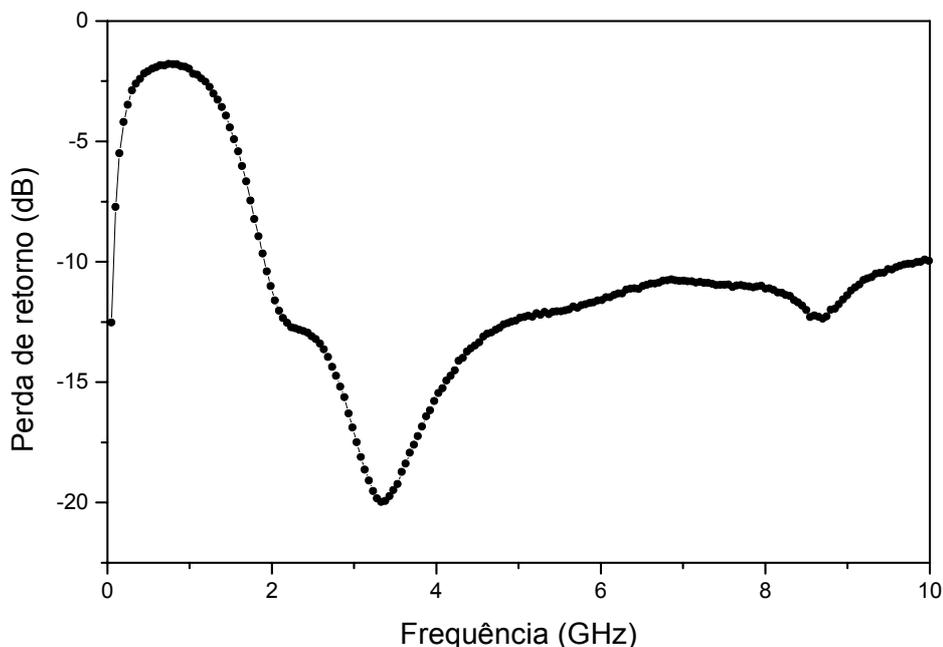


Figura 97 - Perda de retorno em função da frequência para o TLT *back-to-back* A.

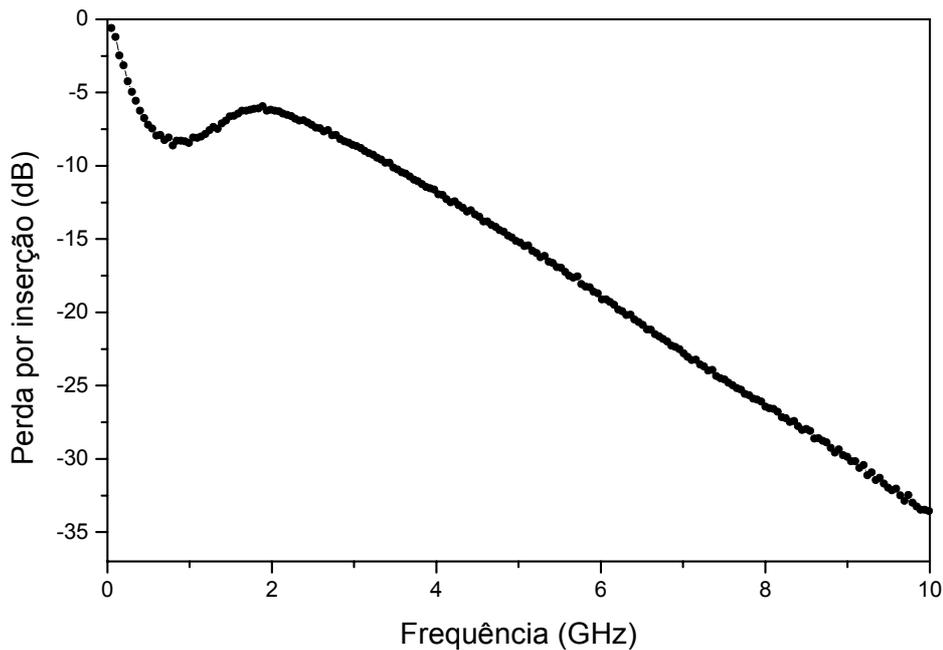


Figura 98 - Perda por inserção em função da frequência para o TLT *back-to-back* A.

Os resultados experimentais das medidas da perda de retorno e da perda por inserção para o TLT B são mostrados, respectivamente, nas figuras 99 e 100. São mostradas nestas figuras as perdas de retorno e as perdas por inserção medidas para o TLT B, tanto na entrada (pela porta 1 do Network Analyser), quanto na saída (pela porta 2 do Network Analyser). Observa-se a partir da figura 99 que, apesar do TLT *back-to-back* ter sido projetado para ser uma estrutura simétrica, as medidas da perda de retorno na entrada e na saída mostram uma grande assimetria da estrutura. Isto indica que a medida da perda de retorno é muito sensível à montagem e que, provavelmente, o filme depositado não apresenta características uniformes ao longo de todo o comprimento do TLT *back-to-back*. As medidas indicam, ainda, o aparecimento de modos de ordem superior para frequências bem mais baixas do que o previsto teoricamente. De acordo com as previsões teóricas apresentadas no capítulo 3, os modos de ordem superior deveriam aparecer em torno de 12 GHz. Entretanto, como mostra a figura 99, para o TLT B, isto ocorreu já em 8 GHz.

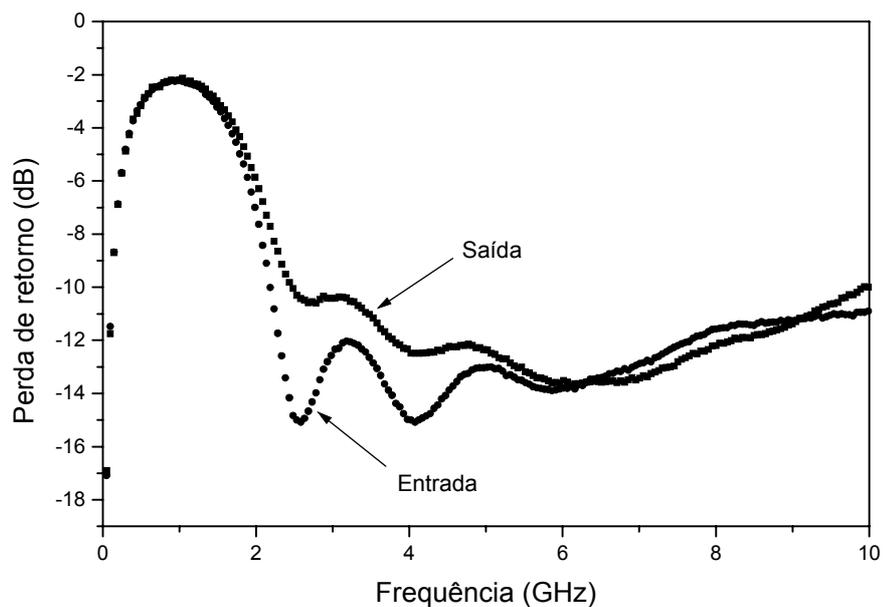


Figura 99 - Perda de retorno em função da frequência para o TLT *back-to-back* B medida pela entrada e pela saída do TLT.

Na figura 100 são mostrados os resultados das medidas da transmissão do TLT *back-to-back* B da porta 1 para a porta 2 e da porta 2 para a porta 1. Diferentemente da figura 99, tais medidas não indicam uma assimetria da estrutura.

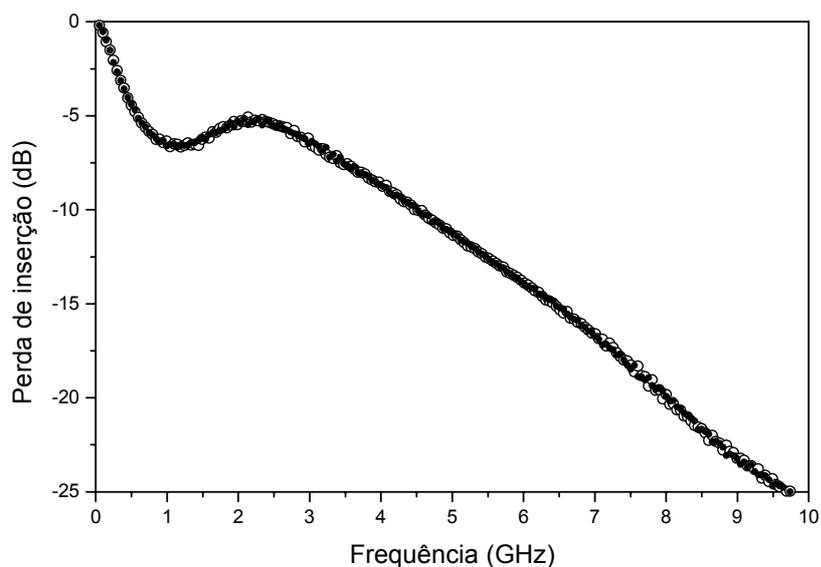


Figura 100 - Perda de inserção em função da frequência para o TLT *back-to-back* B.

Comparando-se os resultados experimentais obtidos para os TLT A, mostrados nas figuras 97 e 98, com os resultados obtidos para o TLT B, mostrados nas figuras 99 e 100, observa-se que o TLT B apresentou menos perdas. A perda por inserção do TLT *back-to-back* B ficou aproximadamente 4 dB menor do que a do TLT A. Mas mesmo assim, em 5 GHz, por exemplo, observa-se para o TLT B uma perda tão elevada quanto 11 dB. A diminuição da perda permitiu apenas o aparecimento de alguns lóbulos da curva da perda de retorno do TLT B, que não apareceram para o TLT A.

Nas figuras 101 e 102 são mostrados os resultados experimentais para os TLT *back-to-back* B e C. O TLT B, já descrito anteriormente, utilizou um filme de BTO dopado com 1 % Germânio com espessura de 83 μm , constante dielétrica relativa da ordem de 150 e tangente de perdas igual a 0.23. O TLT C, por sua vez, utilizou um filme de BTO dopado com 1 % de Ferro, que de acordo com os resultados das medidas apresentadas no capítulo 5, sua constante dielétrica relativa é da ordem de 200 e sua tangente de perdas da ordem de 0.22. Foi depositado sobre o TLT C uma camada de apenas 48 μm de espessura. Comparando-se as respostas dos dois TLTs obtidos a partir dos dois filmes de BTO dopados, observa-se que o TLT fabricado com o filme dopado com germânio produziu melhores resultados do que o TLT que utilizou o filme de BTO dopado com ferro. Comparando-se as curvas da perda de retorno, mostradas na figura 101, para os TLT B e C, observa-se que o comportamento do TLT C difere do comportamento do TLT B. De fato, ambos os TLTs possuem filmes com constante dielétrica diferentes e com espessura distintas. A partir das curvas da perda por inserção mostradas na figura 102, observa-se que o TLT C apresenta perdas da ordem de 2 dB mais elevadas do que o TLT B.

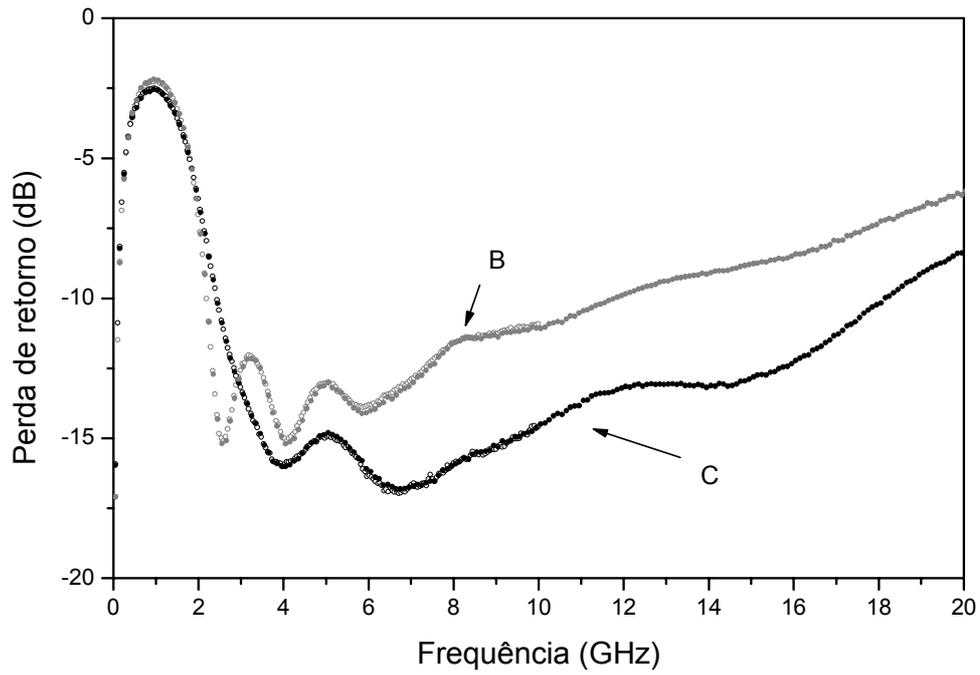


Figura 101 - Perda de retorno medida em função da frequência para os TLTs *back-to-back* B e C.

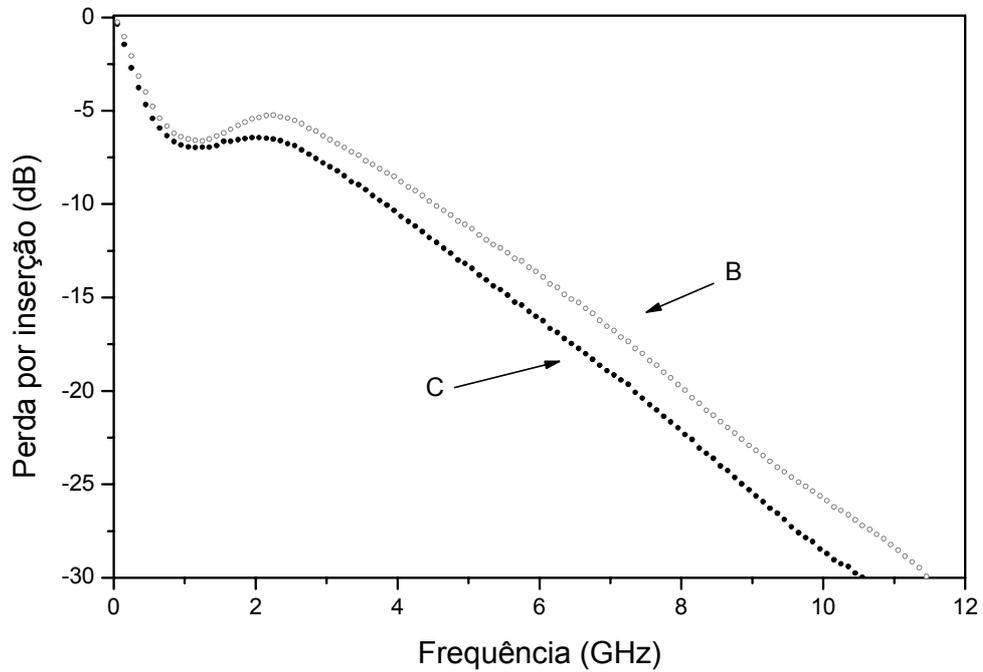


Figura 102 - Perda por inserção medida em função da frequência para os TLTs *back-to-back* B e C.

Como pode ser observado a partir dos resultados obtidos experimentalmente com os TLT *back-to-back*, a dopagem realizada, com 1 % de concentração de impureza, não proporcionou uma melhora significativa da perda por inserção do TLT, em relação ao caso sem dopagem. Tais resultados concordam com os resultados obtidos a partir das medidas de caracterização dos filmes utilizando os ressoadores lineares CPW.

Dentre os TLTs analisados, o TLT B que utilizou o filme de BTO dopado com Germânio, cuja espessura e valor da constante dielétrica relativa se aproximaram bem dos respectivos valores nominais, foi o que apresentou melhor desempenho relativo. Entretanto, seu desempenho ainda ficou bastante comprometido devido aos elevados valores das perdas.

6.3.3. Caracterização no domínio do tempo do TLT *back-to-back*

Foram feitas medidas da resposta do TLT *back-to-back* a pulsos de excitação ultra-curtos (50 ps), a fim de avaliar o comportamento da estrutura fabricada e os efeitos das perdas do filme dielétrico disponível. Tais medidas mostraram que a forma de onda de um pulso elétrico que atravessa esta estrutura sofre grandes distorções provocadas pelas perdas do filme. Foram comparados os resultados obtidos experimentalmente com as previsões teóricas, e observou-se excelente concordância entre os mesmos.

Para realizar esta medida, um trem de pulsos de tensão de 50 ps de largura à meia altura com uma taxa de repetição de 1 GHz de um sistema de 50 Ω foi introduzido num dos lados do TLT *back-to-back*, e coletado no outro lado. Os pulsos foram gerados utilizando-se a montagem ilustrada na figura 85, e neste caso o DUT corresponde ao TLT *back-to-back*. O sinal de tensão após atravessar o TLT *back-to-back* foi amostrado no osciloscópio digital e comparado ao caso no qual a conexão é feita sem o uso do TLT.

A figura 103 mostra os gráficos obtidos diretamente a partir da tela do osciloscópio. Cada divisão da escala horizontal do gráfico corresponde a 100 ps, por isso observa-se apenas um dos pulsos do trem com taxa de repetição de 1 GHz. Cada divisão da escala vertical equivale a 50 mV. O pulso da esquerda é o pulso de referência medido quando o gerador e o osciloscópio são conectados

diretamente e os da direita são os pulsos medidos após os TLTs *back-to-back* A e B. O pulso referente ao TLT A é o que apresenta uma amplitude um pouco menor. Verifica-se que quando o TLT *back-to-back* é introduzido, a intensidade do pulso cai aproximadamente três vezes e a largura do pulso aumenta mais do que duas vezes em relação ao pulso de referência. Estes efeitos se devem às elevadas perdas do filme dielétrico.

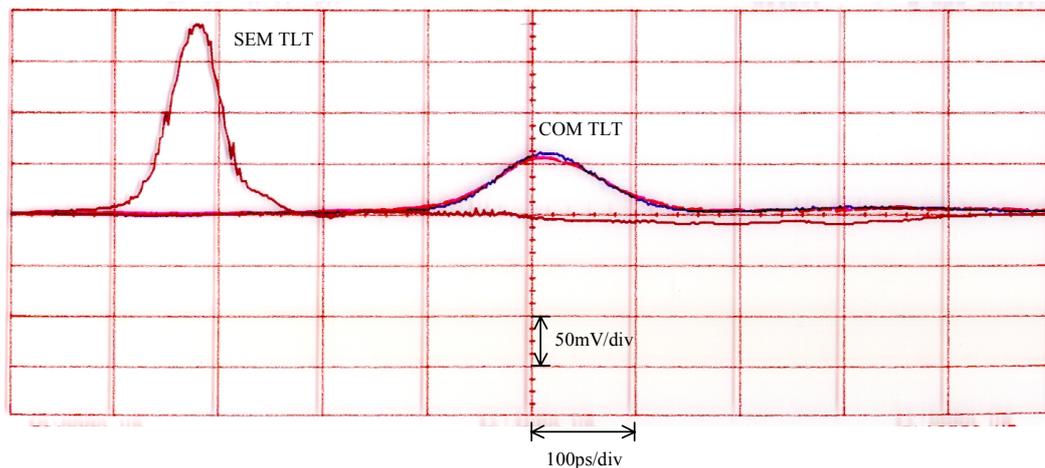


Figura 103 - Pulso de tensão medido em função do tempo. À esquerda, encontra-se o pulso de referência, à direita, os pulsos medidos após os TLTs *back-to-back* A e B.

O pulso após um TLT *back-to-back* sem perdas deveria ter uma amplitude semelhante à do sinal de referência obtido na ausência da estrutura e não sofreria alargamento. A figura 104 mostra o resultado de uma simulação realizada no domínio do tempo que ilustra o que ocorre com a forma de onda de um pulso de tensão que atravessa um TLT *back-to-back* sem perdas e outro com perdas correspondentes a um filme dielétrico com tangente de perdas igual a 0.2. Nesta simulação os TLTs considerados seguiram o perfil de variação da impedância medido para o TLT A. Nesta figura encontra-se também o pulso de referência obtido na ausência do TLT *back-to-back*. Observa-se que, o pulso de tensão após atravessar o TLT *back-to-back* sem perdas não sofreu alargamento e sua amplitude de pico manteve-se próxima do valor de referência. É interessante ressaltar que esta simulação considerou o perfil de variação de impedância medido e não o perfil de variação previsto teoricamente. Observa-se, então que, a variação do perfil de impedâncias em relação ao perfil esperado não teve muita influência sobre a resposta temporal do TLT *back-to-back*. Para o TLT *back-to-back* com perdas a situação é outra e bem diferente. Após o TLT *back-to-back* com perdas o

pulso sofreu grandes distorções devido às perdas, sua amplitude reduziu e sua largura aumentou.

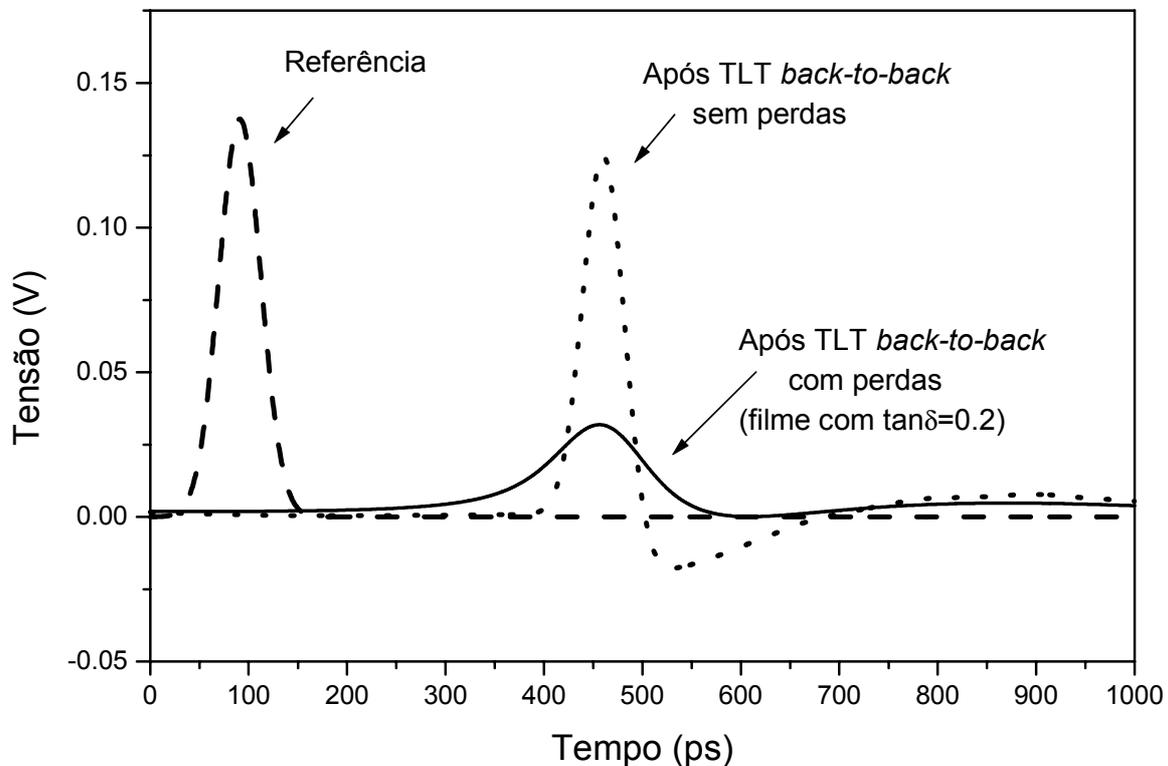


Figura 104 - Resposta temporal simulada do TLT *back-to-back* sem perdas e com perdas, a um trem de pulsos de tensão de 50 ps de largura a uma taxa de 1 GHz.

Na figura 105 são comparados os resultados medidos do TLT *back-to-back* B (linha cheia) com os simulados (linhas pontilhada e tracejada). Nas duas simulações foram considerados o perfil de variação de impedância nominal e um filme dielétrico com constante dielétrica relativa igual a 150 e tangente de perdas igual a 0.2. Na simulação correspondente à linha tracejada foram considerados os efeitos da dispersão.

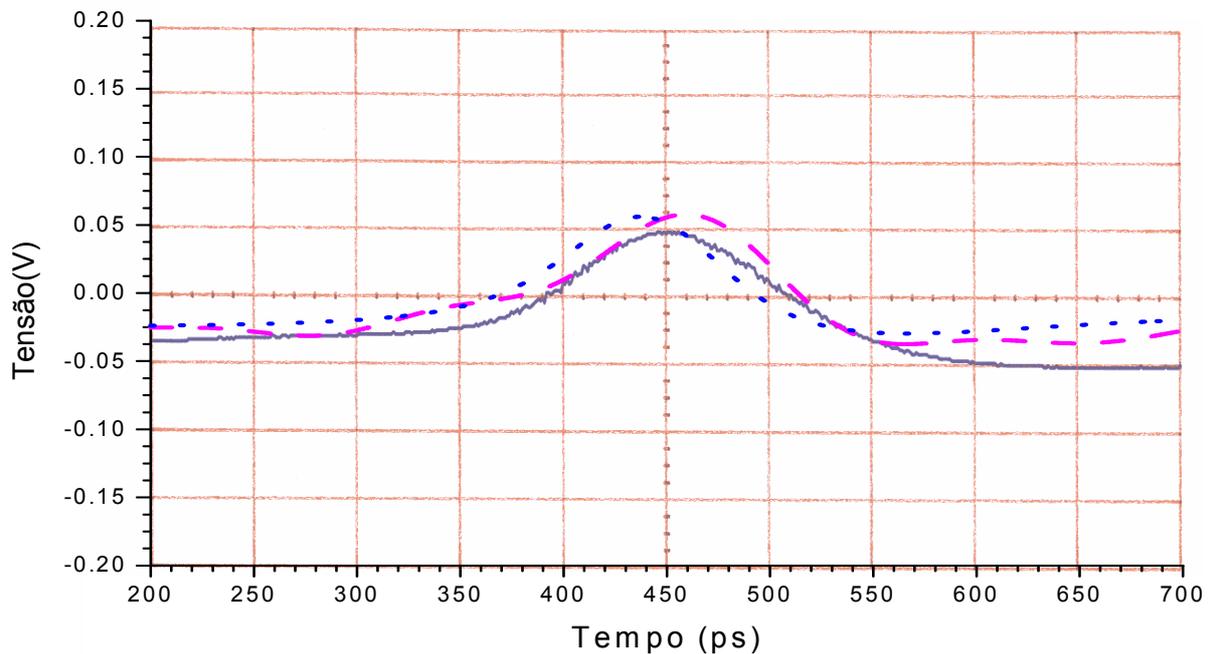


Figura 105 - Pulso de tensão medido após o TLT *back-to-back* B em função do tempo. As linhas tracejada e pontilhada mostram as previsões teóricas.

Os resultados experimentais estão de acordo com as previsões teóricas e mostram que a elevada tangente de perdas do filme é a responsável pela distorção do pulso, que se tornou mais largo e com menor intensidade. O valor obtido para a tangente de perdas do filme de BTO medido de 0.2 ou 0.3 degrada a forma de onda do sinal além dos limites toleráveis.

6.3.4. Metodologia para medida do desempenho de lasers semicondutores utilizando TLT

Para verificar experimentalmente a eficácia do transformador de impedância, a resposta óptica do laser semiconductor alimentado pelo transformador deve ser comparada com a resposta do mesmo laser alimentado pelos métodos convencionais, quando são utilizados pulsos curtos de excitação.

Com o esquema mostrado na figura 106 é possível gerar pulsos elétricos curtos de 50 ps de largura à meia altura e medir a resposta óptica do laser quando

o mesmo é alimentado através de diferentes alternativas, representadas neste esquema pelo DUT (*Device Under Test*).

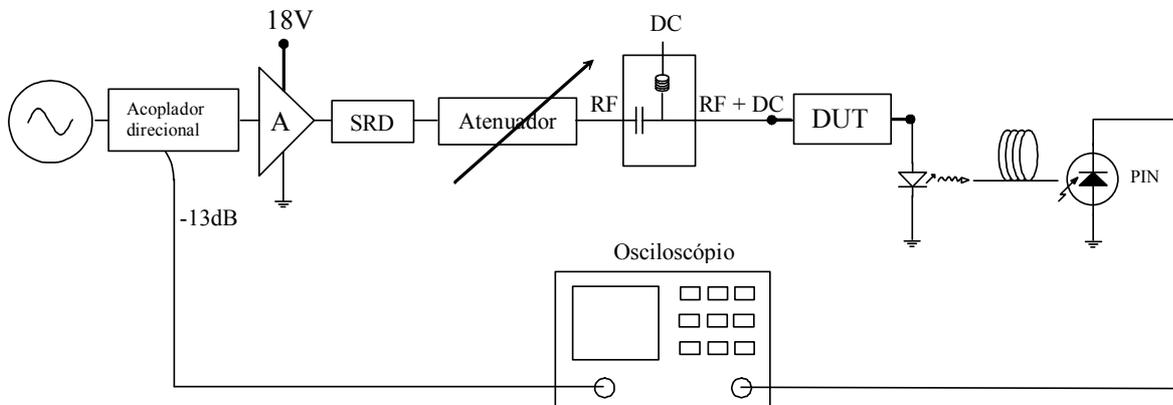


Figura 106 - Montagem experimental para avaliação da resposta óptica do laser.

Foi utilizado neste experimento um laser semiconductor $1.3 \mu\text{m}$ submontado, com corrente de limiar igual a 19 mA e potência óptica em 25 mA igual a $250 \mu\text{W}$.

Os pulsos elétricos curtos e a corrente de polarização dc foram aplicados ao TLT acoplado ao laser através de um T de polarização (*T-bias*). Os pulsos elétricos curtos foram obtidos da forma descrita na seção 5.5. Os pulsos ópticos produzidos pelo laser foram monitorados com o fotodetector de alta velocidade modelo 1414 (fotodiodo acoplado ao amplificador) e o osciloscópio digital modelo HP54120B.

Primeiramente, o laser foi montado à uma linha de transmissão *microstrip* convencional de 50Ω com um resistor em *chip* em série com o laser para efetuar o casamento de impedâncias. Em seguida, o resistor de casamento foi removido e o laser foi conectado diretamente à linha de transmissão *microstrip* convencional de 50Ω . Finalmente, o laser submontado foi acoplado ao TLT tal como ilustrado na figura 92.

Em cada uma das montagens mencionadas, foi medida a tensão de pico do pulso elétrico em função do nível mínimo de corrente de polarização dc, simultaneamente necessários para que o laser produzisse pulsos ópticos curtos. Com este procedimento é possível mensurar a eficiência do acoplamento. Para uma dada corrente de polarização do laser, o acoplamento mais eficiente será

aquele que com uma tensão menor do gerador for capaz de fazer chegar até o laser um nível de sinal elétrico suficiente para fazê-lo gerar sinal óptico. Outra forma de interpretar a eficiência do acoplamento baseia-se em uma tensão fixa fornecida pelo gerador. Neste caso, será considerado o melhor acoplamento aquele que exigir uma corrente de polarização do laser menor para gerar a mesma potência óptica.

A figura 107 mostra os resultados obtidos para os dois primeiros casos, ambos sem o TLT. Comparando-se as duas curvas, verifica-se que para uma corrente de polarização de 17 mA, por exemplo, a amplitude do pulso de tensão necessária para levar o laser a operar acima do limiar quando o laser é conectado diretamente à linha de transmissão de 50Ω é igual a 2.10 V. Este valor é 40% menor do que aquele (3.37 V) obtido quando o laser é conectado através do resistor de casamento. Portanto, o acoplamento com o resistor é o menos eficiente. Isto ocorre porque quase toda a potência que deveria ser fornecida para o laser é dissipada na forma de calor sobre o resistor. Deve-se lembrar que quando se retira o resistor de casamento, o laser responde de modo um pouco mais eficiente, porém, o sistema está fortemente descasado, e parte da potência elétrica de RF retorna para o gerador e também não é aproveitada pelo laser.

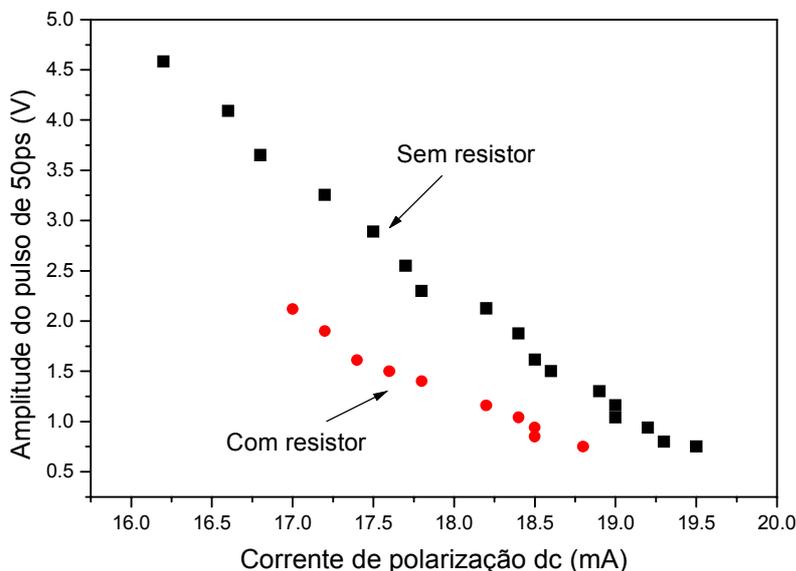


Figura 107 - Comparação do desempenho do laser alimentado através de uma linha convencional de 50Ω com resistor de casamento e através de uma outra linha sem resistor de casamento.

A situação de acoplamento mais eficiente é aquela em que o transformador de impedância é utilizado. Neste caso, para uma dada corrente de polarização, é necessária uma tensão de RF bem baixa para que o laser gere sinal óptico. O efeito da introdução de transformadores de impedância na resposta óptica de dispositivos optoeletrônicos já foi demonstrado experimentalmente em trabalhos anteriores (Carvalho & Margulis, 1991).

Foram feitas medidas utilizando-se o TLT OCPW fabricado. Entretanto, o desempenho do TLT OCPW ficou bastante comprometido devido às perdas excessivas presentes no filme dielétrico, e não pôde ser mostrado no gráfico da figura 107. É necessário dispor de um filme de elevada constante dielétrica que apresente menos perdas para que se possam realizar novas medidas e tirar conclusões verdadeiras a respeito do desempenho do TLT.

Conforme demonstraram as medidas realizadas no domínio do tempo e da frequência, mostradas nas seções anteriores, um trem de pulsos elétricos curtos que atravessa o TLT *back-to-back* fabricado sofre uma atenuação superior a 10 dB e um alargamento que o torna duas vezes e meia mais largo do que o pulso original. Mesmo considerando que para um TLT com metade do comprimento, os efeitos das perdas devam ter intensidades menores, ainda assim, a atenuação e o alargamento resultantes inviabilizam a comparação entre as diferentes alternativas de alimentação do laser. Para realizar esta comparação, uma condição necessária é considerar pulsos de excitação com mesma intensidade e duração em todas as alternativas de alimentação do laser. Satisfeita esta condição, é possível afirmar qual das alternativas é a mais eficiente, comparando-se a resposta óptica do laser em cada caso, tal como descrito anteriormente.

A resposta óptica do laser alimentado através do TLT OCPW fabricado não pode ser comparada com a resposta obtida para as demais alternativas. Isto porque, não há como contornar, de forma simples, os efeitos das perdas elevadas do filme, e tornar válida a comparação. Sem compensar o decréscimo do valor da intensidade devido às perdas, a resposta óptica do laser alimentado através do TLT fica subestimada em relações às demais. Por outro lado, compensando a atenuação do sinal elétrico através de um aumento proporcional da intensidade do pulso do gerador, chegará ao laser um sinal elétrico com uma amplitude justa, mas devido ao efeito de alargamento do pulso, este sinal terá uma energia bem maior em relação aos outros casos. A resposta óptica do laser alimentado através do

Realização prática de um TLT OCPW utilizando filme espesso de elevada constante 193 dielétrica

TLT, neste caso, seria superestimada. No futuro, quando houver um filme de elevada constante dielétrica com baixas perdas, será possível realizar as medidas e compará-las entre si.

6.4. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais obtidos para um transformador de impedância em linha de transmissão planar realizado na configuração OCPW proposta. Não foi possível implementar a configuração QCPW devido à má qualidade mecânica dos filmes disponíveis. Foram utilizados no TLT OCPW implementado os filmes dielétricos de BTO, dopados e não dopados, fabricados para este trabalho e cuja constante dielétrica e as perdas haviam sido previamente caracterizadas utilizando-se a metodologia apresentada no capítulo 5.

Além dos TLT OCPW, foram fabricados também TLTs OCPW no arranjo *back-to-back*, o que permitiu realizar diversas medidas de caracterização do TLT.

O perfil de variação de impedância do TLT OCPW fabricado foi medido através de reflectometria no domínio do tempo (TDR). Verificou-se que a sobrecamada de filme dielétrico utilizada não apresenta características uniformes ao longo de todo o TLT. Esta não uniformidade do filme dielétrico foi a responsável pela diferença entre o perfil de variação de impedância medido e aquele previsto teoricamente correspondente ao de um TLT Chebyshev. Os resultados teóricos de simulação mostram que o comportamento da perda de retorno é relativamente tolerante às variações no valor da constante dielétrica e no valor da espessura do filme. Entretanto, nesta simulação foram consideradas variações isoladas da espessura do filme ou da sua constante dielétrica relativa, e tais variações foram consideradas constantes ao longo de todo o TLT. Na prática ocorreram as duas variações simultaneamente e de forma não uniforme.

As medidas no domínio da frequência mostraram que a perda de retorno e a perda por inserção do TLT fabricado diferem do comportamento Chebyshev desejado devido ao diferente perfil de variação de impedância obtido. O comportamento da perda de retorno é muito mais sensível às variações do perfil de impedância em relação ao perfil desejado do que a perda por inserção. A transmissão do TLT ficou bastante comprometida devido à grande degradação da perda por inserção, provocada pelas elevadas perdas inerentes ao filme de BTO utilizado. A degradação da transmissão aumentou com o aumento da frequência.

O desempenho do TLT ficou seriamente comprometido para o fim a que se destinava, que era o de possibilitar um melhor aproveitamento da potência elétrica

disponível. A degradação do desempenho do TLT foi também observada experimentalmente através da resposta do TLT *back-to-back* a pulsos ultra-curtos de excitação. Foi observada uma grande distorção da forma de onda dos pulsos, que foram atenuados e alargados devido às elevadas perdas do filme.

As perdas do filme comprometeram seriamente o desempenho do TLT e, por isso, não foi possível comprovar experimentalmente a eficácia do TLT ao acoplar o sinal de RF ao laser semiconductor. Foi indicada uma metodologia capaz de comprovar a melhoria da resposta do laser devido à melhoria do acoplamento do sinal de RF. A resposta do laser a pulsos curtos de excitação foi obtida experimentalmente para os dois tipos tradicionais de acoplamentos: sem casamento de impedância e com o casamento realizado através de um resistor. Verificou-se que o casamento de impedâncias obtido com o resistor compromete a resposta do laser, que se mostra superior quando o acoplamento é feito de forma descasada. No futuro, quando houver um filme de elevada constante dielétrica e de perdas reduzidas, será possível demonstrar experimentalmente que o acoplamento realizado através do TLT, nas configurações OCPW ou QCPW, proverá o casamento de impedâncias eficiente, que resultará numa melhoria significativa da resposta do laser semiconductor.