

Análise dos Efeitos dos Parâmetros do Cristal Fotônico 2D sobre suas Bandas Proibidas

Aldilene O. Maia, Marcelo B. da S. Dias, Marcos E. C. Garcia, José F. S. de Almeida e Carlos L. da S.S. Sobrinho

Resumo—Um estudo qualitativo dos efeitos das modificações dos parâmetros independentes de uma rede cristalina fotônica, sobre sua configuração de bandas proibidas, foi desenvolvido a partir da análise do perfil de transmissão de um filtro de microfita PBG. Alterou-se a geometria, o contraste dielétrico e o tamanho da rede, catalogando-se as diversas conclusões para referência em projetos com esta tecnologia. Tal problema aberto de espalhamento eletromagnético do filtro foi resolvido numericamente, por meio de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), com truncagem por camada perfeitamente casada uniaxial (UPML).

Palavras-Chave—Meio absorvente, método FDTD, filtros de microfita, filtros de microonda, medição do coeficiente de transmissão.

Abstract—A qualitative study of the effects caused by adjusting the independent parameters of a photonic crystal lattice on its bandgaps disposal was developed from the transmission profile analysis of a PBG microstrip filter. It was modified the lattice geometry, dielectric contrast and size, and the different conclusions were classified to be referenced in designs with this technology. Such electromagnetic scattering open problem of the filter was numerically solved through finite-difference time-domain (FDTD) with truncation by uniaxial perfectly matched layer (UPML).

Keywords—Absorbing media, FDTD methods, microstrip filters, microwave filters, transmission coefficient measurement.

I. INTRODUÇÃO

Um cristal fotônico 2D pode ser usado para suprimir as frequências indesejadas em dispositivos de microondas [1], [2]. De acordo com as faixas de frequência a serem evitadas, as variáveis independentes da rede, tais como geometria, contraste dielétrico e tamanho, devem ser ajustadas. A primeira é a disposição geométrica dos bastões na célula unitária do cristal, a segunda é a razão entre a constante dielétrica dos bastões e a do substrato e a última é a quantidade de células unitárias na rede cristalina. Assim, o mapa de bandas proibidas do cristal é alterado de acordo com a escolha desses parâmetros.

O principal objetivo deste trabalho é analisar qualitativamente a influência destas mudanças sobre as zonas proibidas do cristal, servindo como uma interessante

Aldilene O. Maia, Marcelo B. da S. Dias, Marcos E. C. Garcia, José F. S. de Almeida e Carlos L. da S. S. Sobrinho, Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, E-mails: aldilene@lane.ufpa.br, marcelo@lane.ufpa.br, marcos@lane.ufpa.br, felipe@prof.iesam-pa.edu.br, leonidas@lane.ufpa.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPQ.

referência para projetos com esta tecnologia. Isto foi feito, a partir da análise do perfil de transmissão de um filtro PBG. Para se avaliar cada parâmetro, foram realizadas diversas simulações de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) 3D em coordenadas retangulares [3], por meio de softwares desenvolvidos no Laboratório de Análise Numérica em Eletromagnetismo (LANE). O volume numérico foi truncado pela camada perfeitamente casada uniaxial (UPML) [4]. A avaliação do coeficiente S_{21} do dispositivo definiu os efeitos da manipulação da rede cristalina em cada caso.

II. O FILTRO PBG

O dispositivo estudado era um esquema composto por uma microfita de 50Ω impressa num substrato formado por uma estrutura periódica fotônica 2D de bastões cilíndricos, imersa num meio dielétrico de duroid, tudo sobre um plano metálico (plano de terra) [5], como mostrado na Figura 1.

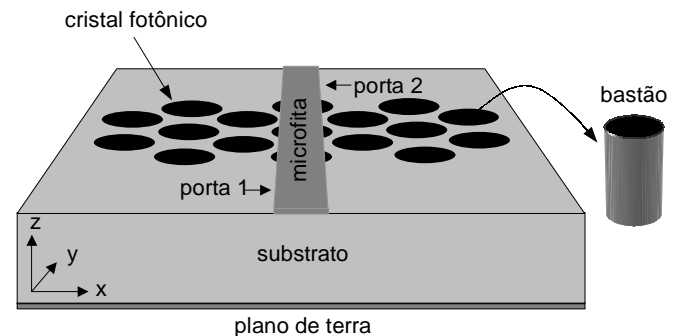


Fig. 1. Filtro PBG avaliado nos experimentos. A porta 1 é a região antes da rede cristalina fotônica e a porta 2 é a região após a mesma, ambas entre a microfita e o plano de terra.

A microfita foi impressa sobre a coluna central de bastões da rede cristalina e um pulso Gaussiano com largura $T = 16,67\text{ps}$, correspondendo a uma largura espectral de 30GHz [6], foi excitado na porta 1 da maneira mostrada em [2]. O sinal coletado na porta 2 foi analisado na frequência, através de sua transformada de Fourier, e o coeficiente S_{21} calculado forneceu informação de 0 a 20GHz [2]. Através da plotagem de S_{21} pode-se encontrar as bandas proibidas da estrutura e medir-se suas larguras de banda (BW). O ponto de menor transmissão ocorre na frequência central (f_c). A frequência inferior e a frequência superior são dadas no ponto imediatamente anterior e posterior à frequência central, respectivamente, onde a transmissão decai 3dB [7]:

$$BW(\%) = 100 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \tag{2}$$

onde f_H é a frequência superior da banda proibida e f_L é a frequência inferior da banda proibida.

A. Projeto

Os bastões cilíndricos tiveram seção transversal de raio $r = 1,805\text{mm}$, altura $h = 0,794\text{mm}$ e constante de rede $a = 4,8\text{mm}$. Assim, a razão r/a foi de 0,376 (com 51% de fator de preenchimento). A microfita de 50Ω teve largura ajustada para 2,46mm e comprimento igual ao do substrato. O comprimento e a largura do substrato foram alterados de acordo com a simulação.

B. Considerações Numéricas

Na simulação FDTD em coordenadas retangulares, cada bastão foi representado por um prisma reto de base quadrada com mesmo volume do bastão cilíndrico. Isso foi feito através de uma equivalência entre as seções transversais dos dois tipos de bastões, determinando-se o lado correspondente da base quadrada:

$$l = r\sqrt{\pi} \tag{3}$$

Assim, o fator de preenchimento (e, conseqüentemente, o mapa de bandas proibidas) da rede de bastões quadrados, manteve-se próximo do valor da rede de bastões cilíndricos. Portanto, os elementos da rede com 1,805mm de raio foram simulados com bastões de base quadrada de lado $l = 3,2\text{mm}$.

A discretização do problema respeitou os limites de dispersão numérica ($\Delta c = \lambda_{min}/20$, onde $c = x, y$ ou z e $\lambda_{min} = l$). Com isso, no domínio discreto: $l = 20\text{cel}$, $a = 30\text{cel}$ ($\Delta x = \Delta y = 0,16\text{mm}$) e $h = 5\text{cel}$ ($\Delta z = 0,1588\text{mm}$); a largura da linha foi 16cel (2,56mm), modificando sua impedância para 48,46 Ω . A microfita e o plano de terra foram considerados condutores elétricos perfeitos (PECs).

O tamanho total do volume numérico levou em conta, o dispositivo, a região de truncagem e alguma porção de ar h_{ar} acima do filtro. A UPML usada com espessura de $n_c = 10\text{cel}$, não foi necessária no lado inferior do volume numérico por causa da existência do plano de terra metálico, que truncou naturalmente o volume nesta face. Assim, o tamanho da malha na direção z foi fixado em 20cel ($h + h_{ar} + n_c$), enquanto nas direções x e y foi alterado de acordo com o experimento.

Em todas as simulações, o plano da fonte [2] foi colocado na célula logo após a UPML ($j_{fonte} = n_c + 1$). As posições da excitação (na porta 1) e do ponto de coleta da tensão transmitida (na porta 2) foram distanciados 10 células da rede fotônica (Figura 2).

III. RESULTADOS

Em todas as simulações, as dimensões dos bastões e da constante da rede foram mantidos. Isto assegurou uma avaliação consistente dos experimentos, fazendo com que os

resultados se concentrassem na faixa de interesse (0 a 20GHz). Essa possibilidade advém de uma característica particular dos cristais fotônicos: impedir a propagação eletromagnética de comprimentos de onda na ordem de dimensão dos elementos de suas redes cristalinas.

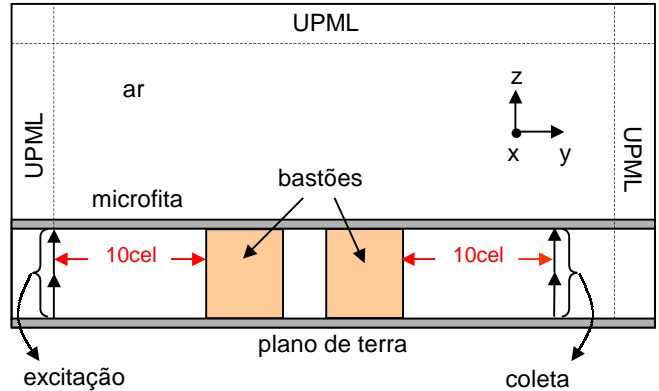


Fig. 2. As posições da fonte e da coleta de tensão.

A. Tamanho da Rede

O cristal fotônico de rede quadrada do filtro PBG foi gradualmente aumentado (Figura 3). Um número de colunas na direção x (transversal em relação à microfita) era mantido constante, enquanto o número de linhas de bastões na direção y (longitudinal à microfita) era variado.

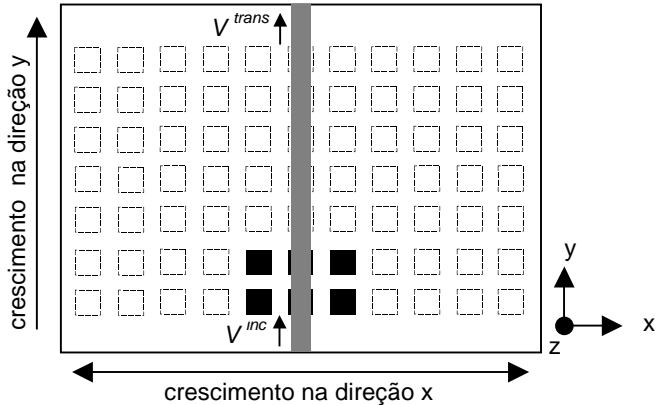


Fig. 3. Sentido de crescimento da rede. Os quadrados tracejados representam os bastões incluídos no cristal durante o experimento.

Os números de camadas simulados foram 3, 5, 7, 9 e 11, na direção x , e 2 a 7, na direção y . A constante dielétrica relativa dos bastões foi de 10,2.

O crescimento da rede no sentido longitudinal aumentou a atenuação em torno das frequências de corte centrais, a largura de banda do filtro e a ondulação na banda passante do perfil de transmissão (Figura 4). No sentido transversal, além do crescimento do nível de atenuação da transmissão nas frequências de corte, ocorreu uma pequena realocação da curva S_{21} (Figura 5).

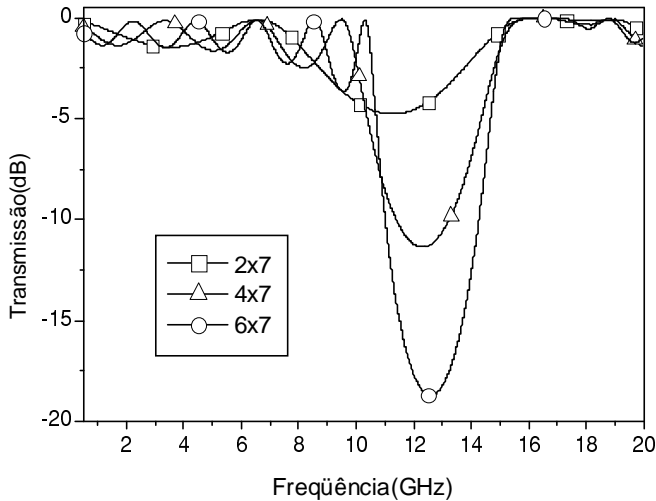


Fig. 4. A curva de transmissão do filtro para alguns tamanhos da rede e a influência do crescimento longitudinal.

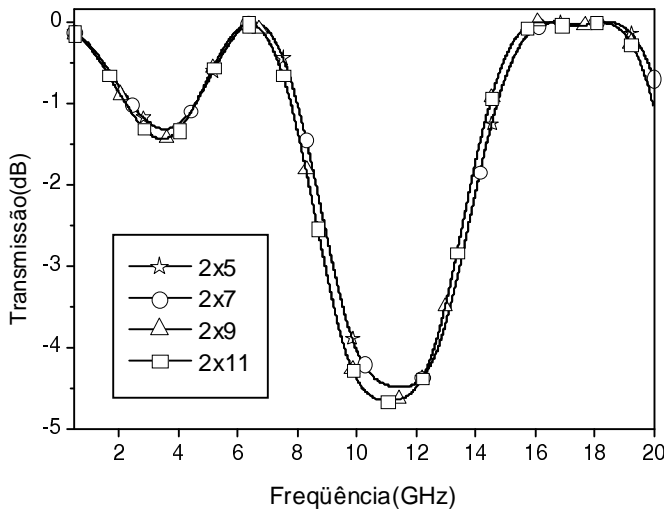


Fig. 5. A influência do crescimento transversal na transmissão do filtro. O deslocamento do perfil ocorre apenas após dois aumentos consecutivos do número de camadas da rede.

B. Contraste Dielétrico do Cristal

O coeficiente de transmissão foi calculado para a mesma configuração mostrada na Figura 3, porém para uma rede fixa de dimensões 6 x 7 (linhas x colunas). Aumentou-se uniformemente a constante dielétrica dos bastões, enquanto manteve-se o mesmo dielétrico de fundo do substrato. Os contrastes testados ($\epsilon_{bast}/\epsilon_{subs}$) são mostrados na Tabela I.

TABELA I
CONTRASTES TESTADOS

ϵ_{bast}	$\epsilon_{bast}/\epsilon_{subs}$
3,6	1,6364
4,2	1,9091
7,0	3,1818
11,0	5,0
13,6	6,1818

O aumento do contraste deslocou as zonas proibidas da

transmissão para faixas de frequências menores, ao mesmo tempo em que a atenuação em torno das respectivas frequências centrais foi aumentada (Figura 6).

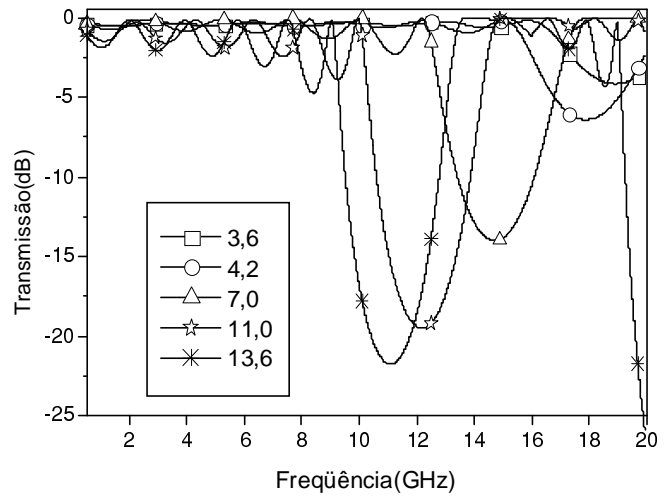


Fig. 6. A evolução do perfil de transmissão do filtro com a variação do contraste dielétrico.

C. Geometria da Rede

Neste experimento, a transmissão foi medida para três tipos diferentes de geometrias de rede: quadrada, triangular e hexagonal (Figura 7). Foram considerados bastões com $\epsilon_{bast} = 10,2$. Para manter-se uma base de comparação, as redes cristalinas simuladas foram ajustadas para terem o mesmo número de células unitárias nas direções x e y.

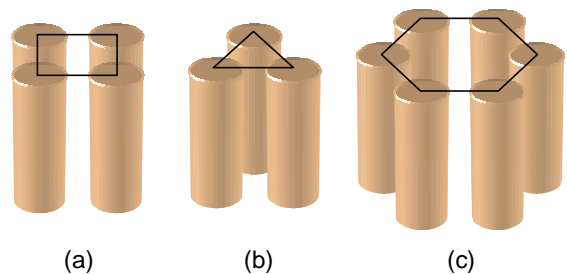


Fig. 7. As geometrias avaliadas: (a) quadrada; (b) triangular; (c) hexagonal.

As geometrias apresentaram diferentes características de transmissão, a mais importante foi a posição das bandas proibidas. A geometria hexagonal apresentou uma banda proibida em frequências mais baixas que a da rede quadrada, enquanto, a geometria triangular mostrou um perfil com bandas proibidas em frequências mais altas que a rede quadrada (Figura 8).

Os diferentes níveis de atenuação entre os coeficientes de transmissão das três geometrias, ocorrem, porque redes com mesmo número de células unitárias de diferentes geometrias possuem tamanhos diferentes. Assim, a rede hexagonal é maior que a rede quadrada correspondente, que é maior que a rede triangular. Isso aumenta o nível de atenuação das bandas proibidas, como visto na seção A do item III.

TABELA II
RESUMO DE RESULTADOS

Variáveis Independentes do Cristal Fotônico	Efeitos sobre o Parâmetro S_{21}
Tamanho da Rede	Varia a atenuação nas frequências de corte das bandas proibidas e aumenta suas larguras de banda.
Contraste Dielétrico do Cristal	Seu aumento desloca as bandas proibidas para frequências centrais mais baixas, aumentando seu nível de atenuação.
Geometria da Rede	Altera o mapa de bandas proibidas do cristal fotônico.

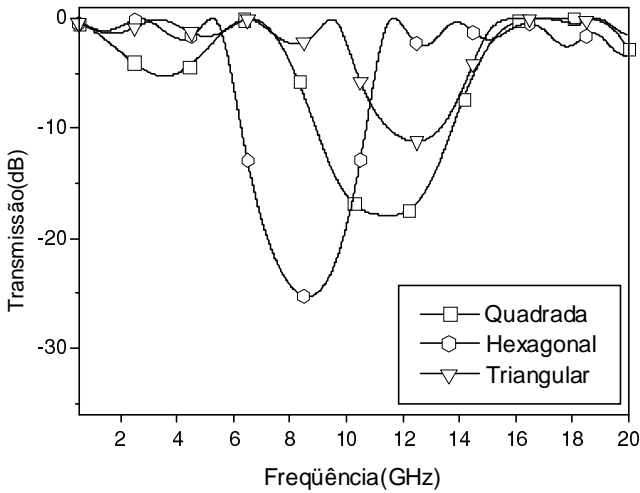


Fig. 8. As diferentes características de transmissão do filtro PBG para três tipos de geometria de rede.

D. Rede Triangular: Um Caso Particular

A célula unitária da geometria hexagonal pode ser considerada como possuindo um bastão central com permissividade dielétrica relativa diferente dos outros à sua volta (Figura 9).

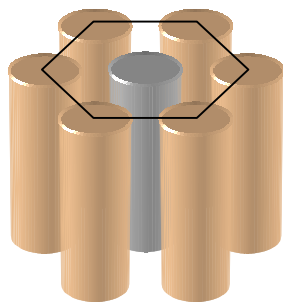


Fig. 9. Célula unitária hexagonal geral.

Na seção anterior, considerou-se um caso particular em que este bastão central era feito do mesmo material onde a rede estava imersa ($\epsilon_{\text{duroid}} = 2,2$). Também, quando este bastão central é composto do mesmo material dos outros, forma-se a rede triangular que, dessa maneira, pode ser considerada um caso particular da hexagonal.

Para confirmação desta idéia, a rede hexagonal foi

simulada variando-se a permissividade relativa dos seus bastões centrais de $\epsilon_{\text{subs}} = 2,2$ (duroid) até o valor dos outros bastões, $\epsilon_{\text{bast}} = 10,2$ (Figura 10).

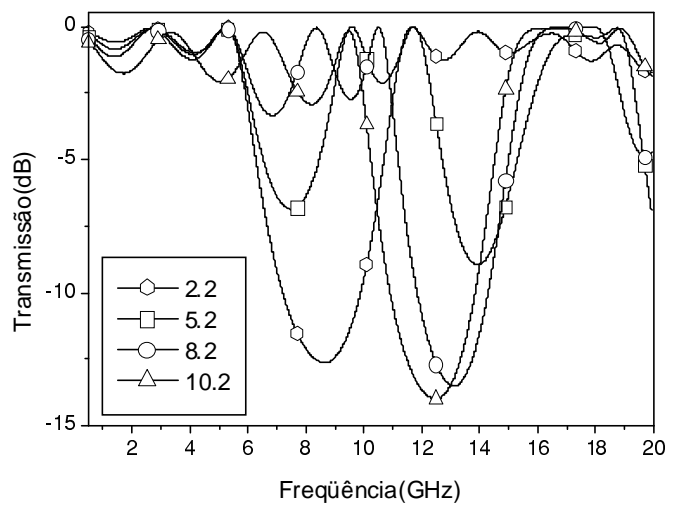


Fig. 10. Efeito da variação da permissividade do bastão central. O perfil de transmissão converge para a da rede triangular.

A curva de transmissão da rede hexagonal convergiu ao perfil da rede triangular deslocando a zona proibida de uma faixa de frequência mais baixa para frequências superiores, passando por diversos perfis de transmissão com características intermediárias entre as duas geometrias.

IV. CONCLUSÕES

Apesar de cristais fotônicos ideais possuem redes periódicas infinitas e atenuação máxima de sinal em suas zonas proibidas, os resultados condensados na Tabela II podem ser usados como suporte no projeto de dispositivos PBG reais com o tipo de cristal 2D analisado.

O primeiro e o último resultado servem para qualquer tipo de geometria de rede, apesar de terem sido obtidos com a rede de célula unitária quadrada. O aumento da atenuação, mostrado no primeiro experimento, pode ser usado em circuitos seletivos em frequência, por exemplo, enquanto a variação do contraste dielétrico é útil no “ajuste fino” das bandas proibidas. Além do mais, o aumento da ondulação nas frequências de banda passante da transmissão, pode ser melhorado com o aumento da rede cristalina nas direções

regulares de periodicidade da estrutura. As lacunas de transmissão das diferentes geometrias, obtidas no penúltimo experimento, podem ser misturadas para manterem-se e/ou evitarem-se características particulares das mesmas, como visto no último experimento, em que se demonstrou a potencialidade de conseguir-se perfis de S_{21} intermediários entre duas geometrias.

Todos estes efeitos podem ser usados em conjunto para obter-se as características de transmissão desejadas do cristal fotônico, de maneira rápida e eficiente, nos projetos de dispositivos para os mais diversos propósitos.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Rumsey, M. Picket-May e P. K. Kelly, "Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 336-338, Outubro 1998.
- [2] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra e J. A. Kong, "Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 38, no. 7, pp. 849-857, Julho 1990.
- [3] A. Taflove e S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time Domain Method*, New York: Artech House, 2000.
- [4] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices," *IEEE Trans. Antennas & Propagat.*, vol. 44, no. 12, pp. 1630-1639, Dezembro 1996.
- [5] Y. Qian, V. Radisic e T. Itoh, "Simulation and experiment of photonic band-gap structures for microstrip circuits," *1997 Asia Pacific Microwave Conference*, pp. 585-588, 1997.
- [6] X. Zhang e K. K. Mei, "Time-domain finite-difference approach to the calculation of the frequency-dependent characteristics of microstrip discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 36, no. 12, pp. 1775-1787, Dezembro 1988.
- [7] A. D. Sedra e K. C. Smith, *Microeletrônica*, 4ª edição, Makron Books, pp. 829-836, 2000.