

2 Abordagem e motivação: uso de tratamento eletro-térmico em substratos para microondas

A partir das demandas atuais sobre os circuitos de microondas e da aplicação de tratamentos eletro-térmicos em substratos ópticos, decidiu-se explorar a possibilidade de se utilizar esses tratamentos como ferramenta para produzir alterações específicas em substratos para microondas. Duas frentes de trabalho são exploradas. A primeira é a criação na alumina de efeitos similares aos obtidos com base nos fenômenos ferroelétricos. A segunda é a alteração de substratos vítreos para reduzir perdas e permitir sua utilização em circuitos de microondas.

2.1. Hipóteses

Optou-se pela exploração da alumina (Al_2O_3), pois se trata de um substrato tradicional, de ampla utilização, que tem como características: constante dielétrica relativamente elevada ($\epsilon_r = 9,4\sim 10,2$; para substratos comerciais de alumina para microondas), baixas perdas ($tg\delta = 0,0005\sim 0,0001$) e relativo baixo custo. Além disso, a alumina resiste a altas temperaturas, permitindo realizar o tratamento eletro-térmico.

O que se busca na alumina é criar no substrato de microondas, por meio da polarização eletro-térmica, propriedades similares à ferroeletricidade [1]. Em materiais ferroelétricos, um deslocamento das cargas positivas em relação às negativas na estrutura cristalina provoca a geração de dipolos elétricos internos. A aplicação de um campo elétrico externo provoca o realinhamento desses dipolos e uma deformação na rede cristalina, alterando a constante dielétrica do material. Essa característica permite a construção de componentes de microondas sintonizáveis eletricamente [2], [3], [4]. A utilização de materiais ferroelétricos, no entanto, possui algumas desvantagens, como dificuldades de fabricação e perdas muito elevadas.

A polarização eletro-térmica [5] (seção 2.2) gera um campo elétrico gravado internamente no material. Pretende-se explorar a utilização deste campo dentro do substrato de modo similar aos dipolos dos materiais ferroelétricos. Obtendo-se efeitos semelhantes, poder-se-ia variar a constante dielétrica efetiva de uma região localizada do circuito através da aplicação de tensões (ou campos elétricos) de controle.

A possibilidade de controle da constante dielétrica por um sinal externo permitiria a construção de uma nova gama de componentes ativos, como capacitores variáveis, defasadores, filtros sintonizáveis, chaves e moduladores, com potencial para concorrer com a utilização de filmes ferroelétricos, com vantagens como menores perdas e facilidade de fabricação.

A outra frente de trabalho é a investigação de substratos ópticos (vidros) para a construção de circuitos de microondas. Esses substratos apresentam perdas muito elevadas nesta faixa de frequências.

É possível fabricar diversos componentes ópticos ativos em um mesmo substrato, podendo-se realizar um subsistema óptico integrado, onde os componentes estão ligados por guias de onda planares. No entanto, a possibilidade de integração, no mesmo substrato óptico, de circuitos de microondas que alimentam esses componentes ainda é um obstáculo para completar a integração desses sistemas, devido às altas perdas nos vidros.

Por outro lado, resultados preliminares na literatura indicam que é possível reduzir a perda dielétrica do vidro de boro-silicato na faixa de microondas [6]. Entretanto, esses resultados ainda são incipientes e exploram apenas um tipo de vidro e com tratamento a temperaturas superiores a 450°C.

O boro-silicato é uma classe de vidros com composição predominante $x\text{-SiO}_2\text{-}y\text{-B}_2\text{O}_3$ (x e y são as concentrações de sílica e borato, respectivamente), mas com elevado nível de impurezas, principalmente alcalinas. Não foi encontrado estudo sobre o efeito da concentração das impurezas nas características de microondas do vidro. Embora a polarização eletro-térmica já seja utilizada no boro-silicato para aplicações em óptica [5], poucos resultados existem na faixa de microondas [6]. Além disso, esse único trabalho encontrado na literatura com uma avaliação dos efeitos do tratamento sobre as propriedades dielétricas do vidro boro-silicato na faixa de microondas afirma que eles só são observáveis para tratamentos realizados em temperaturas acima de 450°C.

A finalidade é, então, a aplicação de tratamentos eletro-térmicos para melhorar as propriedades dielétricas de substratos vítreos, dos tipos boro-silicato e sodo-cálcico (*soda-lime*) em regiões localizadas, em particular para redução das perdas, permitindo a realização de circuitos de microondas e sua posterior integração com os componentes ópticos. Pretende-se identificar e quantificar quais os efeitos obtidos em microondas e avaliar também se é possível criar nos vidros efeitos similares aos ferroelétricos. A partir daí, vai-se buscar otimizar o processo para maximizar os efeitos nessa faixa de frequência.

Por fim, as temperaturas ótimas de polarização eletro-térmica em vidros tipo boro-silicato e sodo-cálcico com a finalidade de produzir efeitos ópticos não-lineares estão entre 260°C e 280°C [5], [7], [8]. Portanto, procura-se obter efeitos observáveis na faixa de microondas utilizando tratamentos nessa faixa de temperaturas.

2.2. Polarização eletro-térmica

Os processos de polarização eletro-térmica de materiais são conhecidos desde a década de 70 [9]. Determinados materiais, quando submetidos a altas tensões em altas temperaturas, têm sua estrutura ou sua composição alterada. Entretanto, somente a partir da década de 90 esses fenômenos começaram a ser utilizados em óptica e eletrônica [10], quando se percebeu que as propriedades ópticas ou dielétricas do material tratado poderiam ser convenientemente modificadas para finalidades específicas.

O procedimento experimental da polarização eletro-térmica, ou simplesmente polarização térmica (*thermal poling*), se baseia na aplicação de um campo elétrico elevado a um material em alta temperatura [11]. O esquema do arranjo para esse procedimento está representado na Figura 1.

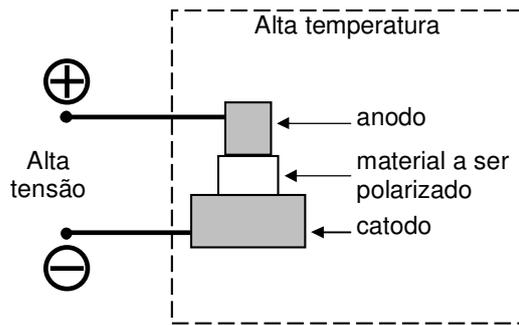


Figura 1. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica.

No arranjo da Figura 1, aplica-se uma tensão da ordem de centenas de Volt a poucos kV na amostra aquecida (em torno de 280°C). O procedimento pode levar de minutos a horas, dependendo da quantidade de portadores de carga, da mobilidade dos íons, da tensão e da temperatura, entre outros fatores. A amostra é resfriada e, somente então, a alta tensão é desligada (caso a aplicação da tensão fosse retirada ainda em alta temperatura, os portadores se rearranjariam no material).

O processo de polarização térmica [5], [7] está ilustrado na Figura 2(a). Inicialmente, o valor do campo elétrico no vidro é igualmente distribuído. A mobilidade dos íons do material aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura e há uma migração em bloco dos cátions na direção do catodo. Eles tornam-se portadores de cargas livres capazes de se movimentar sob a influência do campo elétrico aplicado.

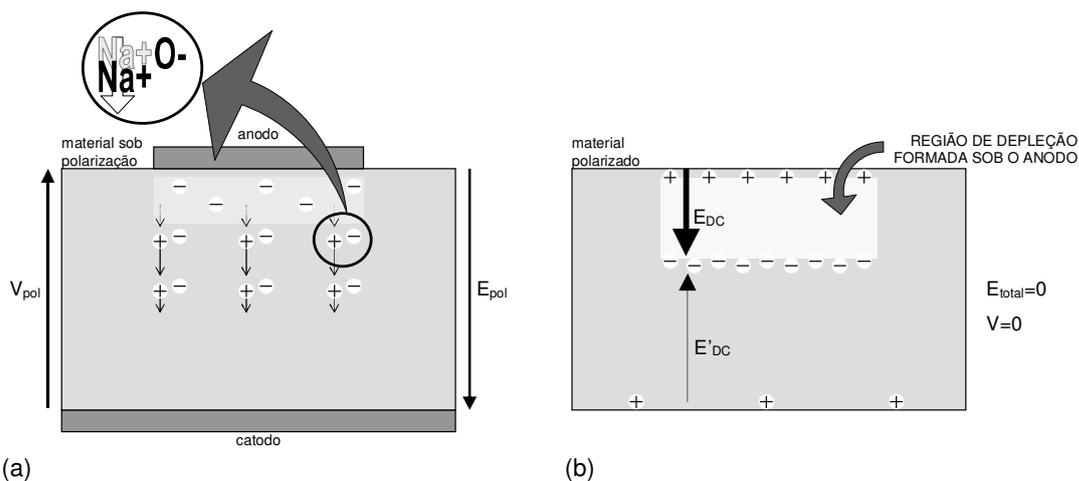


Figura 2. Fenômeno de polarização: (a) migração em bloco de cargas durante a polarização e; (b) região de depleção e campo elétrico DC gravado no material após a polarização.

Considera-se que os íons alcalinos são os principais responsáveis pelo processo (por sua maior mobilidade). Na Figura 2(a) utilizou-se como exemplo íons de sódio, provenientes da presença de Na_2O em um vidro.

A migração iônica faz com que uma região de depleção de íons (camada de depleção) seja formada, ficando limitada aos primeiros poucos micrômetros abaixo da superfície em contato com o anodo. A diminuição da quantidade de íons móveis nessa região faz com que a resistividade elétrica desta camada aumente, concentrando aí o campo elétrico aplicado, progressivamente e desde o princípio do processo.

Alguns estudos [9], [12] concluíram que uma neutralização ocorre na região depletada, embora o mecanismo de neutralização ainda não seja muito claro. Foi proposto que a neutralização na região aconteça devido à emissão de cargas negativas e/ou difusão de íons positivos do ambiente para dentro do material. Essa região de depleção é neutra e termina após uma fina distribuição de cargas negativas. O resto do material continua inalterado. A região de depleção após a polarização está representada na Figura 2(b).

Após o resfriamento, os íons perdem a mobilidade: a região de depleção torna-se permanente, onde um campo elétrico DC intenso fica gravado dentro da amostra, conforme ilustrado na Figura 2(b). O campo máximo que pode ser gravado na amostra está próximo ao valor da rigidez dielétrica do material. Dessa maneira, torna-se limitado o processo de migração dos íons. Entretanto, é possível gravar campos intensos (da ordem de 10^8 V/m) numa região de microns.

Um outro aspecto em relação ao tratamento eletro-térmico é que as características químicas da superfície de vidros podem ser modificadas pelo processo, alterando conseqüentemente as propriedades dielétricas nessa região.

Como já foi discutido, durante o processo, a região abaixo do anodo sofre uma depleção dos íons (*ion depletion*) alcalinos. Essa redução da concentração de íons diminui as perdas do material na faixa de microondas e altera o valor da constante dielétrica – em particular, foi registrado na literatura uma redução da perda e da constante dielétrica no boro-silicato tratado acima de 450°C [6].

2.3. Aplicações da polarização eletro-térmica em óptica e eletrônica

A utilização universal de fibras ópticas de sílica (SiO_2) em sistemas de telecomunicações ópticas gera grande interesse em novos componentes compatíveis com a sílica – em índice de refração, tamanho e estrutura. Esse fato é um grande incentivo à pesquisa de novos componentes construídos em substratos vítreos e também de novos materiais vítreos.

A maioria dos dispositivos ópticos ativos utiliza efeitos não-lineares como princípio de seu funcionamento. Entretanto, o vidro possui simetria de inversão [1], ou seja, as susceptibilidades de ordens pares são nulas e os efeitos ópticos não-lineares como os de soma e diferença de frequências não ocorrem nesses materiais. As questões sobre não-linearidades ópticas não são abordadas neste texto.

Diversos materiais com propriedades ópticas não-lineares têm sido utilizados em opto-eletrônica [13], entre eles alguns cristais ferroelétricos (como o KTP e LiNbO_3) e sistemas semicondutores (como GaAs, InP e InGaAsP). Cabe ressaltar que materiais como o niobato de lítio (LiNbO_3) ainda apresentam dificuldades na interface com a fibra e custo proibitivo para utilização em massa (como em sistemas FTTH – *Fiber-to-the-Home* [14]). Porém, a possibilidade de componentes baseados em sílica fundida traz diversas vantagens, como casamento perfeito do índice de refração com relação às fibras de telecomunicações, baixa atenuação, baixo custo e transparência.

Os tratamentos eletro-térmicos são capazes de modificar as propriedades ópticas e dielétricas de uma região definida do material. Por meio da polarização em vidros, com a gravação de um campo elétrico DC no material, ocorre um processo de retificação da susceptibilidade de terceira ordem, criando uma susceptibilidade de segunda ordem efetiva [7]. Deste modo, permite-se a geração de efeitos ópticos não-lineares de segunda ordem, que alteraram dinamicamente o índice de refração do material na presença de uma tensão aplicada externamente. Esses efeitos são desejáveis para a criação de dispositivos ópticos ativos. Pode-se assim, potencialmente, aproveitar as vantagens dos vidros e da sílica fundida em sua utilização em dispositivos como moduladores e chaves-ópticas.

A partir desse princípio, tem se intensificado o estudo do processo de polarização de vidros, de seus efeitos e métodos de caracterização, visando ao

grande potencial de aplicação em telecomunicações. Diversos materiais têm sido estudados, como a sílica [8], o boro-silicato e o vidro sodo-cálcico (*soda-lime*) [5]. A polarização de materiais poliméricos [11], [15] também está sendo considerada, por apresentarem boas características opto-elétricas e baixo custo de fabricação. Além disso, moduladores eletro-ópticos poliméricos poderiam operar até frequências acima de 40 GHz, oferecendo uma solução potencial para transmissão de microondas sobre fibras ópticas.

Além de materiais volumétricos (*bulk*), a polarização de vidros e polímeros também está sendo aplicada na fabricação de dispositivos ópticos em fibras ópticas [7] e em guias de onda planares [5]. A utilização das técnicas de polarização eletro-térmica na fabricação de dispositivos de microondas parece ser um desdobramento promissor para essa tecnologia.

2.4. Desenvolvimentos recentes em microondas

A pesquisa em estruturas planares e materiais de microondas tem se desenvolvido em diversas direções, visando a atender necessidades genéricas e específicas do estado da arte dos sistemas de telecomunicações. Várias propostas são encontradas na literatura [16], [17], [18], [19], [20], explorando diferentes formas de miniaturização dos circuitos, melhoria de eficiência de acoplamento, aumento de banda ou redução de perdas e de custos.

A utilização de substratos de alta constante dielétrica é uma solução convencional para a redução das dimensões dos circuitos [21], [22], [23]. Porém, conforme a constante dielétrica aumenta alguns valores de impedância se tornam de muito difícil realização prática, pelas reduzidas dimensões transversais.

A utilização de materiais ferroelétricos, como o SrTiO₃ (STO) e o BaSrTiO₃ (BST), vem sendo cada vez mais explorada, pois estes apresentam alta constante dielétrica. Recentemente, foram propostas soluções para miniaturização de circuitos utilizando um filme fino ferroelétrico depositado sob uma linha CPW [24], [25], em uma estrutura multicamada.

Outra característica de materiais ferroelétricos que vem atraindo muita atenção, visando à utilização em microondas, é sua capacidade de sintonização (variação da constante dielétrica) com aplicação de tensões DC de controle [2], [3], [4]. Materiais ferroelétricos como STO e BST podem ter suas propriedades

dielétricas alteradas dinamicamente pela aplicação de uma tensão (normalmente da ordem de dezenas de Volt), e já são propostos na literatura componentes sintonizáveis de microondas em estruturas planares multicamada que se aproveitam dessa propriedade [26], [27], particularmente em linhas CPW [28], [29], [30].

Entretanto, esses materiais ferroelétricos apresentam perda muito elevada (algumas ordens de grandeza superior à da alumina) e suas propriedades dielétricas podem diferir muito dependendo das diversas variáveis envolvidas em sua fabricação e deposição [31] (de fato, esses materiais apresentam difícil controle e baixa reprodutibilidade na fabricação). Por isso, a possibilidade de gerar efeitos de sintonização em substratos convencionais utilizando a polarização eletro-térmica poderá gerar um grande competidor dos materiais ferroelétricos.

Recentemente, passou-se a ter interesse no desenvolvimento integrado de microondas e óptica, que deverá aumentar com o desenvolvimento de sistemas de rádio banda-larga sobre fibra operando até 60 GHz [32]. Esses sistemas requerem a integração de componentes ópticos e de microondas. Isto é, eles utilizam dois tipos de substrato no mesmo encapsulamento (que pode ser de realização difícil e de custo elevado) ou um mesmo substrato para os dois tipos de componente. Neste caso, o candidato a substrato seria naturalmente um vidro (pois os substratos tradicionais de microondas não permitem a realização de guias ópticos).

Vidros como boro-silicato e *soda-lime* apresentam perdas elevadas na faixa de microondas, devido à alta concentração de íons alcalinos, principalmente de sódio, mas também de potássio ou cálcio, dependendo do tipo de vidro. Esse inconveniente pode ser contornado pela depleção de íons provocada pelo tratamento eletro-térmico (seção 2.2), sendo possível reduzir consideravelmente essas perdas [6] em regiões localizadas do substrato. Portanto, parte do substrato pode ser tratada para reduzir localmente as perdas e comportar os circuitos planares de microondas correspondentes. Por outro lado, são mantidas as características ópticas do material nas regiões não tratadas, onde seriam construídos guias de onda e dispositivos eletro-ópticos, no mesmo substrato. A utilização de vidros como substrato para circuitos de microondas abre caminho para uma nova gama de soluções híbridas de óptica e microondas.