

Circulador de três portas baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite

Victor Dmitriev, Leno Martins e Erik Chagas

Resumo— Nós propomos um circulador baseado em cristal fotônico com núcleo de hexaferrite para região de THz. Algumas peculiaridades do projeto são destacadas e é sugerido um método analítico aproximado de projeto de ressonadores de hexaferrite. Na frequência central de 102 GHz, o circulador projetado possui uma largura de banda operacional de cerca de 1,4 GHz, considerando um nível de isolamento de -15 dB e perdas de inserção melhores que -1 dB. O circulador possui uma estrutura muito simples e compacta.

Palavras-Chave— Dispositivos não recíprocos, cristais fotônicos, circulador, hexaferrite.

Abstract— We propose a hexaferrite core-based photonic crystal circulator for THz region. Some findings from the project are highlighted and an approximate analytical method for designing hexaferrite resonators is suggested. At the center frequency of 102 GHz, the designed circulator has an operating bandwidth of about 1.4 GHz, considering an isolation level of -15 dB and insertion losses better than -1 dB. The circulator has a very simple and compact structure.

Keywords— Nonreciprocal devices, Photonic Crystals, Circulator, Hexaferrite

I. INTRODUÇÃO

Entre os componentes não recíprocos de micro-ondas e ondas milimétricas, os circuladores com ferrite em guias de ondas metálicos e em microfita de junção Y são os mais frequentemente usados [1], [2]. Eles possibilitam a transmissão de sinal de uma porta para outra porta adjacente, enquanto a terceira porta é isolada da porta de entrada. Os circuladores são usados, por exemplo, em radares como duplexadores e em muitos sistemas de comunicação, protegendo fontes de sinais contra reflexões prejudiciais a outros elementos do circuito.

A fim de fornecer as propriedades necessárias do material de ferrite macia, um campo magnético externo é aplicado usando ímãs permanentes. Esses ímãs são volumosos e pesados. A remoção de tais ímãs permite reduzir as dimensões, o peso e o custo dos dispositivos não recíprocos. Para tanto, são utilizadas as chamadas ferrites autopolarizadas de bário tipo $M BaFe_{12}O_{19}$ e de estrôncio $SrFe_{12}O_{19}$ e suas modificações [3]. Devido aos grandes campos de anisotropia uniaxial eles se comportam como ímãs permanentes permitindo excluir o sistema magnético externo dos circuladores.

Victor Dmitriev, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, e-mail: victor@ufpa.br; Leno Martins, Departamento de Sistemas Computacionais e Infraestrutura, Universidade do Estado do Pará, Belém-PA, e-mail: lenormartins@gmail.com; Erik Chagas Rozal, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, e-mail: erik.chagas.rozal@gmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq).

Historicamente, um dos primeiros artigos sobre circuladores que não precisam de uma fonte de magnetização externa para funcionar foi publicado há cerca de 50 anos, em 1974 [4]. Os autores apresentaram um circulador Y formado pela junção de guia de ondas, operando na frequência de 73,5 GHz. Mais tarde, em 1992 [5], foi proposto um circulador de microfita baseado em ferrite hexagonal com frequência central de 37,48 GHz. Os primeiros circuladores sem ímã possuíam perdas de inserção relativamente altas e banda de frequência estreita. Resultados experimentais para circuladores de microfita sem ímã na região milimétrica são fornecidos em [6].

Até onde sabemos, os circuladores de hexaferrite baseados em cristal fotônico (PhC) e sem ímã ainda não foram discutidos na literatura. Neste artigo, apresentamos a análise e o projeto teórico de um desses circuladores para a região de ondas milimétricas. Propomos o componente de três portas baseado em PhC com modo ressonante dipolo do cilindro de hexaferrite. Este circulador deve operar na banda W onde existe a janela de frequência atmosférica caracterizada por baixas perdas. Sugerimos um método analítico para o projeto do ressonador e discutimos as respostas em frequência calculadas do circulador. Os resultados numéricos são obtidos utilizando o software COMSOL Multiphysics que se baseia no Método dos Elementos Finitos [7].

II. ALGUMAS PECULIARIDADES DO PROJETO DO CIRCULADOR COM HEXAFERRITE PhC SEM ÍMÃ PARA REGIÕES MILIMÉTRICAS E THZ

Nesta seção discutimos brevemente alguns problemas gerais relacionados aos circuladores baseados em PhC, peculiaridades dos dispositivos milimétricos e THz e os problemas de aplicação de hexaferrites em tais circuladores.

1) O campo magnético interno necessário para o funcionamento do circulador aumenta com a frequência. Portanto, em geral, os requisitos do sistema magnético para a onda milimétrica e principalmente, os dispositivos THz tornam-se maiores em comparação com aqueles da região de microondas.

2) As hexaferrites são caracterizadas por um campo magnético interno fixo H_{int} . Isto significa que, ao contrário de um circulador comum com magnetização externa, uma alteração dos parâmetros magnéticos da hexaferrite para otimizar o circulador sem ímã é praticamente impossível.

3) As hexaferrites possuem um alto valor de permissividade $\epsilon_h = (20a22)$ enquanto nas ferrites moles este parâmetro é $\epsilon_f = (12a15)$. A permissividade mais alta torna mais difícil o problema do casamento de impedância entre o guia de ondas em um PhC e o ressonador de hexaferrite.

4) Nos PhCs, em comparação com guias de ondas metálicos retangulares uniformes e microfita, o guia de ondas apresenta um defeito linear na estrutura periódica do cristal [8]. Isso complica o casamento entre o guia de ondas e a região do ressonador. Os métodos tradicionais de casamento de impedância, como simples transformadores $\lambda/4$ ou stubs usados na tecnologia de microfita, são difíceis de aplicar devido à periodicidade do PhC. Sem mudanças drásticas no projeto do circulator (como, por exemplo, mudança de gradiente na largura dos guias de onda [9] ou fendas longitudinais nos guias de onda [10]), pode-se usar apenas o ajuste dos elementos do cristal nas proximidades do ressonador de hexaferrite. Podem ser, por exemplo, diâmetros dos furos e suas posições no slab.

5) O nível de perdas magnéticas dos materiais de hexaferrites existentes que é proporcional à largura de linha ferromagnética ΔH é, em geral, superior ao das ferrites macias. Portanto, geralmente há maiores perdas de inserção nos circutores com hexaferrite.

6) A lei de escalonamento simples frequentemente usada em projetos de cristais fotônicos [8] não pode ser aplicada ao circulator porque os parâmetros magnéticos do material hexaferrite são altamente dispersivos. Por exemplo, o parâmetro de girotopia k/μ é inversamente proporcional à frequência.

III. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O circulator sugerido foi projetado para um PhC dielétrico que consiste em uma rede triangular bidimensional de orifícios de ar (furos) em uma placa dielétrica (slab). Os parâmetros do PhC são dados na Tabela I, onde a é a constante de rede, D_d é o diâmetro dos furos, h é a altura do cristal e ϵ_d é a constante dielétrica do material da placa.

O circulator apresenta uma junção de três guias de ondas com comprimentos $10a$ que são formados pela remoção de uma linha de furos no PhC. O cilindro circular de hexaferrite é colocado no eixo de simetria no furo central da junção. Na Fig. 1, é fornecido o desenho esquemático do circulator. O circulator possui simetria rotacional tripla, portanto na análise podemos considerar a excitação de apenas uma porta. Nosso

TABELA I
PARÂMETROS DO CRISTAL FOTÔNICO

a (mm)	D_d (mm)	h (mm)	ϵ_d (Si)
1,488	$0,96a = 1,428$	$0,6a = 0,893$	11,56

objetivo é modelar o circulator com base em um ressonador de material ferromagnético duro.

Na aproximação 2D, escolhemos o modo de funcionamento *TM* do guia de ondas fotônico com os componentes E_z , H_x e H_y , pois esses componentes são necessários para a excitação do ressonador. O mecanismo de operação do circulator é baseado nas ressonâncias dipolo do ressonador de hexaferrite.

As características de dispersão calculadas do guia de ondas do cristal são mostradas na Fig. 2. A estrutura 2D tem um

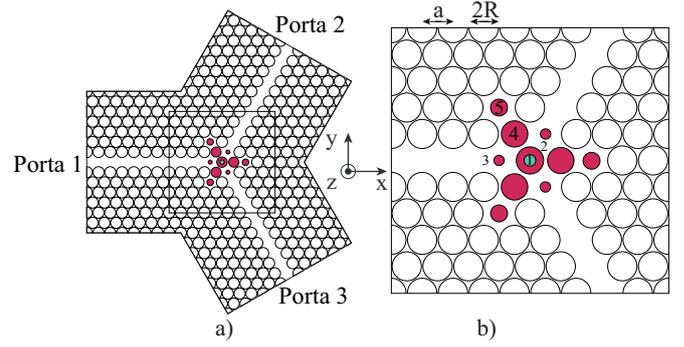


Fig. 1. Desenho esquemático do circulator de hexaferrite, b) Figura ampliada da parte central com o ressonador de hexaferrite indicado pelo número 1, os números 2, 3, 4 e 5 em círculos coloridos indicam os furos correspondentes.

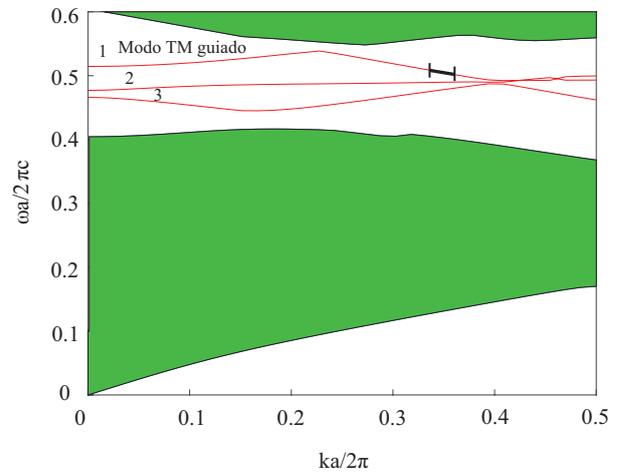


Fig. 2. Diagrama de dispersão do guia de ondas PhC, $\omega a/2\pi c$ é a frequência normalizada, $ka/2\pi$ é o vetor de onda normalizado. A curva 1 corresponde ao modo TM par fundamental, a curva 2 descreve o modo de ordem superior e a curva 3 descreve o modo associado ao fundamental, veja [12]. O segmento destacado na curva 1 corresponde à banda de frequência operacional do circulator.

band gap definido na faixa de frequências de 0,454 a 0,538 c/a (91,46–108,39 GHz). Em geral, o guia de ondas na região do gap fotônico pode suportar diferentes modos. Para o regime de circulação, usaremos o modo TM par fundamental 1.

IV. PARÂMETROS DA HEXAFERRITE

Os parâmetros físicos escolhidos de um material de ferrite hexagonal tipo M típico são dados na Tabela II, onde $4\pi M_s$ é a magnetização de saturação, H_c é o campo magnético coercitivo, ΔH é a largura de linha de ressonância ferromagnética (*FMR*) e ϵ_h é a permissividade relativa.

TABELA II
PARÂMETROS DA HEXAFERRITE

$4\pi M_s$ (G)	H_c (kOe)	ΔH (Oe)	ϵ_h
5000	20	200	20

A seguir, descrevemos o tensor de permeabilidade $[\mu]$ [2]:

$$[\mu] = \begin{pmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

onde μ e κ são definidos pelas seguintes expressões:

$$\mu = 1 + \frac{\omega_m(\omega_i + j\omega\alpha)}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\omega_m\omega}{(\omega_i + j\omega\alpha)^2 - \omega^2}, \quad (2)$$

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, $\omega_m = \gamma 4\pi M_r$, $\omega_i = \gamma H_{int}$, e α é o fator de amortecimento:

$$\alpha = \frac{\mu_0\gamma\Delta H}{2\omega}. \quad (3)$$

V. REGIMES DE CIRCULAÇÃO DO RESSONADOR MAGNETIZADO

De forma simplificada, o ressonador magnetizado pode ser descrito como segue. Na periferia do cilindro de ferrite, a componente z do campo elétrico pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_z(R, \phi) = E^+ e^{(j\omega^+ t)} e^{-jn\phi} + E^- e^{(j\omega^- t)} e^{jn\phi + \psi}, \quad (4)$$

onde ϕ é a coordenada angular, E^+ e E^- são as amplitudes dos modos dipolo girantes, ω^+ e ω^- são suas frequências de ressonância, $n = 1$ para o modo dipolo, ψ é uma mudança de fase. O sinal “+” ou “-” é definido pelo sentido de precessão dos spins na hexaferrite.

Apresentamos na Fig. 3b o desdobramento de frequências dos modos dipolo girantes no ressonador mostrado na Fig. 3a. Este ressonador possui a geometria e as dimensões da parte central do circulador projetado, porém é colocado no PhC sem guias de onda. A transmissão da onda incidente da esquerda é calculada à direita do cristal, conforme ilustrado na Fig. 3a. O cilindro é feito de um hipotético material ferromagnético macio, onde se pode alterar livremente a girotropia k/μ .

Podem-se considerar três casos de variação do ponto de operação do circulador no diagrama das frequências dos modos dipolo girantes, ver Fig. 3b. Se o ponto de operação estiver situado entre as ressonâncias ω^+ e ω^- em distâncias iguais das curvas, ou seja, nas proximidades de $\omega = (\omega^+ + \omega^-)/2$ e os fatores Q dos modos correspondentes são iguais, tem-se no ressonador de hexaferrite o modo estacionário puro e em Eq. (4) neste caso $E^+ = E^-$ e $\psi = 0$. É o regime mais utilizado.

Se a frequência de operação estiver em uma das curvas de ressonância ω^+ ou ω^- da Fig. 3b e a separação das ressonâncias for suficientemente alta, o regime do ressonador é um modo de rotação puro. No regime intermediário, o modo de funcionamento do ressonador consiste na soma do modo estacionário e girante porque os dois termos do lado direito da Eq. (4) têm amplitudes diferentes. Este regime pode ser visualizado pela animação do campo eletromagnético no ressonador do circulador. Definindo T como o período da onda eletromagnética $T = 1/f$. Durante a maior parte do semiperíodo $T/2$, o dipolo fica fixo no plano x - y , como no regime de onda estacionária. Mas durante um pequeno intervalo de tempo $\Delta t < T/2$, ele gira rapidamente em π . Os três regimes discutidos têm analogia com os estados de polarização linear, circular e elíptica das ondas que se propagam no espaço livre.

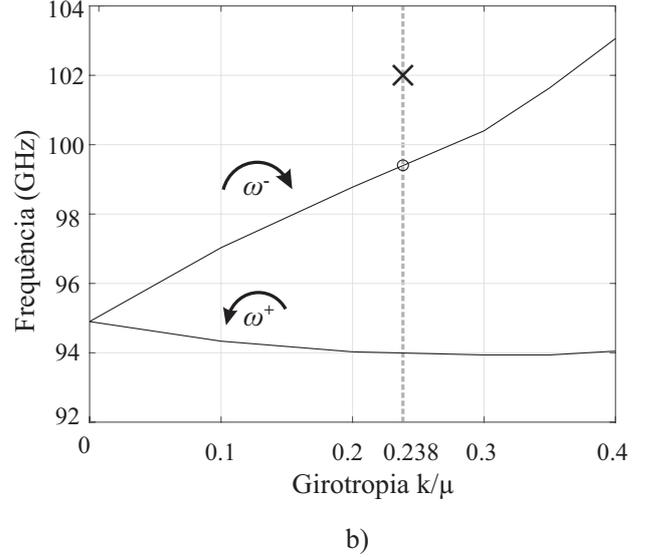
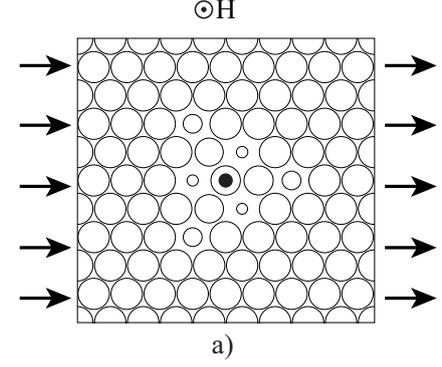


Fig. 3. a) Esquema de excitação do ressonador, b) desdobramento de frequências dos modos dipolo girantes no sentido horário e anti-horário ω^- e ω^+ , a frequência central do circulador $f = 102$ GHz é denotada pela cruz \times .

VI. CARACTERÍSTICAS DO CIRCULADOR

No projeto do circulador, utilizamos como ponto de partida o raio do cilindro de hexaferrite obtido analiticamente da seguinte forma: $R = (1.84c)/(2\pi f \sqrt{\epsilon_h \mu_{\text{eff}}})$. Em seguida, no cálculo numérico, através do Comsol, corrigimos o raio para alcançar a frequência central desejada do circulador.

Os parâmetros geométricos do circulador, com cilindro de hexaferrite, projetado são apresentados na Tabela III e as respostas em frequência calculadas na Fig. 4. Utilizou-se o módulo de otimização do comsol com métodos Nelder-Mead e Monte Carlo para corrigir o raio do cilindro de hexaferrite obtido analiticamente e para se encontrar variações de parâmetros geométricos (como os raios dos furos mais próximos do núcleo de hexaferrite) e alcançar resultados razoáveis de desempenho e, assim, gerar mais parâmetros com os métodos de otimização e/ou manualmente em torno de parâmetros de desempenho razoáveis.

Assim, para os parâmetros geométricos foram gerados números decimais de um valor máximo a um valor mínimo até que se alcançasse um desempenho ótimo para o dispositivo. Devido à natureza do dispositivo e do tamanho da estrutura, a precisão das casas decimais é essencial para assegurar uma boa resposta em frequência durante as simulações.

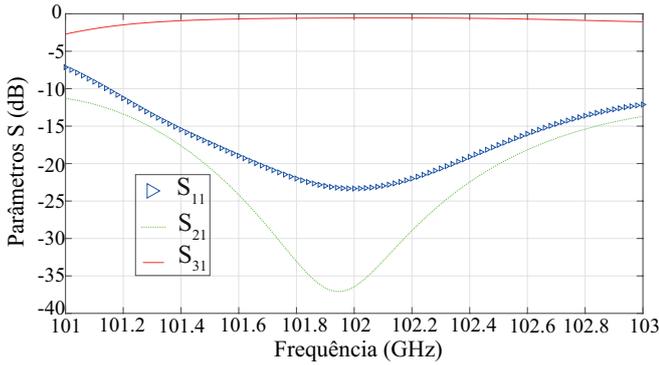


Fig. 4. Resposta em frequência do circulator

A frequência central é 102 GHz e a largura de banda é 1,4 GHz no nível de isolamento - 15 dB. As perdas de inserção são inferiores a -1,0 dB e metade dessas perdas corresponde aos guias de onda de entrada e saída. O campo magnético DC interno é $H_{int} = 19,23$ kOe e o parâmetro de girotropia da hexaferrite é $\kappa/\mu = 0,238$.

TABELA III
PARÂMETROS DE GEOMETRIA DO CIRCULATOR COM HEXAFERRITE (VER FIG. 1B)

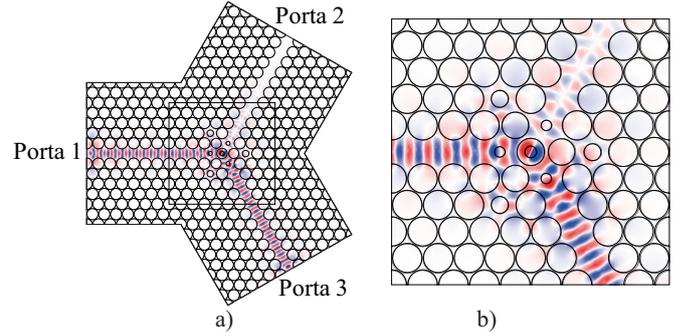
Elemento	Raio	Material
1	0,191a	Hexaferrite
2	0,44826a	Ar
3	0,17203a	Ar
4	0,43707a	Ar
5	0,27993a	Ar

A componente E_z de campo elétrico, do circulator, na frequência central de 102 GHz, é mostrada na Fig. 5. A frequência central do circulator $f = 102$ GHz, denotada na Fig. 3b pela cruz \times , está na vizinhança da frequência do modo dipolo girante no sentido horário no PhC, denotado nesta figura pelo círculo \circ . Uma pequena discrepância de cerca de 3% nessas frequências aparece devido à diferença nas condições de contorno correspondentes. Em particular, o ressonador do circulator está conectado a três guias de onda, mas o ressonador no cristal fotônico na Fig. 3a, não está.

VII. DISCUSSÃO

Diversas configurações dos circutores, com ferrite, baseados em cristais fotônico, comuns sugeridas na literatura, por exemplo, com esferas de ferrite e estruturas multirressonadoras, complicam a tecnologia de produção dos mesmos. Nossa solução com um cilindro de hexaferrite colocado no furo central da junção Y é muito simples e compacta.

Os valores fixos do campo magnético interno das hexaferrites complicam o projeto do circulator. Uma possível solução poderia ser a utilização para cada projeto do circulator de uma hexaferrite adequada com campo magnético interno ótimo H_c .


 Fig. 5. a) Componente E_z de campo elétrico na frequência central $f = 102$ GHz, b) destaque na parte central da figura que mostra o ressonador com modo dipolo.

Neste caso pode-se iniciar com o projeto do circulator com sistema magnético externo onde se pode alterar livremente o campo magnético. Então, para o campo interno ótimo definido pode-se escolher a hexaferrite com o H_c necessário. No entanto, a nomenclatura de tais materiais hoje é limitada.

Outro problema são as perdas de inserção relativamente altas das hexaferrites. Isso é definido principalmente por altos valores de largura de linha FMR . Este problema é agravado por uma elevada constante dielétrica que leva a uma maior concentração de campo eletromagnético no elemento hexaferrite e, conseqüentemente, a maiores perdas em comparação com os dispositivos de ferrite comuns. Há esperança de que, no futuro, com o desenvolvimento de materiais hexaferrite com variedade de campos magnéticos coercitivos e com baixas perdas magnéticas e dielétricas, os parâmetros e características dos circutores sem ímã sejam melhorados.

VIII. CONCLUSÃO

Apresentamos um circulator baseado em cristal fotônico com frequência central de 102 GHz. O circulator auto-polarizado discutido tem uma geometria simples com uma largura de banda razoável e perdas de inserção relativamente pequenas. Sugerimos um método de cálculo do ressonador de hexaferrite e calculamos as respostas em frequência do circulator. Nossos resultados demonstram que o circulator, que não necessita de nenhum sistema magnético externo, na largura de banda de 1,4 GHz possui nível de isolamento de -15 dB e as perdas de inserção, incluindo perdas de guia de onda, melhores que -1 dB. O dispositivo sem ímã pode ter uma grande vantagem em algumas aplicações, por exemplo, em circuitos fotônicos integrados de grande escala. Esses circutores podem ser utilizados, em particular, em futuros sistemas de comunicação sem fio 6G.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 - e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] E.F. Schloemann, "Circulators for microwave and millimeter-wave integrated circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, pp. 188-200, 1988.
- [2] J. Helszajn, "The Stripline Circulators: Theory and Practice," John Wiley I& Sons, Inc., 2008.
- [3] Liudmila Alyabyeva, Anatoly Prokhorov, Denis Vinnik, and Vladimir Anzin, "Lead-substituted barium hexaferrite for tunable terahertz optoelectronics," *NPG Asia Mater*, vol. 13, pp. 2021.
- [4] Y. Akaiwa and T. Okazaki, "An application of a hexagonal ferrite to a millimeter-wave Y circulator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 10, pp. 374-378, 1974.
- [5] N. Zeina, H. How, C. Vittoria, and R. West, "Self-biasing circulators operating at K/subA/-band utilizing M-type hexagonal ferrites," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, p. 458, 1992.
- [6] Renuka Bowrothu, Hae-In Kim, Connor S. Smith, and David P. Arnold, "35-GHz Barium Hexaferrite/PDMS Composite-Based Millimeter-Wave Circulators for 5G Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, pp. 5065-5071, 2020.
- [7] *COMSOL Multiphysics*, <http://www.comsol.com>.
- [8] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Second Edition)," Princeton University Press, 2008.
- [9] Biaoqiang Xu, Dengguo Zhang, Xierong Zeng, Yong Wang, and Zheng Dong, "Magnetic photonic crystal circulator based on gradient changing width waveguide," *Optik*, vol. 185, pp. 132-137, 2019.
- [10] Biaoqiang Xu, Dengguo Zhang, Yong Wang, and Binbin Hong, "A Terahertz Circulator Based on Magneto Photonic Crystal Slab," *Photonics*, vol. 10, 2023.
- [11] Victor Dmitriev, Gianni Portela, and Leno Martins, "Temporal Coupled-Mode Theory of Electromagnetic Components Described by Magnetic Groups of Symmetry," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, pp. 1165-1171, 2018.
- [12] Rossella Zoli, Marco Gnan, Davide Castaldini, Gaetano Bellanca, and Paolo Bassi, "Reformulation of the plane wave method to model photonic crystals," *Opt. Express*, vol. 11, pp. 2905-2910, 2003.