

# ESTRUTURA PERIÓDICA DE METAMATERIAIS CONSTITUÍDOS DE ANÉIS CONCÊNTRICOS REPARTIDOS

Pedro J. Castro\*, Joaquim J. Barroso, Joaquim P. Leite Neto  
Laboratório Associado de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 – 12227-010 São José dos Campos, SP  
(\* ) castro@plasma.inpe.br

## RESUMO

*Com ênfase experimental, são estudadas estruturas periódicas de metamateriais constituídos de anéis concêntricos repartidos (“split-ring resonators”) que podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas e apresentar ressonâncias magnéticas e elétricas. No presente estudo, os ressoadores formados por dois anéis concêntricos, repartidos com aberturas diametralmente opostas, são confeccionados com camadas de cobre de 37 microns, impressas sobre um substrato de kapton (poliamida) por técnica de circuito impresso. Os experimentos consistiram em acondicionar uma estrutura periódica com sete anéis num guia de onda de secção quadrada de 6 mm de lado, correspondente à frequência de corte de 25 GHz e identificar as bandas de transmissão devido às respostas magnética e elétrica para os ressoadores com diferentes aberturas (gaps) de 1 e 2 mm, centradas nas frequências de 5,62 e 6,51 GHz, respectivamente, valores bem abaixo do corte em 25 GHz, fato que caracteriza um meio com permeabilidade e permissividade simultaneamente negativas.*

Palavras-chave: metamateriais, ressoadores de anéis repartidos, ressonância magnética, ressonância elétrica, medida de banda de transmissão.

## INTRODUÇÃO

Os assim denominados metamateriais constituem materiais artificialmente estruturados (dielétrico e inclusão metálica) que podem interagir com as ondas eletromagnéticas e controlá-las. Um tipo desse material consiste em anéis concêntricos repartidos que podem exibir simultaneamente permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas. Tal estrutura denominada de ressoador de

anéis concêntricos repartidos, derivado da expressão inglesa “split-ring resonator” (SRR), apresenta ressonâncias tanto magnéticas como elétricas. A ressonância magnética é induzida pela abertura dos anéis e também pela região de separação entre os anéis interno e externo, os quais constituem elementos capacitivos (Fig.1). E devido à repartição dos anéis essas estruturas podem suportar comprimentos de onda muito maior que a dimensão dos anéis. Dadas as propriedades peculiares dos circuitos com esses metamateriais, uma estrutura periódica formada por anéis concêntricos repartidos pode ser utilizada em propagação de ondas em guias de onda miniaturizados que operam abaixo do corte [1]-[2]. Mesmo com dimensões menores que o comprimento de onda de operação tais estruturas podem ser aplicadas nas faixas de frequências de microondas até terahertz [3]. A literatura tem apresentado relatos sobre os vários aspectos dos metamateriais e progressos na pesquisa desta área [4]-[16].

Relatam-se aqui experimentos sobre propagação de ondas através de um guia de onda carregado com ressoadores de anéis repartidos formados de sete células, mostrando os seus respectivos espectros de transmissão e como variam as suas características magnéticas e elétricas. São comparadas essas características com variação das aberturas ( $g$ ) diametralmente opostas orientadas na direção longitudinal à rede de anéis com  $g = 1$  mm,  $g = 2$  mm e  $g = 0$ .

#### **RESSOADORES DE ANÉIS REPARTIDOS E SUA CONSTRUÇÃO**

Os ressoadores, objetos do presente estudo como ilustra a Fig. 1, consistem em dois anéis concêntricos de cobre (com espessura  $h = 37$   $\mu\text{m}$ ) impressos sobre um substrato de kapton (poliamida), de espessura  $t = 1,6$  mm e constante dielétrica  $\epsilon = 3,2$ , confeccionados por técnica de circuito impresso. Os outros parâmetros geométricos são: espaçamento entre os anéis interno e externo  $d = 0,3$  mm, largura dos anéis  $w = 0,4$  mm, raio do anel interno  $r = 1,4$  mm, tal que o diâmetro da estrutura do SRR é 5,0 mm. Nos experimentos, duas diferentes aberturas (“gap”) dos anéis foram testadas:  $g = 1,0$  mm e  $g = 2,0$  mm; quando  $g = 0$  temos o caso de anéis fechados (“closed-ring resonator” – CRR). Os anéis comportam-se como uma capacitância distribuída representada por  $C_0$  no circuito equivalente mostrado na Fig. 2, onde  $L$  é a indutância mútua dos anéis e  $C_g$ , a capacitância da abertura (“gap”) entre os anéis, tal que a frequência de ressonância pode ser estimada por

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{(C_0 + C_g)L}} \quad (1)$$

Neste estudo, os ressoadores de anéis concêntricos repartidos são inseridos no interior de um guia de onda com o objetivo de produzir permissividade negativa na condição em que a frequência de operação é inferior à frequência de corte do modo dominante. A resposta magnética destes ressoadores pode fornecer uma banda passante em que a constante de permissividade elétrica e permeabilidade magnética são ambas negativas usando um guia de onda retangular como um meio hospedeiro para os circuitos de metamateriais sob teste.

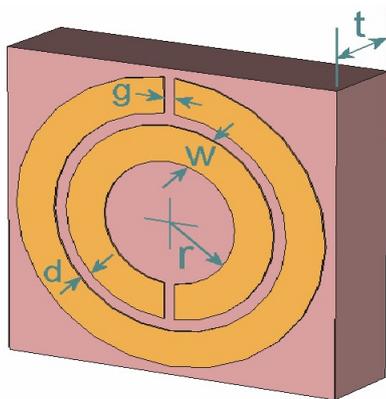


Figura 1. Ressonador de anéis repartidos.

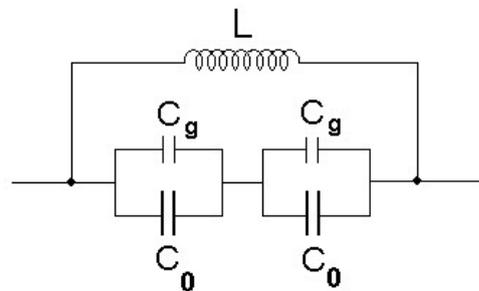


Figura 2. Circuito equivalente da estrutura mostrada na Fig.1.

### ARRANJO EXPERIMENTAL E EXPERIMENTOS

A Fig. 3 retrata três diferentes redes de anéis com 7 células que são usadas neste trabalho para efeito de comparação: células sem abertura de anéis, ou seja,  $g = 0$ , outra com  $g = 1$  mm e uma terceira,  $g = 2$  mm.

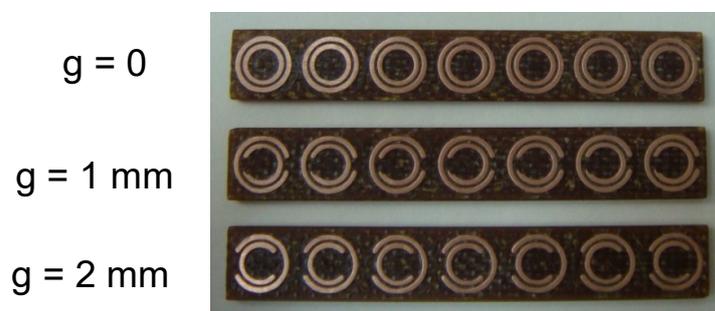


Figura 3. Diferentes redes de anéis concêntricos: com aberturas de  $g = 1$  mm,  $g = 2$  mm e anéis fechados ( $g = 0$ ).

Experimentos foram implementados carregando um guia de onda retangular metálico com uma rede periódica de anéis repartidos (Fig. 4). A rede é colocada sobre o plano de simetria de um guia de onda de secção quadrada de 6 mm de lado e frequência de corte correspondente de 25 GHz para o modo eletromagnético dominante  $TE_{01}$ . Três diferentes redes são usadas (Fig. 3), em termos de abertura entre os anéis, para investigar as bandas de transmissão. Como se pode notar na Fig. 4, a primeira e a última célula da matriz foram colocadas parcialmente fora do guia de onda para facilitar a excitação da rede. A montagem experimental completa é mostrada na Fig. 5, onde o guia de onda com a rede de anéis é simetricamente conectada em ambas as extremidades a idênticos adaptadores guia-cabo coaxial, que são usados para excitar e detectar o sinal propagante através do meio combinado. O analisador de rede vetorial Agilent N5230C é usado para medir o coeficiente de transmissão  $S_{21}$  através do meio combinado, e também para coletar os dados experimentais.

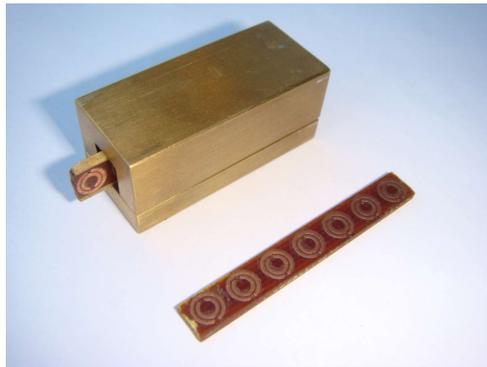


Figura 4. Guia de onda carregado com ressonador de anéis concêntricos

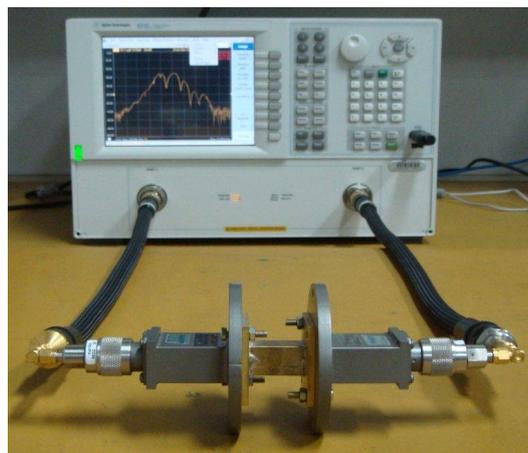


Figura 5. Montagem experimental completa conectada ao analisador de rede para medir o espectro de transmissão das redes de ressonadores de anéis concêntricos.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As Figs. 6 e 7 mostram os resultados experimentais e simulados para as redes de anéis repartidos com  $g = 1\text{mm}$  e  $g = 2\text{mm}$ , respectivamente. Observa-se em ambos os casos, uma primeira banda passante centrada nas frequências 5,62 GHz e 6,51 GHz, respectivamente, que corresponde à resposta magnética [1-2], valores bem abaixo do corte em 25 GHz, fato que caracteriza um meio de permissividade e permeabilidade negativas. Os resultados da simulação pelo CST Microwave Studio são comparados com os resultados experimentais. Uma segunda banda que corresponde à resposta elétrica é mais claramente observada nas curvas simuladas. Para o caso da rede com fendas de largura  $g = 1\text{ mm}$  a estreita banda de passagem magnética é absolutamente coincidente com o valor simulado. Quando se aumenta a largura do corte para  $g = 2\text{ mm}$  os experimentos confirmam que há um deslocamento para maiores frequências tanto da banda elétrica como da magnética. Os picos correspondem às frequências de ressonância em relação aos coeficientes de transmissão  $S_{21}$ . O fato do ressonador de menor abertura ter a menor frequência de ressonância está coerente, pois fazendo uma analogia com capacitores, a menor distância entre suas placas implica numa maior capacitância, que por sua vez, conforme a equação (1), reduz o valor da frequência; e como a separação  $d$  entre os anéis permanece fixa, não afeta a capacitância mútua nem a indutância.

Na Fig. 8 são comparados os coeficientes de transmissão  $S_{21}$  simulados (curva azul) e medidos (curva vermelha) para a estrutura periódica de anéis fechados (CRRs ( $g=0$ )).

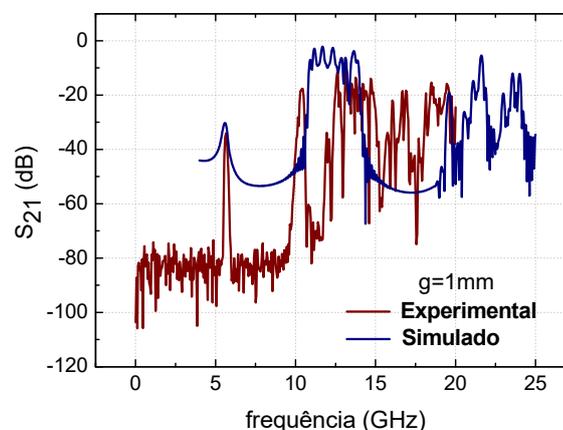


Figura 6. Magnitude (dB) do coeficiente transmissão  $S_{21}$  para a estrutura periódica de sete SRRs, com  $g=1\text{mm}$  imersa no guia de onda. A curva azul mostra o coeficiente simulado (CST) e a curva vermelha, o medido experimentalmente.

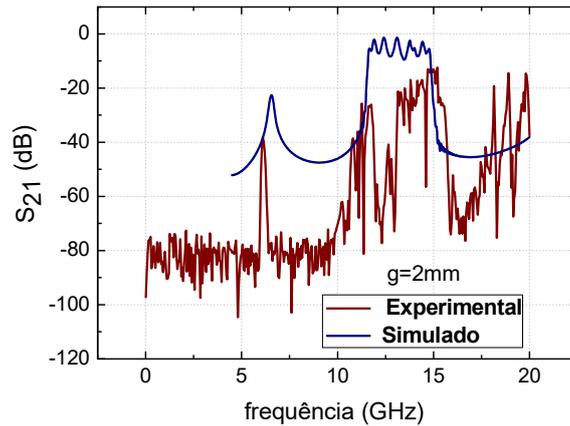


Figura 7. Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão  $S_{21}$  para a estrutura periódica de sete SRRs, com  $g=2,0$  mm imersa no guia de onda. A curva azul mostra o coeficiente simulado (CST) e a curva vermelha, o medido experimentalmente.

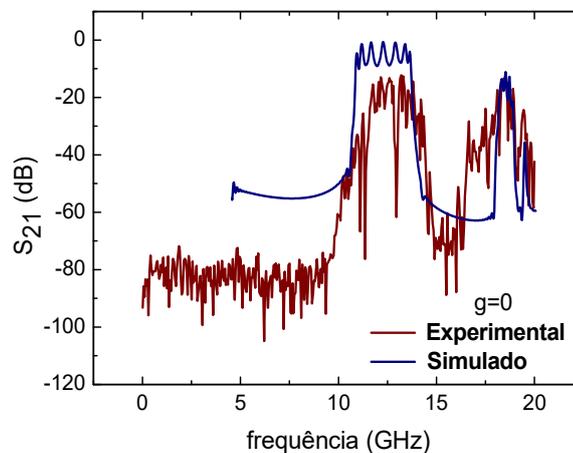


Figura 8. Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão  $S_{21}$  para a estrutura periódica de sete CRRs (“Closed Ring Resonator”) imersa no guia de onda. A curva azul mostra o coeficiente simulado (CST) e a curva vermelha, o medido experimentalmente.

Nota-se que no caso  $g = 0$  os resultados simulados prevêm com grande exatidão a localização e largura da banda elétrica ( $\sim 10,9 - 14,0$  GHz) em relação aos resultados experimentais. Observa-se a presença de sete picos na banda elétrica, que corresponde aos sete anéis ressonantes acoplados. O sinal da resposta magnética não aparece, como era esperado, confirmando que esse efeito somente ocorre com os anéis repartidos. Portanto, fechando os anéis repartidos não há corrente que flui entre os anéis interno e externo e, desta forma, a chamada ressonância magnética não acontece.

## CONCLUSÕES

Um estudo de redes periódicas formadas de anéis repartidos com sete células foi implementado experimentalmente, em que foram determinadas as bandas de

transmissão magnéticas e elétricas. As características experimentais são similares até certo ponto àquelas obtidas para o modelo resultante da simulação. Tais efeitos de transmissão eletromagnética através de um guia de onda que opera abaixo de sua frequência de corte têm aplicação em dispositivos como guias de onda de sub-comprimento de onda, ressoadores, filtros, linhas de retardo.

Analisando o comportamento das estruturas sem aberturas, foi verificado que tais ressoadores não originam ressonâncias magnéticas, comprovando, desta forma, que a separação dos anéis é determinante para a resposta magnética, em virtude do caráter negativo da permeabilidade magnética. Tais estruturas permitem a miniaturização dos dispositivos e no caso deste trabalho, o diâmetro dos anéis é muito menor que o comprimento de onda de operação da resposta magnética, num fator em torno de 1/10.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem sido apoiado pelo CNPq e pela FAFESP.

## REFERÊNCIAS

- [1] BARROSO, J. J.; CASTRO, P. J.; LEITE NETO, J. P. Experiments on wave propagation at 6.0 GHz in a left-handed waveguide, *Microw. Opt. Techn. Lett.*, **v.52, n.10, p. 2175-2178, 2010.**
- [2] MARQUÉS, R.; MARTEL, J.; MESA, F.; MEDINA, F. Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides, *Phys. Rev. Lett.*, **v.89, n.18, p. 183901, 2002.**
- [3] MOSER, H. O.; CASE, B. D. F.; WILHELMI, O.; SAW, B. T. Terahertz response of a microfabricated rod-split-split-ring-resonator electromagnetic material, *Phys. Rev. Lett.*, **v.94, p. (063901)1-4, 2005.**
- [4] PENDRY, J. B.; HOLDEN, A. J.; ROBBINS, D. J.; STEWART, W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **v.47, p. 2075, 1999.**
- [5] Metamaterials Exhibiting Left-Handed Properties and Negative Refraction, *Progress in Electromagnetic Research, PIER*, **v.51, 2005.**
- [6] PENDRY, J. Manipulating the near field with metamaterials, *Optics and Photonic News*, **v.9, p. 32-37, 2004.**
- [7] SMITH D.; PENDRY J.; WILTSHIRE, M. Metamaterials and negative refraction index, *Science*, **v.305, p. 788-792, 2004.**
- [8] RAMAKRISHNA, S.A. Physics of negative refractive index materials, *Reports on Progress in Physics*, **v.68, p. 449-521, 2005.**
- [9] OZBAY, E.; GUVEN, K.; AYDIN, K. Metamaterials with negative permeability and negative refractive index: experiments and simulations, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **v.9, p. S301-S307, 2007.**

- [10] SMITH, D. R.; PADILLA, W. J.; VIER, D. C.; NEMAT-NASSER, S. C.; SCHULTZ, S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, ***Phys. Rev. Lett.***, v.84, n.18, p. 4184-4187, 2000.
- [11] AYDIN, K.; OZBAY, E. Identifying magnetic response of split-ring resonators at microwave frequencies, ***Opto-Electron. Rev.***, v.14, n.3, p. 193-199, 2006.
- [12] AYDIN, K.; BULU, I.; GUVEN, K.; KAFESAKI, M.; SOUKOULIS, C. M.; OZBAY, E. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonators parameters and designs, ***New Journal of Physics***, v.7, n.168, p. 1-15, 2005.
- [13] KATSARAKIS, N.; KOSCHNY, T.; KOSCHNY, M.; KAFESAKI, M.; ECONOMOU, E. N.; SOUKOULIS, C. M., Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators, ***Applied Physics Letters***, v.84, n.15, p. 2943-2945, 2004.
- [14] AYDIN, K.; OZBAY, E. Experimental and numerical analyses of the resonances of split ring resonator, ***Physica Status Solidi (b)***, v.244, n.4, p. 1197-1201, 2007.
- [15] AYDIN, K.; GUVEN, K.; KAFESAKI, M.; ZHANG, L.; SOUKOULIS, C.; OZBAY, E. Experimental observation of true left-handed transmission peaks in metamaterials, ***Opt. Lett.***, v.29, n.22, p. 2623-2625, 2004.
- [16] CASTRO, P. J.; BARROSO, J. J.; LEITE NETO, J. P. Microwave propagation experiments on a waveguide loaded by an array of split-ring resonators. In: IMOC 2011 – SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Natal, 2011. ***Proceedings***. Natal: SBMO/IEEE, 2011. p. 527-532.

## PERIODIC STRUCTURE OF METAMATERIALS MADE OF SPLIT-RING RESONATORS

### ABSTRACT

*With experimental emphasis, periodic structures of metamaterial are studied consisting of split-ring resonators which can display simultaneously electric permittivity and magnetic permeability and present both magnetic and electric resonances. In the present study, the resonators consisting of two concentric rings, with slits diametrically opposed oriented in the transverse directions to the array, are made with layers of 37 micron copper, printed on a substrate of kapton (polyamide) by printed circuit technique. The experiments consisted in inserting a periodic structure with seven-ring array on a square waveguide with lattice parameter 6 mm, corresponding to a cutoff frequency of 25 GHz and identifying the transmission bands due to magnetic and electrical responses for slits with 1 and 2 mm, centered at 5.62 and 6.51 GHz frequencies, respectively, values well below than 25 GHz frequency cutoff, so characterizing a medium with negative permeability and permittivity.*

Key-words: Metamaterials, split-ring resonators, magnetic response, electric response, left-handed transmission band.