

2

Materiais dielétricos para microondas e técnicas de fabricação

2.1

Introdução

A demanda por bens e serviços na área da eletrônica e das telecomunicações muda rapidamente com os contínuos requisitos por sistemas de baixo custo e melhor desempenho. Um dos exemplos mais claros é a tecnologia móvel, que tem experimentado uma expansão explosiva no curso das duas últimas décadas. A redução dos custos nos equipamentos permitiu que esta tecnologia fosse hoje acessível para usuários comuns. Mas, além das exigências técnicas, têm aparecido também requisitos de portabilidade que obrigam que os aparelhos sejam de tamanho e peso reduzidos. Isto faz com que a procura por novos materiais e o estudo mais aprofundado dos já existentes estejam sempre presentes na área de microondas. Neste contexto, o uso de materiais cerâmicos em sistemas elétricos e eletrônicos vem sendo cada vez mais freqüente, dado que constantemente proporcionam soluções viáveis para muitos dos problemas que precisam ser resolvidos.

Basicamente, são três as propriedades específicas a serem consideradas na escolha de um material dielétrico a ser usado em microondas (Huang & Weng, 2001): a constante dielétrica relativa (ϵ_r) do material, a tangente de perdas ($\tan\delta$), e o coeficiente térmico na freqüência de ressonância (τ_f). Em geral, os materiais mais procurados são aqueles que apresentam constantes dielétricas altas (quando se deseja miniaturização), baixas perdas e coeficientes térmicos próximos de zero. Valores de $\epsilon_r > 20$, $\tan\delta < 10^{-3}$ e $\tau_f \sim \pm 3 \text{ MK}^{-1}$ para filmes finos, filmes espessos ou substratos “bulk”, são considerados ótimos para aplicações de materiais dielétricos em microondas (Reaney & Iddles, 2006). Nesta seção é apresentada uma breve descrição dessas propriedades e a forma em que cada uma delas afeta o desempenho final do sistema.

A constante dielétrica é uma propriedade intrínseca dos meios e está relacionada com a resposta dos materiais aos campos elétricos. A interação fundamental dos campos com a matéria se manifesta mediante a *polarização*, induzida ou permanente, dos momentos de dipolo atômicos ou moleculares de um corpo quando submetido a um campo externo. Existem basicamente três mecanismos de polarização: *eletrônica*, presente em todos os átomos; *iônica*, que ocorre só em materiais iônicos, e *dipolar*, que ocorre só em substâncias que possuem momentos de dipolo permanentes (Callister, 2007). Como resultado da polarização, os dipolos orientados criam um campo que se superpõe ao campo externo, determinando o comportamento dielétrico do material. A medida desse efeito é conhecida como a *permissividade* ou *constante dielétrica* do meio, ϵ . Já para se referir às propriedades dielétricas de um material é comumente usada a *constante dielétrica relativa*, definida como $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, com $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ sendo a permissividade do vácuo.

Um aspecto importante a considerar é que a constante dielétrica relativa dos materiais em eletrônica e microondas determina as dimensões do dispositivo a ser elaborado. De acordo com a teoria (Moliton, 2007), o comprimento de onda (λ) de uma onda eletromagnética num meio dielétrico é dado pela expressão:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda da onda no vácuo. Segundo a eq. (1), o tamanho de um dispositivo elaborado com um determinado material dielétrico pode ser reduzido em um fator de $\sqrt{\epsilon_r}$, quando comparado com outro sem o dielétrico. Se o valor de ϵ_r for alto, uma redução considerável de tamanho pode ser obtida, sendo esta uma forma relativamente simples de miniaturizar dispositivos (Kretly et al., 2004).

Outro aspecto importante nas aplicações práticas dos materiais dielétricos é a dependência do valor da constante dielétrica com a frequência. Quando um campo elétrico alternado é aplicado a um meio dielétrico, os dipolos do material tentam se reorientar com o campo, num processo que requer algum tempo finito. Para cada tipo de polarização mencionado, existe um tempo mínimo de

reorientação que depende da facilidade com que os dipolos em particular sejam capazes de se realinharem. A *freqüência de relaxação* é definida como o inverso deste tempo mínimo de reorientação. Um dipolo não pode alcançar a direção de orientação quando a freqüência do campo aplicado ultrapassa sua freqüência de relaxação e, portanto, não contribui com a constante dielétrica. O comportamento da constante dielétrica e das perdas em função da freqüência é representado esquematicamente nas figuras 1 e 2, respectivamente, para um material que apresenta os três tipos de polarização; o eixo da freqüência está em escala logarítmica. Nota-se que na faixa de microondas entre 10^9 e 10^{10} Hz, de especial interesse no presente trabalho, os materiais apresentam uma queda abrupta na permissividade (ϵ') e um aumento considerável nas perdas (ϵ'').

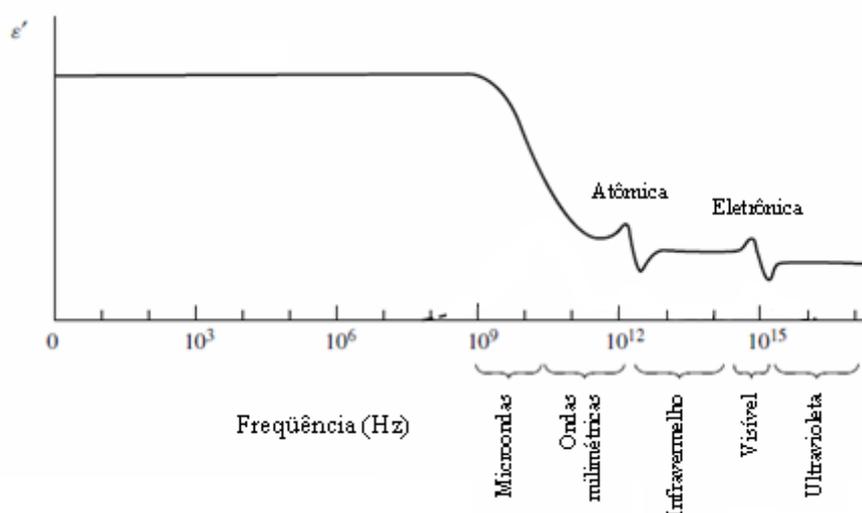


Figura 1. Exemplo da variação típica da constante dielétrica (ϵ') de um material com a freqüência do campo aplicado.

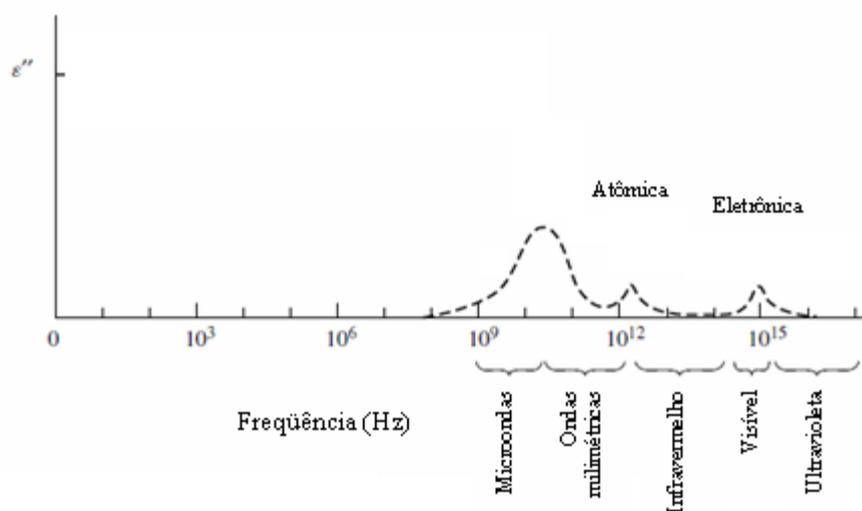


Figura 2. Exemplo da variação típica das perdas (ϵ'') de um material com a freqüência do campo aplicado.

Cada mecanismo de perda apresenta o seu pico de ressonância em função da frequência (Chen et al., 2004). Assim, em frequências muito baixas têm-se perdas por condução direta. Estas perdas dependem da existência de cargas livres e da polarização de cargas espaciais. As perdas em corrente contínua provêm de correntes de fuga no material. Em bons isolantes, estas perdas podem ser extremadamente baixas. Em regime alternado de baixas frequências, as perdas são originadas pela energia perdida na transformação do movimento de oscilação das cargas em agitação térmica. Em frequências mais elevadas, tem-se a relaxação iônica e de dipolos elétricos. Aumentando-se ainda mais a frequência, tem-se a absorção por vibrações dos átomos e finalmente as transições a frequências ainda mais elevadas.

A permissividade dos meios dielétricos lineares e isotrópicos pode ser escrita como (Pozar, 1998):

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0(1 + \chi_e) \quad (2)$$

onde a parte real ε' é a permissividade do material sem perdas, a parte imaginária (ε'') representa as perdas no material devido à relaxação térmica associada ao movimento dos dipolos num campo elétrico alternado e χ_e é a susceptibilidade elétrica, que é uma grandeza complexa nos meios com perdas. Perdas em um material dielétrico também podem ocorrer devido a sua condutividade σ . A densidade de corrente num material com condutividade σ é dada pela lei de Ohm:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

onde \vec{J}_f é a densidade de corrente elétrica e \vec{E} o campo elétrico aplicado. É possível considerar (Pozar, 1998) uma condutividade efetiva total no material submetido a um campo elétrico com frequência angular ω como sendo $\omega\varepsilon'' + \sigma$, ou alternativamente, que a parte imaginária efetiva da permissividade seja $\varepsilon'' + \sigma/\omega$.

A *tangente de perdas* de um material dielétrico é definida pela relação entre a parte imaginária efetiva da permissividade e a sua parte real (Pozar, 1998):

$$\tan \delta = \frac{\omega \varepsilon'' + \sigma}{\omega \varepsilon'} \quad (4)$$

Na faixa de frequência de microondas, $\omega \varepsilon''$ é usualmente muito maior do que σ . Os materiais em microondas são geralmente especificados pela parte real da permissividade $\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0$ e pela tangente de perdas numa dada frequência. É usual resolver os problemas assumindo-se que o material dielétrico não possua perdas e depois os efeitos das perdas são considerados substituindo-se ε' pela permissividade complexa $\varepsilon = \varepsilon'(1 - j \tan \delta)$.

Em geral, deseja-se uma tangente de perdas baixa na frequência de operação do dispositivo a ser elaborado, de modo que este apresente uma baixa perda por inserção.

O coeficiente térmico, ou *coeficiente dielétrico de temperatura*, é outra das propriedades dos materiais dielétricos a ser considerada nas aplicações particulares. Está associado à variação da constante dielétrica em função da temperatura e é particularmente importante nas aplicações nas quais a faixa de temperatura de operação dos dispositivos elaborados seja muito grande, ou esteja próximo de pontos críticos nos quais possa ocorrer uma transição de fase de natureza elétrica, como no caso dos materiais *ferroelétricos*, que serão analisados na próxima seção.

Para melhorar o desempenho de dispositivos, é interessante usar materiais que não apresentem dependência com a frequência de operação nem com a temperatura. Isto significa que a temperatura do ambiente não afetará o sistema e o produto final poderá operar de forma igualmente eficaz de -30°C a 50°C .

2.2

Materiais de alta constante dielétrica

Em circuitos de microondas, os materiais de alta constante dielétrica são usados em diversas formas tais como: substratos “bulk”, filmes espessos ou filmes finos. O interesse pelos materiais de alta permissividade coincide historicamente com a descoberta da *ferroeletricidade* em diversos materiais, como é o caso do titanato de bário (BaTiO_3). Desde então, os materiais *ferroelétricos* têm sido

considerados como os mais promissores nas aplicações que requerem valores elevados de permissividade, tal como na miniaturização de circuitos (Brown, 1959).

Os materiais ferroelétricos se diferenciam de outros dielétricos por apresentar *polarização espontânea* (Callister, 2001). A estrutura cristalina desses materiais pode ser vista como uma rede de íons positivos e negativos. Para um valor determinado de temperatura, estes íons são deslocados por efeito térmico. O resultado deste deslocamento é o surgimento de um momento de dipolo permanente. O fenômeno da polarização espontânea é altamente dependente da temperatura e, em geral, os materiais ferroelétricos experimentam transições de fase nas quais o cristal sofre mudanças estruturais. Estas transições ocorrem a uma temperatura determinada em cada material, conhecida como *temperatura de Curie* (T_c), na qual as propriedades desse material mudam abruptamente (Hong & Lancaster, 2001).

Nos materiais ferroelétricos são duas fases são bem definidas: a fase *paraelétrica* (ou *não polar*) e a fase *ferroelétrica* (ou *polar*). Na primeira, a polarização do material apresenta um comportamento linear quando aplicado um campo elétrico externo. Nesta fase, os dipolos orientados voltam a seus estados originais quando o campo é removido. Alguns filmes de materiais ferroelétricos em sua fase paraelétrica têm apresentado altas constantes dielétricas (Lee et al., 2000; Kurchania et al., 2004; Nath et al., 2005), sendo esta propriedade de particular interesse no desenvolvimento do presente trabalho.

Na fase ferroelétrica, a constante dielétrica dos materiais ferroelétricos pode variar mediante a aplicação de um campo elétrico externo. Isto se deve ao fato da orientação do momento dipolar permanente, presente nesta fase, poder se deslocar de um estado para outro mediante a aplicação do campo externo. Isto afeta diretamente a frequência de relaxação do material que, por sua vez, afeta a constante dielétrica. Esta fase só pode ser mantida em temperaturas inferiores a uma certa temperatura, denominada temperatura de Curie ou temperatura crítica (T_c).

A propriedade ferroelétrica de um material surge devido a uma pequena distorção da estrutura cristalográfica de sua fase paraelétrica, de modo que a simetria na fase ferroelétrica é menor que na fase paraelétrica. Por exemplo, um cristal possui uma dada estrutura cúbica em temperaturas acima da temperatura de

Curie. Com o decréscimo da temperatura, ocorre uma distorção dos átomos da célula unitária causando o deslocamento do centro de simetria da célula. Tal fato provoca o aparecimento de dipolos elétricos, responsáveis pela ferroeletricidade dos materiais. Pode-se dizer que o *ponto de Curie* é a temperatura a partir da qual a estrutura cristalina do material se torna mais simétrica. Devido à possibilidade de controlar o valor da constante dielétrica na fase ferroelétrica, os materiais ferroelétricos vêm sendo usados em uma grande variedade de dispositivos sintonizáveis (Tagantsev et al., 2003).

Outra propriedade bem estabelecida dos materiais ferroelétricos é que eles apresentam ainda uma transição de fase caracterizada por um máximo bem definido na constante dielétrica como função da temperatura. Esse máximo está associado à T_C e define uma transição de fase *ferro-paraelétrica* governada pela lei de Curie-Weiss (Moliton, 2007). Na figura 3 é mostrado o pico da permissividade de um material ferroelétrico associado a esta transição. Pode-se observar uma grande sensibilidade do valor da constante dielétrica como função da temperatura em pontos próximos a T_c , que são também os pontos onde existe a maior sensibilidade da permissividade com a aplicação de um campo elétrico (Hong & Lancaster, 2001).

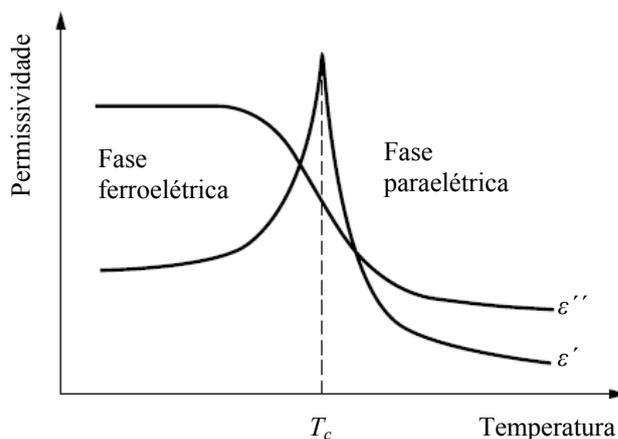


Figura 3. Vista esquemática da dependência da constante dielétrica de um material ferroelétrico nas vizinhanças da temperatura de Curie.

Nos materiais ferroelétricos são considerados quatro mecanismos de perdas quando expostos a frequências de microondas: i) dissipação fundamental associada à espalhamento de quatro fônons, ii) mecanismo de perda quase-Debye,

iii) transformação das oscilações do campo elétrico em oscilações acústicas, e iv) relaxação em baixas frequências (Tagantsev, 2003; Vendik, 1998, 1999, 2004).

Alguns materiais têm mostrado uma permissividade variável com o campo elétrico, são eles: SrTiO_3 , $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$, $(\text{Pb}, \text{Sr})\text{TiO}_3$, $(\text{Pb}, \text{Ca})\text{TiO}_3$, $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$, $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ (Lancaster et al., 1998). Materiais dopantes, tal como o KTaO_3 , podem ser introduzidos para melhorar as propriedades dielétricas e reduzir as perdas em alguns ferroelétricos (Jackson et al., 1992; Herner et al., 1993). No entanto, o titanato de estrôncio (SrTiO_3 , STO), o titanato de bário (BaTiO_3 , BTO) e o titanato de bário estrôncio ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{TiO}_3$, BSTO), onde x pode variar de 0 a 1, são três dos mais populares materiais ferroelétricos atuais que estão sendo aplicados em circuitos sintonizáveis (Tombak et al., 2003; Chang et al., 2004; Krishna Palukuru et al., 2010). Valores de constante dielétrica tão elevados quanto 1500 têm sido reportados para estes últimos materiais na faixa de 1 a 100 kHz. Já nas frequências de microondas, o valor da constante dielétrica diminui significativamente e depende de múltiplos fatores de fabricação, como será analisado na próxima seção.

Além dos ferroelétricos, existe também outro tipo de materiais dielétricos amplamente usados em microondas e eletrônica. Trata-se das cerâmicas de alta constante dielétrica, que apesar de não apresentarem valores de permissividade tão altos como os dos ferroelétricos, são opções que estão sendo consideradas já que não apresentam comportamento tão complexo como o dos ferroelétricos. Materiais compostos tais como o $(\text{MgTiO}_3)_x-(\text{CaTiO}_3)_{(1-x)}$ têm exibido constantes dielétricas superiores a 20 e poucas perdas em baixas frequências, dependendo das proporções (valor de x) com as quais o composto é elaborado (Hong & Lancaster, 2001).

No presente trabalho foi feito um estudo bibliográfico extenso com o intuito de determinar os materiais dielétricos mais apropriados para serem usados na elaboração dos dispositivos propostos.

2.3

Técnicas de fabricação

Filmes de elevada constante dielétrica vêm sendo amplamente investigados para serem empregados em: dispositivos de microondas, tais como

capacitores de "by-pass" em MMIC ("Monolithic Microwave Integrated Circuits"); memórias DRAM e NVRAM ("Dynamic and Non-Volatile Random Access Memories"); filtros e ressoadores para uso em sistemas de comunicações móveis, de satélites; e muitas outras aplicações (Gevorgian & Kollberg, 2001). Como mencionado na seção 2.1, uma das formas de tornar os circuitos mais compactos é utilizar materiais com elevada constante dielétrica. Nesses materiais, o comprimento de onda numa dada frequência é significativamente reduzido quando comparado com materiais que possuem constante dielétrica baixa. Como a velocidade de propagação do campo eletromagnético dentro de um material dielétrico é inversamente proporcional à raiz quadrada da sua constante dielétrica relativa, quanto maior a constante dielétrica, menores as dimensões.

Na seção 2.2 foi mencionado que os materiais que possuem elevada constante dielétrica mais encontrados em aplicações de microondas são os materiais ferroelétricos, tais como: o titanato de estrôncio (STO), o titanato de bário (BTO), o titanato de bário-estrôncio (BSTO) e algumas cerâmicas de alta constante dielétrica. Exemplos destas cerâmicas são: o titanato de magnésio (MTiO_3 , MTO), o titanato de cálcio (CaTiO_3 , CTO) e os compostos formados pelos dois últimos $(\text{MgTiO}_3)_x$ – $(\text{CaTiO}_3)_{(1-x)}$, MTO-CTO). Esses materiais são encontrados na forma de estrutura cristalina ("bulk" ou filme epitaxial) ou cerâmicas amorfas ("bulk" ou filme) e podem ser associados a eletrodos de metais ou de supercondutores para fabricar dispositivos (Gevorgian, 2001).

De acordo com a literatura, existem várias técnicas para a fabricação de filmes finos (com espessura inferior a $1\ \mu\text{m}$) de elevada constante dielétrica, tais como: sol-gel (Lahiry et al., 2000; Sharma et al., 1995), "spin-coating" (Pontes et al., 2001a, 2001b), "laser ablation" (Van Keuls et al., 1999), "RF magnetron sputtering" (Nishitsuji et al., 1993; Akedo et al., 1999), "chemical vapor deposition" (CVD) (Shaw et al., 1999), "pulsed laser deposition" (Kain et al., 1993; Findikoglu et al., 1999; Carroll et al., 1993). Para filmes espessos (espessura entre 10 e $100\ \mu\text{m}$) têm-se técnicas baseadas em sinterização que consistem na fabricação de uma pasta (Stojanovic et al., 2002), e "screen-printing" (Weil et al., 2001a).

Resultados experimentais de caracterização dos filmes mostraram que, as características elétricas dos filmes dielétricos diferem das propriedades dos materiais "bulk" correspondentes (Gevorgian et al., 1997; Rupprecht & Bell,

1962; Saifi & Cross, 1970). A constante dielétrica do STO “bulk”, por exemplo, aumenta monotonicamente para temperaturas abaixo de 4 K, enquanto que a constante dielétrica do filme apresenta um pico entre 30 e 100 K. Independentemente do método de fabricação e do tipo de substrato, os filmes finos de STO apresentam uma constante dielétrica menor do que a do “bulk” e a tangente de perdas em microondas ($f > 10$ GHz) da ordem de 0,01 à temperatura ambiente (Gevorgian & Kollberg, 2001). Apesar de possuir uma constante dielétrica menor e perdas elevadas, o valor da constante dielétrica dos filmes finos varia menos com a temperatura do que a do “bulk” (Su & Button, 2001; Shaw et al., 1999; Findikoglu et al., 1999; Kain et al., 1993), tornando os dispositivos com filmes finos menos susceptíveis a variações de temperatura.

As propriedades dos filmes finos também são diferentes das dos filmes espessos. Quanto mais fina a camada, maiores as perdas. De acordo com Stojanovic et al. (2002), o filme espesso possui características semelhantes às do “bulk” e requer uma boa compatibilidade entre o seu coeficiente térmico, o do substrato e o dos eletrodos, de modo a não gerar tensionamento. Este causa defeitos no filme e degradam as propriedades dielétricas. Apesar dos filmes finos apresentarem perdas mais elevadas do que as dos filmes espessos, à medida que a espessura aumenta, a qualidade do filme tende a degradar (Van Keuls et al., 1999).

O desenvolvimento de dispositivos de microondas baseados em materiais ferroelétricos esbarra em uma série de dificuldades. O problema básico é a perda excessiva dos materiais ferroelétricos nas frequências de microondas, especialmente em filmes finos. Os mecanismos de perdas dos materiais ferroelétricos, tanto em filmes quanto em estruturas cristalinas “bulk”, ainda não são bem compreendidos. No trabalho de Vendik (2000) é apresentado um modelo matemático para descrever a dependência da constante dielétrica com a temperatura, com a espessura dos filmes finos ferroelétricos e com o campo elétrico aplicado. É muito difícil prever teoricamente o comportamento da tangente de perdas, pois inúmeros fatores influenciam na perda, por exemplo: defeitos na estrutura cristalina, propriedades da interface entre materiais ferroelétricos e os eletrodos, e efeitos do tamanho dos grãos dos filmes. O mecanismo de perda fundamental, espalhamento de quatro fônons, que vale para o STO “bulk”, prevê que a tangente de perdas seja proporcional à frequência, não

descreve o comportamento observado para o filme fino (Galt et al., 1998). Portanto, outros mecanismos de perdas devem ser levados em consideração. A maioria dos materiais ferroelétricos na fase ferroelétrica (ou fase polar) são também piezoelétricos, e as transformações piezoelétricas causam grandes perdas na faixa de frequência de microondas até 10 GHz (Gevorgian & Kollberg, 2001).

De acordo com o trabalho de Gibbons et al. (2000), as características estruturais dos filmes como: orientação das moléculas, tamanho dos grãos, estequiometria, e tensionamento ("stress/strain"), podem contribuir para as perdas nos filmes. Pelo menos em tese, a otimização desses fatores traz melhoria nas propriedades dielétricas dos filmes. Por isso, é fundamental compreender a influência das condições de deposição, dos métodos de deposição e da escolha do substrato na qualidade no desempenho dos filmes (Gibbons et al., 2000). No trabalho de Weil (2001b) é mostrado que a constante dielétrica do filme de BaSrTiO₃ pode ser alterada através de dopagem, da alteração da porosidade do filme cerâmico e do tamanho dos grãos. Como mostra o trabalho de Van Keuls (1999), é possível remover imperfeições de filmes de BaSrTiO₃ realizando o recozimento ("annealing") do material.

Outro aspecto que deve ser considerado é a propriedade intrínseca dos materiais ferroelétricos da variação da constante dielétrica com a temperatura e com o campo elétrico DC aplicado (Gevorgian et al., 1997).

A capacidade de variar a constante dielétrica com a aplicação de um campo elétrico (que altera a polarização interna do material), denominado efeito de sintonia da constante dielétrica, vem sendo bastante explorada, pois permite a fabricação de diversos dispositivos de microondas sintonizáveis, tais como: misturadores, linhas de retardo, filtros e defasadores ("phase shifters") eletronicamente sintonizáveis (Tagantsev et al., 2003; Chang et al., 2004).

Por outro lado, a variação da constante dielétrica dos materiais ferroelétricos com a temperatura não é muito vantajosa para a fabricação de dispositivos. Em geral, a constante dielétrica apresenta um valor máximo, e a perda um valor mínimo, na temperatura crítica (T_c). Portanto, é interessante trabalhar em torno dessa temperatura, que é determinada pela composição do material, de modo a otimizar o desempenho das propriedades dielétricas. Variando a concentração de bário no Ba_xSr_{1-x}TiO₃, por exemplo, é possível obter o valor de T_c de 20 K a 395 K, e escolhendo a composição correta (para $x = 0,6$, T_c

= 290 K) é possível operar satisfatoriamente à temperatura ambiente (300 K). Aumentando a concentração de bário, para aumentar a temperatura de operação, tanto o efeito da sintonia quanto as perdas também aumentam (Weil et al., 2001a).

Diferentemente, no STO, a temperatura crítica ocorre em temperaturas criogênicas (Powell et al., 1996). Os materiais “bulk” de STO apresentam elevada constante dielétrica, baixa perda e grande efeito de sintonia da constante dielétrica, principalmente em baixas temperaturas (temperaturas criogênicas) (Gibbons et al., 2000; Kain et al., 1993). Quando um material “bulk” de STO é resfriado desde 300 K até 4 K, ele passa por várias transições de fase. Acima de 110 K a rede cristalina é do tipo cúbica; entre 110 K e 65 K a estrutura é tetragonal e abaixo de 65 K é ortorrômbica. A constante dielétrica do material depende diretamente da rede cristalina. Quando se deseja controlar a constante dielétrica pela aplicação de um campo elétrico é conveniente trabalhar com esse material em temperaturas inferiores de 65 K. Nos filmes de STO, a dependência da constante dielétrica com a temperatura é bem menos intensa do que no “bulk” (Kain et al., 1993).

É interessante comentar que, devido ao desempenho dos filmes com T_c baixa, por exemplo de STO, ser ótimo em temperaturas criogênicas, uma série de dispositivos que associam filmes ferroelétricos a HTS (“High Temperature Superconductors”) vêm sendo pesquisados (Gupta et al., 1996). Nesses dispositivos, os supercondutores de alta temperatura (HTS), por exemplo, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, substituem os eletrodos metálicos convencionais (Au, Pt, Cu), e há necessidade de resfriar os dispositivos a temperaturas tão baixas quanto 77 K, ou até mesmo 4 K. O sucesso inicial da aplicação dos HTS em microondas originou um novo ramo da eletrônica de microondas, a eletrônica de microondas à temperatura do nitrogênio líquido (Vendik et al., 1995). A associação de material ferroelétrico com HTS permite confeccionar dispositivos sintonizáveis extremamente compactos, aproveitando tanto as propriedades dos supercondutores (baixa resistência superficial) quanto as propriedades dielétricas (elevada constante dielétrica e sua dependência com o campo elétrico dc aplicado) dos materiais ferroelétricos. Operando em baixas temperaturas, a perda intrínseca de microondas dos materiais ferroelétricos fica bastante reduzida. Nesse sentido, a combinação entre HTS e ferroelétricos parece bastante promissora para a realização de componentes de microondas sintonizáveis, tais como defasadores e

linhas de retardo. As estruturas mais investigadas atualmente são $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{SrTiO}_3$ (YBCO/STO) e $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (YBCO/BSTO).

Devido ao grande apelo dos HTS, grande parte dos trabalhos caracteriza os filmes ferroelétricos em baixas temperaturas. Entretanto, tais resultados não são de interesse para o presente trabalho. Aqui, pretende-se operar à temperatura ambiente e utilizar eletrodos metálicos convencionais (Au e Al).

2.4

Conclusões

Os materiais de alta constante dielétrica têm, e continuarão a desempenhar um papel importante no desenvolvimento da tecnologia móvel e no mercado da eletrônica e das telecomunicações. Enquanto a indústria continua em expansão, há uma demanda maior pela utilização de frequências cada vez mais elevadas. As cerâmicas de alta permissividade, especialmente ferroelétricas, são uma excelente escolha. Novas composições de cerâmicas estão sendo continuamente desenvolvidas para se obter propriedades dielétricas específicas. Materiais dielétricos com baixas perdas, características elétricas superiores e maior estabilidade térmica estão oferecendo novas soluções para alguns dos problemas enfrentados pelos projetistas.

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

As aplicações de materiais dielétricos de interesse particular no presente trabalho devem-se às altas constantes dielétricas reportadas para alguns filmes finos ferroelétricos na fase paraelétrica, com o propósito de miniaturizar dispositivos passivos operando na faixa das microondas. É na fase paraelétrica que os materiais ferroelétricos apresentam um comportamento dielétrico linear, apropriado para projetar os TLTs propostos. Outras opções examinadas neste trabalho como materiais nos dispositivos propostos foram as cerâmicas de alta constante dielétrica (não

ferroelétricas). Os critérios de seleção dos materiais candidatos foram os seguintes: a alta constante dielétrica, baixas perdas apresentadas, e viabilidade de obter filmes, finos ou espessos, com os recursos técnicos disponíveis.