

Emprego de Cristais Fotônicos em Sistemas de Microondas e Comunicações Ópticas: Uma Revisão Sobre os Últimos Avanços

Victor Dmitriev, Anderson O. Silva e Marcos B. Costa

Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará (UFPA), Caixa postal 8619, CEP 66075-900, Belém, Pará, Brasil

Resumo — Este artigo corresponde a uma revisão sobre os últimos avanços no desenvolvimento de dispositivos baseados em cristais fotônicos, abrangendo aplicações em sistemas de microondas e redes de comunicações ópticas. São discutidas as vantagens advindas da utilização de redes periódicas em antenas de microfita e filtros, assim como o papel crucial que cristais fotônicos desempenham na evolução dos sistemas ópticos, contribuindo para implementar dispositivos recíprocos e não-recíprocos para controle e roteamento de sinais ópticos. Com esta breve revisão, pretende-se destacar a importância de estruturas periódicas no processo de miniaturização e aumento da escala de integração de circuitos ópticos e de microondas.

Palavras-chaves — cristais fotônicos, circuitos de microondas, dispositivos ópticos.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo das duas últimas décadas, significativos esforços têm sido despendidos na investigação das propriedades eletromagnéticas de materiais de banda fotônica proibida (PBG – *photonic band gap*), conhecidos como cristais fotônicos. A razão para o incremento nas pesquisas desta classe de estruturas deve-se às vantajosas aplicações de redes periódicas em sistemas de microondas e ópticos.

Cristais fotônicos são obtidos a partir da variação periódica da constante dielétrica [1]. As unidades formadoras do cristal possuem dimensões comparáveis ao intervalo de comprimentos de onda no qual é esperada sua operação. Tal periodicidade desempenha para fótons papel análogo ao que o potencial atômico de um cristal semiconductor realiza para elétrons. Como consequência, o conjunto de faixas espectrais para a propagação eletromagnética é discreto devido à formação de bandas proibidas que podem se estender por todas as direções de periodicidade do cristal. A modelagem destas estruturas para a obtenção de bandas fotônicas proibidas, fundamentalmente, permite alcançar considerável grau de eficiência no confinamento, controle e roteamento da propagação eletromagnética. Além disto, outra grande vantagem é a miniaturização de dispositivos cuja funcionalidade é baseada em cristais fotônicos em domínios que vão desde microondas até a banda óptica [1]. Estas características tornaram cristais fotônicos agentes de destaque

no processo de otimização dos sistemas de comunicações ópticas e miniaturização de circuitos ópticos integrados.

Atualmente, cristais fotônicos são empregados em uma grande diversidade de dispositivos, tais como, antenas de microfita, filtros e amplificadores de microondas, moduladores e chaveadores ópticos [2].

As origens das pesquisas sobre cristais fotônicos situam-se na investigação das propriedades eletromagnéticas de filmes multicamadas, as quais são dispostas de acordo com um arranjo periódico (cristal unidimensional) [2]. Nestes materiais, é bem conhecido que certas frequências são permitidas enquanto outras não. No entanto, apesar das propriedades de cristais fotônicos unidimensionais serem compreendidas desde o século XIX, a generalização de redes periódicas para a inibição de propagação eletromagnética espontânea para duas e três dimensões espaciais foi proposta somente em 1970, quando da publicação do trabalho de Bykov [3]. Seguindo um caminho similar, Yablonovitch [4] propôs uma estrutura de rede diamante capaz de gerar uma banda fotônica proibida que se estende ao longo de todas as direções.

Após o trabalho de Yablonovitch, seguiram-se diversas publicações discorrendo sobre as possibilidades de controle da propagação eletromagnética por redes PBG de duas e três dimensões. Inicialmente proposta para a faixa de microondas, a operação destas estruturas foi gradativamente estendida para o domínio óptico mediante a evolução das técnicas de fabricação, tais como métodos de litografia seqüencial [5], holografia paralela [6] e técnica de auto-organização [7]. Soma-se a isto o incremento do suporte a simulações computacionais, o qual também auxilia consideravelmente a investigação das propriedades ópticas de diversas configurações de redes cristalinas [2].

Partindo do contexto acima descrito, este artigo realiza uma revisão sobre os últimos avanços no desenvolvimento de dispositivos baseados em cristais fotônicos, recíprocos e não-recíprocos, para aplicações que abrangem desde sistemas de microondas até redes de comunicações ópticas.

II. APLICAÇÃO DE CRISTAIS FOTÔNICOS EM SISTEMAS DE MICROONDAS

As propriedades de cristais fotônicos têm se mostrado de grande utilidade para aplicações em microondas. Estas estruturas possuem a capacidade de prover profundas e bem definidas bandas de rejeição, assim como suprimir ondas de

Victor Dmitriev, e-mail: victor@ufpa.br, Anderson O. Silva, e-mail: anderson.osilva@gmail.com, Marcos B. Costa, e-mail: marcocosta@ufpa.br, Tel +55-91-32017302.

Este trabalho possui o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

superfície [8]. O emprego de cristais fotônicos em sistemas de comunicações por microondas tem como grandes vantagens a miniaturização e redução do custo de dispositivos.

Em antenas de microfita, estruturas PBG podem suprimir excitação de modos de alta ordem, bem como modos de substrato [9]. Além disto, redes periódicas possibilitam reduzir significativamente a alta impedância de entrada de antenas de microfita na frequência de ressonância, uma característica muitas vezes indesejável para aplicações em sistemas de radar e redes de comunicações móveis [10].

Em [11], é realizada a investigação experimental de duas estruturas de cristal fotônico, denominadas *defect ground structure* (DGS) e *compact microstrip resonant cell* (CMRC), para fins de casamento de impedância e supressão de harmônicos de alta ordem entre uma antena de microfita e a rede de alimentação. A impedância característica da linha de microfita que alimenta a antena é controlada pela adição da indutância efetiva da rede periódica. Um esquema ilustrativo das células unitárias das estruturas DGS e CMRC é mostrado na Fig. 1.

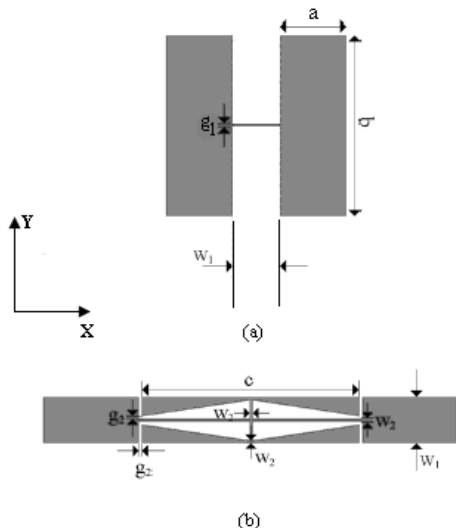


Fig. 1. Vista superior das estruturas (a) DGS e (b) CMRC. Adaptado de [11].

As investigações experimentais das estruturas PBG mostradas na Fig. 1 foram realizadas para uma antena de microfita quadrada de lado igual a 56 mm, alimentada por uma linha de microfita, conforme é ilustrado na Fig. 2.

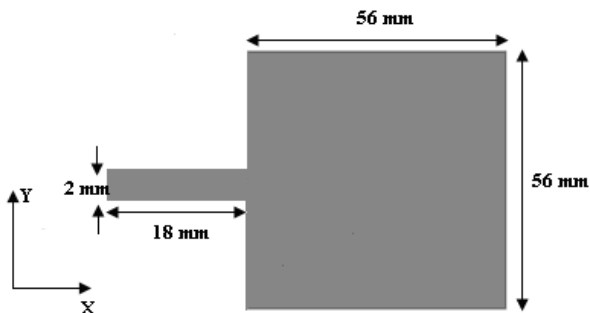


Fig. 2. Antena de microfita com *patch* quadrado utilizada para investigação experimental. Adaptado de [11].

Sem o emprego das estruturas DGS e CMRC, a antena de microfita apresenta frequência de ressonância de 1,78 GHz e largura de banda de 20 MHz para perda de retorno abaixo de -10 dB. A medida do coeficiente de reflexão do segundo harmônico foi de -13,9 dB.

Quando é inserida a estrutura DGS ou CMRC entre a antena e a linha de microfita, a frequência de ressonância sofre um ligeiro desvio em relação ao valor obtido para o caso sem redes periódicas. Quando é utilizada a estrutura DGS, a frequência de ressonância é reduzida para 1,75 GHz. No caso em que é empregada a estrutura CMRC, a frequência de ressonância alcança o valor de 1,81 GHz. A largura de banda medida para estes dois casos permaneceu constante em 20 MHz, considerando como nível de referência -10 dB. Com o emprego de uma célula unitária DGS ou CMRC, é possível alcançar o casamento de impedância entre a alimentação e a entrada da antena de microfita. Além disto, é suprimida a frequência de ressonância do segundo harmônico, uma característica bastante atrativa para miniaturização e redução de custo de fabricação de circuitos ativos de microondas.

Outro ponto de destaque é a melhor performance de filtros de microondas quando são utilizados cristais fotônicos no corpo destes dispositivos. Em [12], é demonstrado que o emprego de cristais fotônicos na estrutura de filtros HTS (*high temperature superconducting*) permite superar características que são limitações para o efetivo uso destes filtros em sistemas de microondas.

Filtros HTS possuem baixas perdas, no entanto, apresentam a limitação de concentrar corrente nas fronteiras do filme supercondutor. Uma redução significativa desta concentração pode ser alcançada utilizando um ressonador circular, entretanto, são requeridas extensas áreas para conseguir uma redução satisfatória da corrente. Em [12], um cristal fotônico é utilizado para reduzir o tamanho de um filtro HTS baseado em um ressonador circular. A estrutura periódica deste filtro é obtida perfurando anéis circulares em torno do círculo interior do ressonador em anel do filme YBCO (*yttrium barium cooper oxide*) depositado em um substrato de LaAlO_3 de 5 mm de espessura. A geometria do filtro HTS é mostrada na Fig. 3.

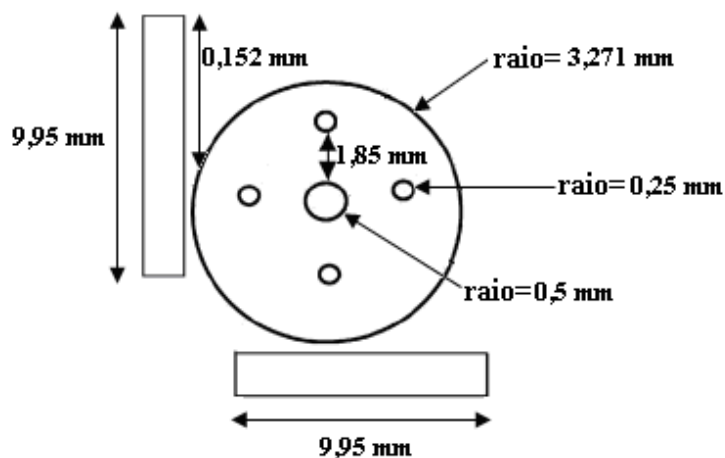


Fig. 3. Estrutura de cristal fotônico para o filtro HTS. Adaptado de [12].

As tabelas I e II descrevem as principais características de operação obtidas para o filtro HTS, respectivamente, por simulação computacional e experimentalmente.

TABELA I. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO FILTRO HTS INVESTIGADO EM [12]. RESULTADOS TEÓRICOS.

Parâmetros	Valores
Frequência central de operação	12 GHz
Largura de banda	50 MHz
Perda de retorno (S_{11})	-0,5 dB

TABELA II. PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO FILTRO HTS INVESTIGADO EM [12]. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Parâmetros	Valores
Frequência central de operação	12,23 GHz
Largura de banda	45 MHz
Perda de retorno (S_{11})	-0,5 dB

Os exemplos acima descritos mostram que o emprego de cristais fotônicos em dispositivos que operam no domínio das microondas permitiu avançar no processo de miniaturização e redução dos custos destes sistemas. A utilização de redes PBG seja no substrato ou na linha de alimentação de antenas de microfita, assim como para implementar filtros, torna possível melhorar as características de operação acompanhado pela redução das dimensões destes dispositivos, o que tem como consequência, aumentar a escala de integração em circuitos de microondas.

O escalonamento das dimensões de redes cristalinas para a região óptica do espectro eletromagnético também tem propiciado uma revolução em sistemas de comunicações. Suas aplicações compreendem desde guias ópticos com elevado grau de confinamento até lasers em escalas próximas do limite de difração. A seção a seguir é dedicada a uma breve revisão sobre os últimos avanços no desenvolvimento de dispositivos ópticos baseados em cristais fotônicos.

III. APLICAÇÃO DE CRISTAIS FOTÔNICOS EM DISPOSITIVOS ÓPTICOS

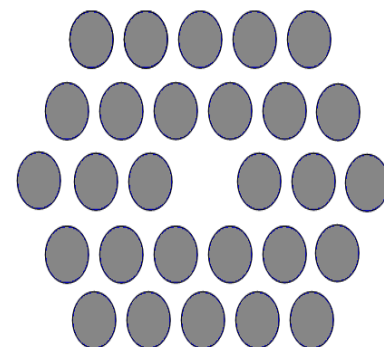
Em sistemas de comunicações ópticas, cristais fotônicos têm se mostrado cruciais no desenvolvimento, miniaturização e consequente aumento da densidade de integração de circuitos optoeletrônicos. A importância destas estruturas reside não somente no controle da propagação de sinais ópticos por meio da existência de uma banda proibida para fótons, mas também nas propriedades únicas obtidas com a variação do PBG da rede cristalina.

No campo de guias ópticos, o emprego de redes periódicas tornou possível rotear a luz por curvaturas a elevado confinamento e baixas perdas, apresentando-se como alternativa para a interconexão entre dispositivos optoeletrônicos [13]. O sucesso da aplicação de cristais fotônicos como guias ópticos trouxe como consequência a miniaturização e elevação da performance de diversos

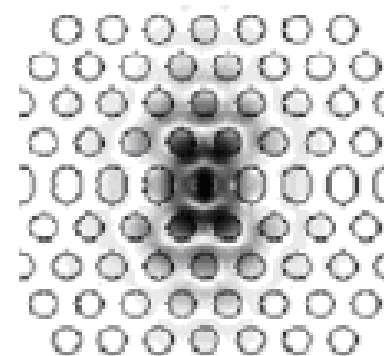
dispositivos, como divisores de potência óptica, filtros *add/drops* e chaveadores, o que significou um grande passo na evolução dos circuitos de óptica integrada [14]-[15].

Estruturas de cristal fotônico também se mostram bastante atrativas para o desenvolvimento de microcavidades, componentes essenciais para a implementação de lasers. O conceito de fabricação de uma microcavidade óptica empregando cristais fotônicos possui como grande vantagem a obtenção de paredes altamente refletoras com a utilização de materiais com perdas relativamente baixas [16]. Uma microcavidade pode ser obtida em um cristal fotônico inserindo um defeito na rede cristalina, como é exemplificado na Fig. 4. A taxa de emissão espontânea pode ser consideravelmente ampliada por meio do efeito Purcell, alcançando tempos de resposta da ordem de 1,0 ps.

Em [16], são destacadas as potenciais aplicações de lasers baseados em cristais fotônicos para miniaturização e aumento da eficiência de chaveadores ópticos e sistemas de processamento de sinais. Lasers de cristal fotônico possibilitam obter volume modal próximo do limite de difração, o que, por sua vez, aumenta o fator de Purcell, gerando oportunidades de incrementar a velocidade de chaveamento e a sensibilidade de sistemas de sensoriamento óptico. Na Fig. 4 (a), é ilustrada uma microcavidade obtida a partir da retirada de um disco da estrutura cristalina de célula unitária retangular. Na Fig. 4 (b) é mostrado o confinamento óptico nesta cavidade.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Microcavidade de cristal fotônico obtida pela remoção de um disco circular da rede periódica triangular. (b) Confinamento óptico nesta cavidade. Adaptado de [16].

Em [17], é descrito o primeiro experimento bem sucedido da operação em onda contínua de uma microcavidade de

crystal fotônico à temperatura ambiente. A microcavidade de cristal fotônico consiste de um arranjo triangular de perfurações circulares em uma fina camada de GaInAsP, conforme é ilustrado na Fig. 5. O dispositivo fabricado possui um fator de qualidade de 20000 e um efetivo limiar de *lasing* da ordem de $1,2 \mu\text{W}$.

Além da obtenção de eficientes fontes ópticas, um dos desafios fundamentais para o desenvolvimento de circuitos ópticos integrados é prover isolamento de sinais e suprimir reflexões parasitas entre dispositivos. Esta é a motivação para o grande interesse na miniaturização de dispositivos ópticos não-recíprocos. Neste contexto, cristais fotônicos se constituem em uma alternativa promissora, pois permitem ampliar efeitos magneto-ópticos em dimensões ultracompactas.

Em [18], é descrita a operação de um circulador de quatro portas obtido a partir de uma estrutura de cristal fotônico. A rede cristalina contém um defeito onde é inserido um material magneto-óptico. Com este arranjo, os modos da cavidade de cristal fotônico se tornam modos circulares que rotacionam em direções opostas a diferentes frequências. Desta forma, basicamente, um sinal óptico proveniente de uma porta, ao incidir na cavidade que contém o material magneto-óptico, é rotacionado e transferido completamente para outra porta ao entrar em ressonância com a frequência do modo de cavidade. No cenário oposto, entretanto, tal efeito não ocorre, haja vista que o modo de cavidade que rotaciona no sentido contrário possui frequência diferente.

Cristais fotônicos magnéticos podem ainda ser usados para aplicar a idéia de redes ópticas dinâmicas, isto é, modulação das propriedades da rede cristalina enquanto o fóton se encontra no interior do cristal [18]. Com isto, o espectro do pulso de luz pode ser modificado quase que arbitrariamente em uma estrutura com baixo contraste de índice de refração, o que traz interessantes possibilidades para o processamento de sinais ópticos. Para exemplificar, cita-se a compressão do espectro do sinal, resultando em processo totalmente óptico de armazenamento de fótons, assim como inversão do pulso para obtenção de operação em tempo reverso. A utilização de cristais fotônicos para armazenamento de fótons significa um passo crucial para o desenvolvimento de memórias ópticas, pois, além de se apresentarem prontamente integráveis aos sistemas optoeletrônicos atuais, também estão aptos para aplicações em tarefas de processamento de sinais ópticos em circuitos ultracompactos.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foi realizada uma discussão sobre os recentes desenvolvimentos no campo de cristais fotônicos. Foram discutidos exemplos de aplicação de redes periódicas em dispositivos para operação no regime das microondas e na faixa óptica. Através destes exemplos, buscou-se evidenciar a importância do emprego de cristais fotônicos para melhorar a performance de sistemas de comunicações. Em dispositivos que operam no domínio das microondas, as propriedades de estruturas PBG têm se consolidado como úteis na implementação de filtros e antenas de microfita, permitindo melhorar significativamente os parâmetros de transmissão e recepção de sinais, tanto em termos de largura de banda, quanto em termos de minimização de perdas. Em comunicações ópticas, cristais fotônicos têm se mostrado

cruciais para o desenvolvimento de guias, filtros e fontes ópticas, assim como permitir a intensificação de efeitos magneto-ópticos para funções de isolamento de sinais de luz e armazenamento de fótons, o que, por sua vez, torna possível obter circuladores, moduladores e memórias totalmente ópticas. Todas estas características são englobadas por uma vantagem ainda maior, a miniaturização e conseqüente aumento da escala de integração de circuitos optoeletrônicos e de microondas. Fundamentando-se neste cenário, e diante das perspectivas promissoras de novos segmentos tecnológicos da fotônica, como a nanoplasmônica, por exemplo, é esperado que as propriedades únicas inerentes aos cristais fotônicos para o controle e roteamento de fótons possam ser levadas para dimensões em nanoescala, contribuindo para a efetiva implementação de circuitos nano-ópticos com a escala de integração comparável à dos modernos circuitos eletrônicos. Esta evolução traz, por sua vez, parâmetros de qualidade sem precedentes para os processos de transmissão e processamento de dados.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Joannopoulos, R. Meade and J. Winn, *Photonic Crystals – Molding the Flow of Light*, Princeton: Princeton University Press, 1995.
- [2] K. Inoue and K. Ohtaka, *Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications*, New York: Springer Verlag, 2004.
- [3] V. Bykov, "Spontaneous emission in periodic structure", *Sov. Phys. JETP*, vol. 35, pp. 269-273, 1972.
- [4] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter, "Donor and acceptor modes in photonic band structures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, No 24, pp. 3380-3383, 1991.
- [5] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap", *App. Phys. Lett.*, vol. 67, No 22, pp. 3490-3492, 2000.
- [6] M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harisson, R. G. Denning and A. J. Turberfield, "Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holography lithography", *Nature*, vol. 404, No 2, pp. 53-56, 2000.
- [7] B. A. Parviz, D. Ryan and G. M. Whitesides, "Using self-assembly for the fabrication of nanoscale electronic and photonic devices", *IEEE Trans. on Adv. Pack.*, vol. 26, No 3, pp. 233-241, 2003.
- [8] J. Sor, Y. Qian and T. Itoh, "Miniature low-loss CPW periodic structures for filter applications", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 49, No 12, pp. 2336-2341, 2001.
- [9] Y. Horri and M. Tsutsumi, "Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna", *IEEE Microw. Guid. Lett.*, vol. 9, No 1, pp. 13-15, 1999.
- [10] Y. J. Sung, C. S. Ahn and Y. S. Kim, "Size reduction and harmonic suppression of rat-race hybrid coupler using defect ground structure", *IEEE Microw. Wirel. Comp. Lett.*, vol. 14, No 1, pp. 7-9, 2004.
- [11] Y. J. Sung and Y. S. Kim, "An improved design of microstrip patch antennas using photonic bandgap structure", *IEEE Trans. on Ant. And Propag.*, vol. 53, No 5, pp. 1799-1804, 2005.
- [12] H. F. Huang, J. F. Mao and Z. H. Luo, "Novel miniature high power ring filter", *Physica C*, vol. 420, pp. 125-129, 2005.
- [13] S. Fan, M. F. Yanik, Z. Wang, S. Sandhu and M. L. Povinelli, "Advances in theory of photonic crystals", *Journal of Lightwave Tech.*, vol. 21, No 12, pp. 4493-4501, 2006.
- [14] M. Qiu, M. Mulot, M. Swillo, S. Anand, B. Jaskorzynska, A. Karlsson, M. Kamp and A. Frochel, "Photonic crystal optical filter based on contradirectional waveguide coupling", *Apply. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 5121-5123, 2003.
- [15] E. A. Camargo, H. M. H. Chong and R. M. Rue, "2D photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure", *Opt. Exp.*, vol. 12, pp. 588-592, 2004.
- [16] A. Scherer, O. Painter, Z. Zhang, Y. Qiu and T. Yoshie, "Photonic crystal lasers", *IEEE Photonics in Switching*, pp. 107-108, 2007.
- [17] K. Nozaki, S. Kita and T. Baba, "Room temperature continuous wave operation and controlled spontaneous emission in ultrasmall photonic crystal nanolaser", *Opt. Exp.*, vol. 15, No 12, pp. 7506-7514, 2007.
- [18] S. Fan, "Manipulating light with photonic crystals", *Physica B*, vol. 394, pp. 221-228, 2007.