

Projeto de Metassuperfície para Integração Simultânea de Múltiplas Funções

Thayana M. L. De Souza, Maurício W. B. Da Silva, Tadeu N. Ferreira e Antônio L. P. De Siqueira Campos

Resumo— Neste artigo é proposta uma metassuperfície fina, de camada única e com múltiplas funções simultaneamente. A célula unitária da estrutura proposta consiste em espiras quadradas concêntricas impressas em um substrato, que é coberto por um superstrato. O plano de terra é formado por um arranjo periódico projetado para refletir apenas as frequências de interesse. Como resultado a célula unitária fornece pico de absorção de 96% em 3,5 GHz, com aplicação na frequência do 5G, realiza conversão de polarização, com taxa de conversão de polarização máxima de 99,66% em 7,47 GHz, enquanto permite a transmissão na faixa de 4,6 GHz.

Palavras-Chave— Metassuperfície, absorção, conversão de polarização, transmissão.

I. INTRODUÇÃO

Metassuperfícies são metamateriais bidimensionais com características eletromagnéticas (EM) únicas e inovadoras, resultando em propriedades além das limitações dos materiais naturais, e que vem ganhando cada vez mais interesse desde a última década [1] - [4]. Muitas metassuperfícies foram implementadas com sucesso para uma variedade de dispositivos, como filtros de microondas [5], absorvedores [6], conversor de polarização [7] e lentes de microondas [8].

Os absorvedores de ondas EM convencionais têm aplicação prática limitada devido ao seu tamanho e natureza volumosa. Por outro lado, as metassuperfícies com função de absorção são compactas em comparação com os absorvedores convencionais, geralmente com espessura de $\lambda/15$ a $\lambda/10$ [9], e podem ser aplicadas para redução da RCS (*Radar Cross Section* - seção reta radar) de antenas, em sistema portátil de imagem de RF (Rádio Frequência), mísseis aéreos furtivos, para compatibilidade/interferência eletromagnética e reduções de lóbulo lateral da antena [5] - [10].

Outra função que se destaca nas metassuperfícies é a conversão de polarização, com aplicações também para redução de RCS e para converter a antena polarizada linear em uma antena de polarização circular [11], [12]. Há também aplicações de metassuperfície como conversores de polarização cruzada [7], [12], de transmissão linear para circular e conversores de polarização baseados em reflexão [13], [14].

Embora os absorvedores e conversores de polarização descritos acima sejam eficientes, eles conduzem apenas uma operação por vez, seja de absorção ou conversão de polarização,

De Souza, Thayana M. L., Da Silva, Maurício W. B., Ferreira, Tadeu N., Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, e-mail: {mauriciobenjo; tadeu_ferreira}@id.uff.br; De Siqueira Campos, Antônio L. P., Departamento de Engenharia de Comunicações, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, e-mail: alpescampos@gmail.com. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) através da concessão de bolsa de estudo de Doutorado.

o que restringe seu uso em ambientes que necessitam de dispositivos compactos, miniaturizados e multifuncionais. Recentemente, para satisfazer à crescente procura de dispositivos versáteis, vem sendo direcionada muita atenção ao desenvolvimento de estruturas multifuncionais utilizando metassuperfícies [15] - [18]. As multifuncionalidades são obtidas através de diferentes técnicas, que variam de acordo com a faixa de frequência e aplicação, abrangendo múltiplas camadas, geometrias complexas e/ou grande número de ressonadores, além da inclusão de dispositivos ativos [19] - [21]. Outro ponto importante é que as estruturas recentemente projetadas permitem duas funções no máximo, que pode ser uma combinação entre as diferentes funções (absorção, conversão transmissiva ou reflexiva).

Neste trabalho, é proposta uma estrutura multifuncional fina e de única camada, a qual pode atuar simultaneamente como um absorvedor, transmissor e conversor de polarização. A célula unitária da metassuperfície multifuncional consiste em três espiras quadradas impressas sobre um substrato dielétrico, que é coberto por um superstrato. O plano de terra completo foi substituído por um arranjo periódico para refletir apenas as frequências de interesse. Assim, temos a configuração de um absorvedor, conversor de polarização e transmissor, simultaneamente. O projeto da estrutura e a análise de onda completa de absorção, transmissão e conversão de polarização foram desenvolvidos utilizando o software HFSS. As novidades da estrutura são o design simples, tamanho compacto e operação multifuncional simultaneamente.

II. PROJETO DA CÉLULA UNITÁRIA

Com o objetivo de projetar uma estrutura que atue como absorvedor, transmissor e conversor de polarização, uma estrutura do tipo dielétrico-metal-dielétrico-metal com um ressonador simétrico foi usada para atuar como absorvedor de banda estreita. A Fig. 1 apresenta as geometrias que compõem a célula unitária da metassuperfície proposta. Na Fig. 1(a), é apresentado o plano de terra de terra seletivo, composto por uma FSS (*Frequency Selective Surface* - Superfície Seletiva em Frequência) com espiras quadradas, enquanto a Fig. 1(b) mostra os elementos da camada frontal, também de espiras quadradas. Na Fig. 1(c), é apresentada a vista lateral da estrutura. Na estrutura em questão, o plano de terra (Fig. 1(a)) é projetado para refletir sinais nas frequências de interesse. Na Fig. 1(b), a espira completa externa é responsável pela absorção dos sinais refletidos a partir do plano de terra, enquanto que as duas espiras internas com corte diagonal têm a função de converter a polarização dos sinais também refletidos a partir do plano de terra, mas em frequência distinta.

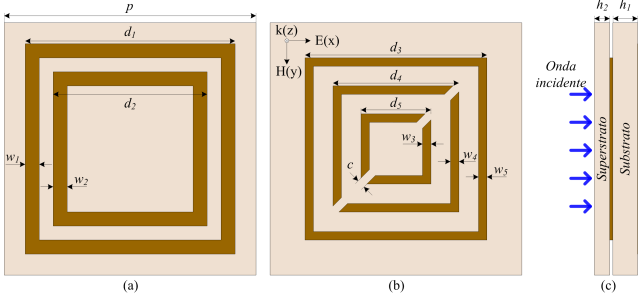


Fig. 1. Geometria da célula unitária da estrutura proposta: (a) plano de terra, (b) ressonadores e (c) visão lateral.

Para que a estrutura atue de forma eficiente, a espessura do dielétrico deve ser muito menor que o comprimento de onda, a fim de evitar deslocamento de fase das ondas EM e múltiplas reflexões. Além disso, foi utilizado o cobre como camada metálica, com condutividade elétrica $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ S/m e espessura $t = 35 \mu\text{m}$. A camada dielétrica é selecionada como FR-4, com permissividade relativa de 4,3 e tangente de perda de 0,025. A espessura da camada dielétrica é $h_1 = 2,4$ mm e o superstrato tem espessura $h_2 = 0,8$ mm. As dimensões geométricas da estrutura, são mostradas na Fig. 1, na qual, em milímetros, $d_1 = 14,0$, $d_2 = 10,0$, $d_3 = 11,0$, $d_4 = 7,2$, $d_5 = 5,5$, $w_1 = w_2 = 2,0$, $w_3 = w_4 = w_5 = 0,6$, $c = 0,3$, $p = 17,0$.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estrutura fina e de camada única foi projetada para ser multifuncional, assumindo as funções de absorção, conversão de polarização e transmissão simultaneamente. Cada uma dessas funções possui particularidades e características que serão apresentadas ao longo deste trabalho, e, para melhor compreender o mecanismo de tais funções, também será verificado o comportamento da densidade de corrente de superfície e a distribuição do campo elétrico.

A. Absortividade

Como primeira análise, foi verificado se a estrutura pode ser considerada uma metassuperfície. Para tanto, é necessário que suas dimensões sejam da ordem de subcomprimentos de ondas, o que a difere de uma FSS, cuja frequência de projeto está diretamente associada ao comprimento elétrico da estrutura. Diante disso, como mencionado na seção anterior, a periodicidade da célula unitária é $p = 17$ mm, o que é equivalente a $0,198\lambda$ na frequência de absorção de 3,51 GHz. Assim, a periodicidade do absorvedor é muito menor que o comprimento de onda e atende ao requisito de periodicidade de um metamaterial. Além disso, a espessura do absorvedor é de $0,0373\lambda$, o que significa que sua espessura também é muito menor que o comprimento de onda.

Para analisar o desempenho da absorção pode-se utilizar a teoria do meio efetivo [22], devido ao fato de a metassuperfície ser uma estrutura periódica de subcomprimento de onda. A eficiência de absorção pode ser estimada em termos da sua curva de absorptividade definida por [23], [24]:

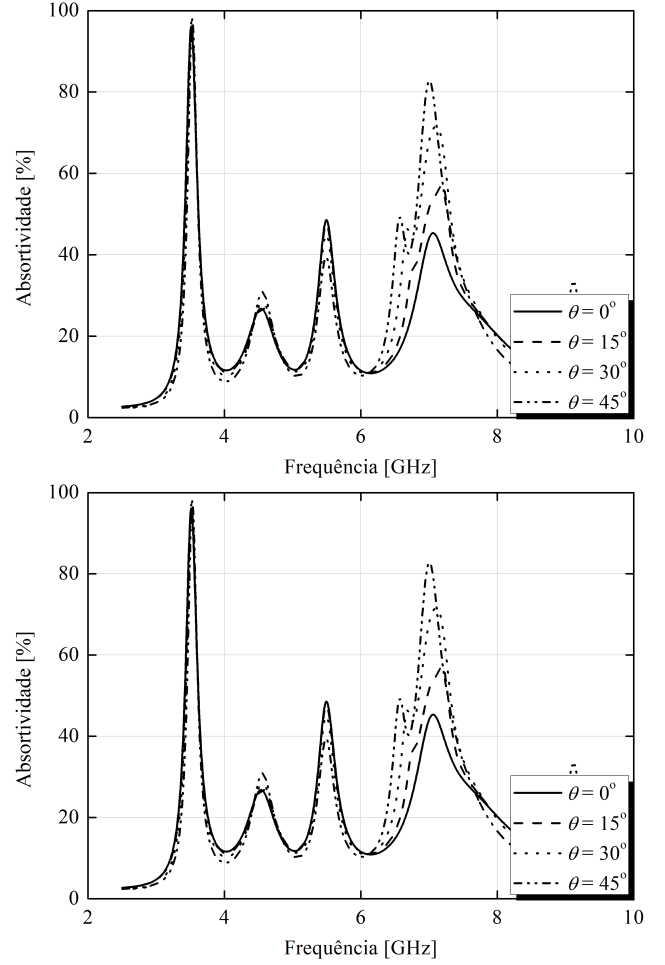


Fig. 2. Absortividade sob incidência normal e oblíqua para (a) polarização vertical e (b) polarização horizontal

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

em que $A(\omega)$ é a absorptividade, $R(\omega)$ é a refletância, $T(\omega)$ é a transmitância e ω é a frequência angular, definidos por:

$$R(\omega) = |r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2, \quad (2)$$

$$T(\omega) = |t_{yy}|^2 + |t_{xy}|^2, \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_{yy} = E_{yr}/E_{yi}, \\ r_{xy} = E_{xr}/E_{xi} \end{cases}, \quad (4)$$

e r_{yy} , r_{xy} , t_{yy} e t_{xy} são as componentes de reflexão e transmissão de co-polarização e polarização cruzada, respectivamente. Aqui, E denota o campo elétrico, os subscritos i e r indicam a incidência e reflexão das ondas EM, respectivamente; e os subscritos x e y denotam as direções de polarização das ondas EM, respectivamente (ver Fig. 1).

A representação da absorptividade, dada pela equação (1), está representada nas Figs. 2(a) e 2(b), onde um pico de absorção de 96% é atingido para a frequência de 3,51 GHz. Nessas mesmas figuras, são apresentadas as curvas da absorptividade

sob incidência oblíqua tanto para a polarização vertical, Fig. 2(a), quanto para a polarização horizontal, Fig. 2(b). Como observado, a estrutura mantém taxa de absorção acima de 90% para ângulos de incidência oblíquos de até 45° para ambas as polarizações, o que mostra alta estabilidade sob incidência angular da estrutura proposta.

B. Conversão de polarização

Para demonstrar que a metassuperfície proposta possui conversão de polarização eficiente, calculamos a PCR (*Polarization Conversion Ratio* - taxa de conversão de polarização) para onda incidente polarizada em y , conforme Fig. 1, que é definida como [26]:

$$PCR = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2} \quad (5)$$

em que r_{yy} e r_{xy} representam componentes de campo refletido de co-polarização e polarização cruzada, respectivamente.

A taxa de conversão de polarização em função da frequência é apresentada na Fig. 3, onde se obteve uma PCR superior a 90% na faixa de frequência 7,23 GHz – 7,71 GHz, com um pico de 99,66%, o que implica que a polarização é adequadamente convertida em sua forma de onda de polarização cruzada e que o dispositivo atua como um conversor de polarização linear eficiente. De forma semelhante ao investigado para a função de absorção, para a conversão de polarização também foi verificado o comportamento da PCR para incidência oblíqua. Como observado na Fig. 3, na função conversor, a estrutura apresenta independência de polarização, ou seja, seu pico de conversão é atingido tanto para a polarização vertical como para a polarização horizontal. Por sua vez, alta taxa de conversão para ângulos de incidência oblíquos até 45° é verificada apenas para a polarização horizontal, como observado na Fig. 3(b). Outrossim, para valores de incidência angular acima de 15°, há uma forte redução da PCR máxima e largura de banda de conversão para a polarização vertical.

C. Transmissão

Com o propósito de permitir que sinais de faixas de frequência distintas das faixas de absorção e de conversão de polarização pudessem trafegar através da estrutura, o plano de terra foi substituído por um plano de terra seletivo. Mais especificamente, foi usada uma superfície seletiva em frequência, projetada para refletir sinais nas bandas de absorção e conversão de polarização, sendo transparente em faixas de frequência distintas, portanto, transmissiva. Assim, a estrutura também opera na função de transmissão, e que pode ser expressa por [26]:

$$T = \sqrt{|T_{xx}|^2 + |T_{xy}|^2} \quad (6)$$

em que T_{yy} e T_{xy} representam componentes de transmissão de co-polarização e polarização cruzada, respectivamente.

As Figs. 4(a) e 4(b) apresentam as curvas de transmissão em função da frequência para as polarizações vertical e horizontal, respectivamente. A transmissão ocorre em 4,6 GHz, e diante das variações angulares até 45° para ambas

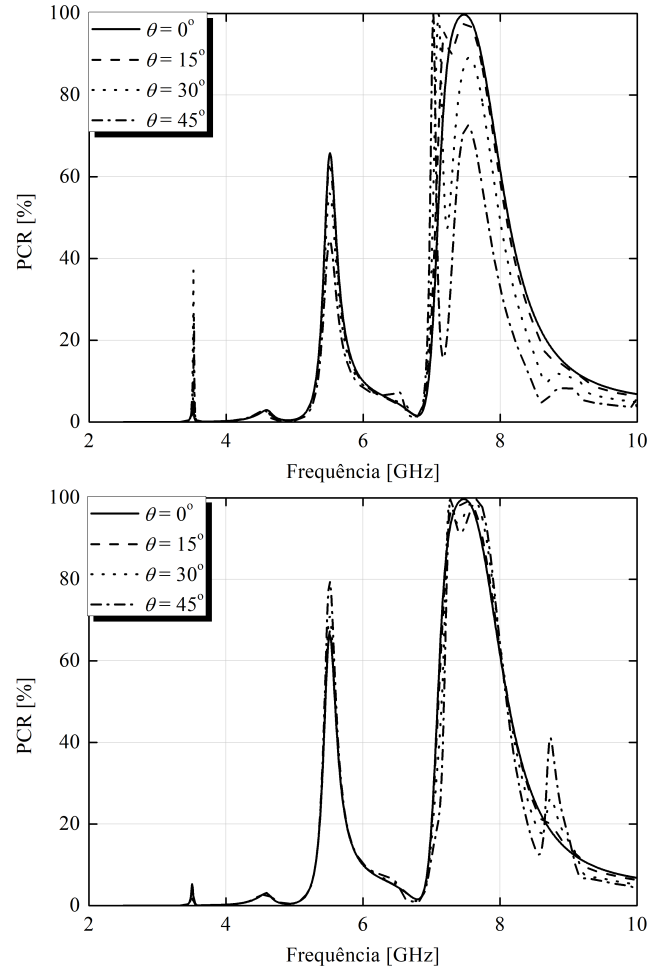


Fig. 3. Taxa de conversão de polarização sob incidência normal e incidência oblíqua para ambas as polarizações (a) vertical e (b) horizontal.

as polarizações, o transmissor proposto apresenta estabilidade angular na frequência de operação.

IV. MECANISMOS FÍSICOS

Para melhor apresentar os mecanismos físicos tanto da absorção quanto da conversão de polarização da metassuperfície proposta, mapas da distribuição de corrente de superfície nas camadas superior e inferior e distribuição do campo elétrico são simulados nos picos de absorção e de conversão de polarização, i.e., 3,51 GHz e 7,47 GHz e apresentados nas Figs. 5 a 8. É mostrada a presença de dipolos elétricos e/ou magnéticos, que fornecem respostas de ressonância elétrica e/ou magnética.

Para a função absorvedor, em 3,51 GHz, é notado a partir da Fig. 5, que, na parte superior da célula unitária, a densidade da corrente de superfície é mais forte na espira quadrada externa, onde há continuidade e simetria, principal responsável pela função de absorção. Nas espiras quadradas internas onde há a quebra de simetria, para a frequência de 3,51 GHz, a densidade de corrente é baixa e praticamente não há contribuição. Ao se comparar o ressonador disposto na parte frontal com os elementos do plano de terra, nota-se que a intensidade de corrente superficial no plano de terra é mais fraca, pois a intensidade

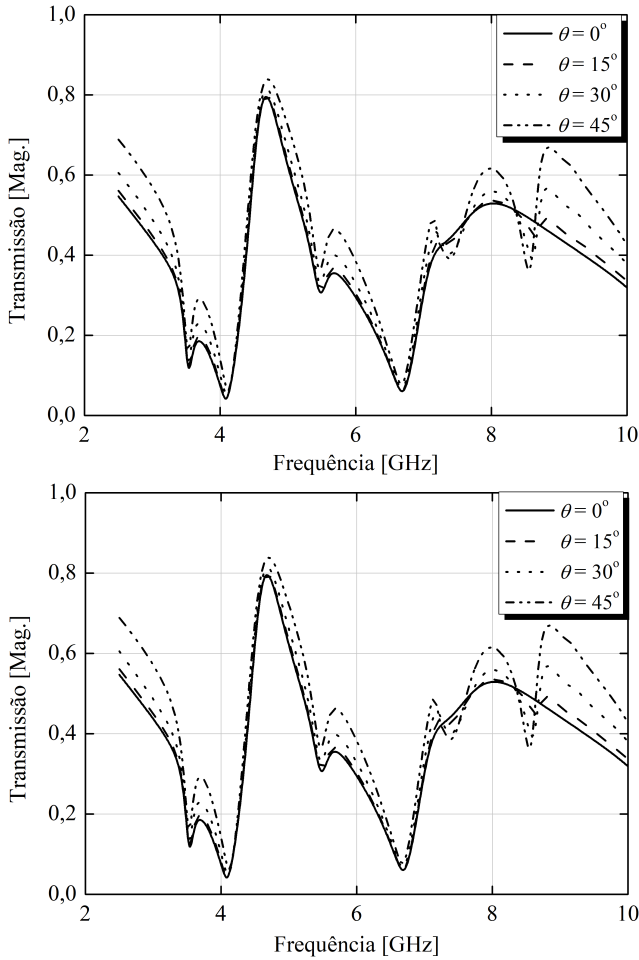


Fig. 4. Transmissão sob incidência normal e oblíqua para ambas as polarizações (a) vertical e (b) horizontal.

da onda decai ao viajar pela estrutura. É possível observar, na frequência de 3,51 GHz, que as correntes são antiparalelas, o que resulta na circulação de corrente perpendicular ao campo magnético aplicado dentro da estrutura, que excita um dipolo magnético. Assim, uma ressonância magnética é identificada na frequência de 3,51 GHz.

Na análise da absorção, como apresentado na Fig. 6, foi analisada também a distribuição do campo elétrico na estrutura, considerando uma onda EM com incidência normal em x , conforme Fig. 1. É possível notar fortes acoplamentos elétricos entre segmentos adjacentes das espiras, o que indica a presença de correntes de deslocamento, e, assim, nota-se a presença de ressonância magnética [25]. Portanto, na função absorvedor, as respostas magnéticas são responsáveis pelos picos de absorção.

As mesmas análises foram realizadas para a frequência de 7,47 GHz, para uma compreensão do mecanismo de conversão de polarização do metamaterial proposto. Diferentemente do comportamento apresentado para a absorção, a maior intensidade da corrente de superfície acontece nos ressonadores internos, como é observado na Fig. 7, com quebra de simetria, ou seja nas espiras quadradas que possuem o corte na diagonal, evidenciando a maior contribuição para a função de conversão de polarização. As distribuições de correntes superficiais no

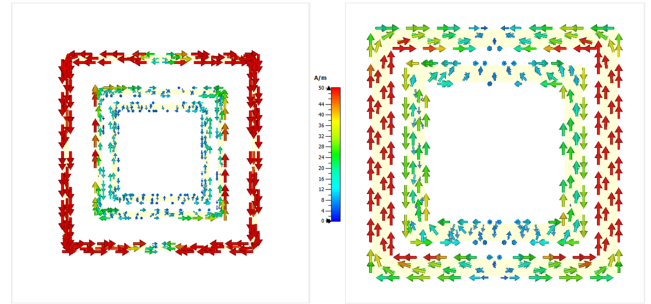


Fig. 5. Densidade de corrente superficial simulada para o absorvedor proposto em 3,51 GHz mostrando à esquerda a célula unitária e à direita o plano de terra.

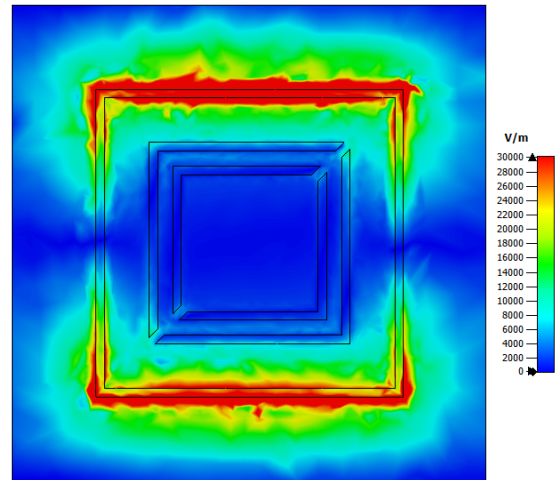


Fig. 6. Distribuição do campo elétrico da estrutura proposta na função absorvedor na frequência de 3,5 GHz.

topo e no plano de terra na frequência central de conversão são anti-paralelas, e assim, uma ressonância elétrica é identificada.

A Fig. 8 mostra a distribuição do campo elétrico na estrutura, considerando uma onda EM com incidência normal em x , conforme Fig. 1. Como observado, o campo elétrico está distribuído ao redor das espiras quadradas internas e concentrado na região onde houve a quebra de simetria, onde se observa também forte distribuição do campo na parte interna da célula, indicando a presença de ressonâncias elétricas. Assim, na função de conversor de polarização, as respostas elétricas são responsáveis pela conversão de polarização.

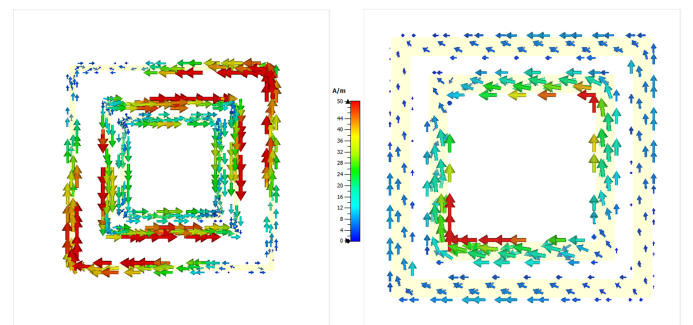


Fig. 7. Densidade de corrente superficial simulada para do conversor de polarização em 7,47 GHz mostrando à esquerda a célula unitária e à direita o plano de terra.

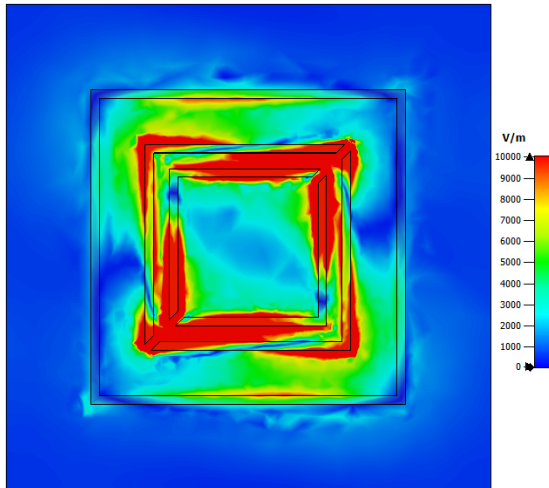


Fig. 8. Distribuição do campo elétrico para o conversor de polarização na frequência de 7,4 GHz.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, é proposta uma metassuperfície fina e de camada única, com capacidade de operar com as funções de absorção, conversão de polarização e que também é transparente, simultaneamente. Suas multifunções são obtidas utilizando uma estrutura DMDM com ressonadores simétricos e a substituição de uma plano terra cheio por uma FSS. Resultados numéricos mostram uma PCR superior a 90% na faixa de frequência de 7,23 a 7,71 GHz. A função de absorção possui um pico de operação em 3,51 GHz, com uma taxa de absorção de 96,0%. A estrutura proposta é transparente para sinais que operam na faixa de frequência de 4,6 GHz. Devido às características de casamento de impedância, perda ôhmica em baixas frequências e forte ressonância eletromagnética em altas frequências da metassuperfície, a estrutura proposta integra a tripla função de absorção, conversão de polarização e transmissão. Futuras etapas deste trabalho visam a fabricação e a validação experimental da estrutura proposta. Além disso, objetiva-se aplicar a metassuperfície proposta em conjunto com antenas para melhoria de alguns de seus parâmetros radiativos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos CNPq, CAPES e FAPERJ pelo financiamento.

REFERÊNCIAS

- [1] N. F. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne, F. Capasso and Z. Gaburro, "Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction," *Science*, v. 334, pp. 333–337, 2011.
- [2] Tie Jun Cui, Mei Qing Qi, Xiang Wan, Jie Zhao and Qiang Cheng, "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials," *Light Sci Appl* 3, v. e218, 2014.
- [3] Yizhuo Yu, Fajun Xiao, Chong He, Ronghong Jin and Weiren Zhu, "Double-arrow metasurface for dual-band and dual-mode polarization conversion," *Opt. Express*, v. 28, no. 8, pp. 11797–11805, 2020.
- [4] M. R. Akram, G. Ding, K. Chen, Y. Feng and W. Zhu, "Ultrathin single layer metasurfaces with ultra-wideband operation for both transmission and reflection," *Adv. Mater.*, v. 32, no. 12, pp. 52–55, 2020.
- [5] Y. He *et al.*, "Design of a Dual-Band Electromagnetic Absorber With Frequency Selective Surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 19, no. 5, pp. 841–845, 2020.
- [6] A. Kumar, J. Padhi, G. S. Reddy and S. Narayan, "Dual Band Polarization Insensitive Frequency Selective Surface Absorber," *2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC), Mumbai, India*, pp. 1–5, 2019.
- [7] Y. Wang, F. Qi, Z. Liu, P. Liu and W. Li, "Ultrathin and Flexible Reflective Polarization Converter Based on Metasurfaces With Overlapped Arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 19, no. 12, pp. 2512–2516, 2020.
- [8] S. M. A. Abadi, N. Behdad, "Design of Wideband, FSS-Based Multi-Beam Antennas Using the Effective Medium Approach," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, v. 62, no. 11, pp. 5557–5564, 2014.
- [9] G. Shrikanth Reddy and A. Kumar, "Improved Polarization Insensitive Dual Band Electromagnetic Wave Absorber," *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), New Delhi, India*, pp. 1–4, 2019.
- [10] Y. P. Lee, J. Y. Rhee, Y. J. Yoo and K. W. Kim, *Metamaterials for Perfect Absorption*, Singapore: Springer, v. 236, 2016.
- [11] M. Ameen, S. R. Thummaluru and R. K. Chaudhary, "A Compact Multilayer Triple-Band Circularly Polarized Antenna Using Anisotropic Polarization Converter," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 20, no. 2, pp. 145–149, 2021.
- [12] X. Liu *et al.*, "Analysis of High-Efficiency Cross-Polarized Converter at Oblique Incidence," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, v. 16, pp. 2291–2294, 2017.
- [13] Q. Zheng, C. Guo, and J. Ding, "Wideband Metasurface-Based Reflective Polarization Converter for Linear-to-Linear and Linear-to-Circular Polarization Conversion," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, v. 17, no. 8, pp. 1459–1463, 2018.
- [14] Z. Li, J. Su and Z. Li, "Design of polarization converter based on the high efficiency transmission phase gradient metasurface," *Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China*, pp. 1–3, 2017.
- [15] F. D. M. Nobre, M. W. B. Da Silva, A. L. P. De Siqueira Campos and T. N. Ferreira, "Analysis and Design of an Ultra-Wideband Polarization Converter Based on Anisotropic Metasurface," *Proc. Intern. Microwave and Optoelectronics Conf., Castelldefels, Spain*, pp. 151–153, 2023.
- [16] Xu Zhang *et al.*, "Ultrathin dual-functional metasurface with transmission and absorption characteristics," *Opt. Mater. Express*, v. 8, no. 4, pp. 875–883, 2018.
- [17] Fan-Guang Meng *et al.*, "Transmitting-absorbing material based on resistive metasurface," *AIP Advances*, v. 8, no. 7, 075008, 2018.
- [18] Z. L. Mei, X. M. Ma, C. Lu, Y. D. Zhao, "High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface," *AIP Advances*, v. 7, no. 12, 125323, 2017.
- [19] R. Dutta, D. Mitra and J. Ghosh, "Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, v. 30, no. 7, 2020.
- [20] J. Wang, R. Yang, R. Ma, J. Tian and W. Zhang, "Reconfigurable Multifunctional Metasurface for Broadband Polarization Conversion and Perfect Absorption," *IEEE Access*, v. 8, pp. 105815–105823, 2020.
- [21] R. Dutta, D. Mitra and J. Ghosh, "Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, v. 30, no. 7, 2020.
- [22] D. R. Smith, "Analytic expression for the constitutive parameters of magnetoelectric metamaterials," *Physical Review E*, v. 81, 2010.
- [23] J. B. O. de Araújo, G. L. Siqueira, E. Kempner, M. Weber, C. Junqueira and M. M. Mosso, "An Ultrathin and Ultrawideband Metamaterial Absorber and an Equivalent-Circuit Parameter Retrieval Method," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, v. 68, no. 5, pp. 3739–3746, 2020.
- [24] Hengyi Sun, Changqing Gu, Xinlei Chen, Zhuo Li, Liangliang Liu and Ferran Martín, "Ultra-wideband and broad-angle linear polarization conversion metasurface," *J. Appl. Phys.*, v. 121, no. 17, 174902, 2017.
- [25] Shuguang Fang *et al.*, "Dual-function flexible metasurface for absorption and polarization conversion and its application for radar cross section reduction," *J. Appl. Phys.*, v. 131, no. 13, 135106, 2022.
- [26] S. U. Rahman, Q. Cao, I. Gil, M. Sajjad and Y. Wang, "Design of Wideband Beamforming Metasurface With Alternate Absorption," *IEEE Access*, v. 8, pp. 21393–21400, 2020.