

COMPARAÇÃO ENTRE ESTRUTURAS DE METAMATERIAIS COM ANÉIS REPARTIDOS E FECHADOS

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

Metamateriais são compostos metalo-dielétricos artificiais construídos para controlar ondas eletromagnéticas e modificar suas características de propagação. Neste trabalho, ressoadores com dois anéis metálicos concêntricos e repartidos são impressos sobre um substrato de kapton (poliamida). Os experimentos consistiram em acondicionar uma estrutura periódica com seis anéis num guia de onda de secção retangular de $2,29 \times 1,02 \text{ mm}^2$ (frequência de corte de 6,55 GHz) e identificar as bandas de transmissão magnética e elétrica; foi medida uma frequência magnética centrada em 3,45 GHz, valor bem abaixo do corte, fato que caracteriza um meio com permeabilidade e permissividade simultaneamente negativas, demonstrando assim que essas estruturas podem suportar comprimentos de onda muito maiores que a dimensão dos anéis. Em contraposição, a estrutura com anéis fechados possui somente banda elétrica. Portanto, fechando os anéis repartidos não há corrente que flui entre os anéis interno e externo e, desta forma, a ressonância magnética não ocorre.

Palavras-chave: metamateriais, ressoadores de anéis repartidos, ressoadores de anéis fechados, ressonância magnética, ressonância elétrica.

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).

Neste trabalho relatam-se experimentos sobre propagação de ondas através de um guia de onda carregado com ressoadores de anéis repartidos formados de seis células, mostrando os seus respectivos espectros de transmissão e como variam as suas características magnéticas e elétricas. Em contraposição, são comparadas essas características com uma outra estrutura sem abertura dos anéis, ou seja, de anéis fechados.

RESSOADORES DE ANÉIS REPARTIDOS OU NÃO-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 $t = 1,6 \text{ mm}$ e constante dielétrica $\epsilon = 3,2$, confeccionados por técnica de circuito impresso. Os parâmetros geométricos são: espaçamento entre os anéis interno e externo $d = 0,75 \text{ mm}$, largura dos anéis $w = 0,75 \text{ mm}$, raio do anel interno $r = 2,25 \text{ mm}$, tal que o diâmetro da estrutura é $9,00 \text{ mm}$. Nas estruturas com anéis repartidos, as aberturas (“gap”) medem $g = 1,13 \text{ mm}$ e quando $g = 0$ temos o caso de anéis fechados (“closed-ring resonator” – CRR). Nos SRRs 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 “gap” entre os anéis, tal que a frequência de ressonância pode ser estimada por:

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

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 eletromagnético 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.

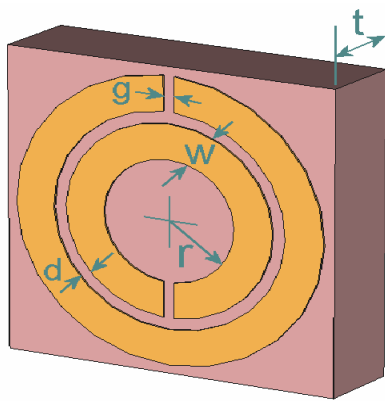


Figura 1. Ressorador de anéis repartidos.

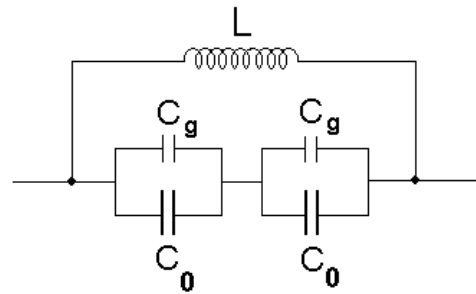


Figura 2. Circuito equivalente da estrutura mostrada na Fig.1.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Fig. 3 retrata as duas redes de anéis com 6 células que são usadas neste trabalho para efeito de comparação: células com abertura de anéis $g = 1,10$ mm e com abertura de anéis $g = 0$.

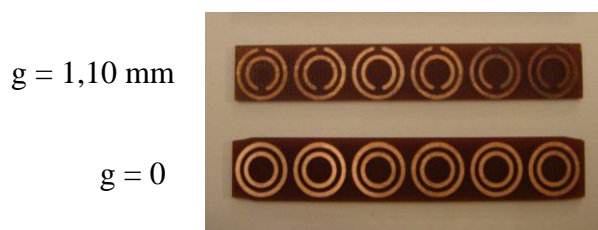


Figura 3. Redes de anéis concêntricos sob comparação: anéis repartidos $g = 1,10$ mm e anéis fechados $g = 0$.

Experimentos foram implementados carregando um guia de onda retangular da banda X com uma rede periódica de anéis repartidos (Fig. 4). A rede é colocada sobre o plano de simetria de um guia de onda padrão WR-90 de secção transversal $2,29 \times 1,02 \text{ mm}^2$ e frequência de corte 6,55 GHz. Duas redes diferentes com 6 células com anéis repartidos e não-repartidos são usadas para investigar o seu efeito nas bandas de transmissão. No detalhe da Fig. 4 vê-se a rede inserida no guia de onda e para facilitar a excitação da rede, a primeira e a última célula da matriz são colocadas parcialmente fora do guia de onda retangular. 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.

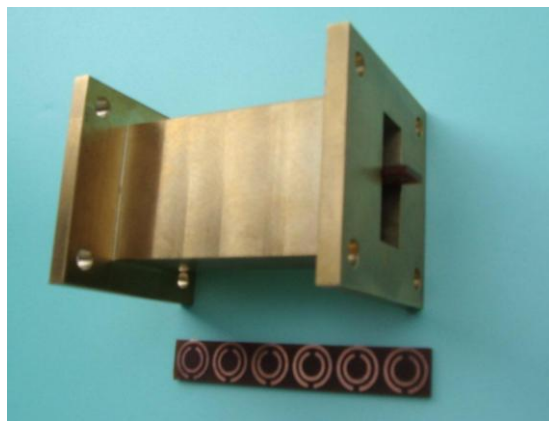


Figura 4. Guia de onda carregado com ressonador de anéis concêntricos



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

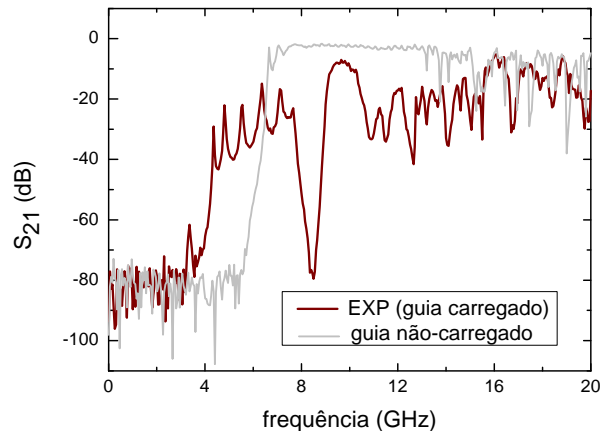
RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

A Fig. 6.a mostra os resultados experimentais para a rede de anéis repartidos. Observa-se uma primeira banda passante centrada na frequência em torno de 3,45 GHz, que corresponde à resposta magnética ⁽¹⁻²⁾, valores bem abaixo do corte em 6,5 GHz, fato que caracteriza um meio de permissividade e permeabilidade negativas. Uma segunda banda com seis picos corresponde à resposta elétrica, cobrindo a faixa de 4,28 a 7,76 GHz. Os picos correspondem às frequências de ressonância em relação aos coeficientes de transmissão S_{21} . Na banda elétrica pode ser observado que o número de picos corresponde ao número de ressoadores, como de fosse um conjunto de cavidades acopladas. Outros picos de transmissão acima da frequência de corte do guia de onda (6,55 GHz) também são observados, como era esperado. Na mesma Fig. 6, juntamente com a banda passante do guia de onda carregado (curva vermelha), é mostrada a resposta do guia não-carregado (curva cinza), onde nenhum pico de ressonância é observado abaixo da frequência de corte de 6,55 GHz.

Os resultados da simulação pelo CST Microwave Studio são comparados com os valores experimentais obtidos para a rede de anéis repartidos com 6 células com uma concordância muito boa, como mostrado na Fig. 6.b. Pela simulação pode-se observar que o pico da banda de transmissão magnética é praticamente coincidente em torno de 3,45 GHz, enquanto que a banda elétrica reside na faixa de 4,20 – 7,79 GHz, portanto, muito próxima do que os experimentos apresentaram.

Na Fig. 7 são comparados os coeficientes de transmissão S_{21} medidos (curva vermelha) e simulados (curva azul) para a estrutura periódica de 6 anéis fechados (CRRs ($g=0$)). Nota-se que no caso $g = 0$, experimentalmente se obteve uma banda elétrica 3,77 – 6,47 GHz e os resultados simulados prevêm com boa exatidão a localização e largura da banda elétrica 3,77 – 6,87 GHz, portanto, um pouco mais larga na direção das frequências mais altas em relação aos resultados experimentais. Observa-se a presença de seis picos na banda elétrica, que corresponde aos seis 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.

(a)



(b)

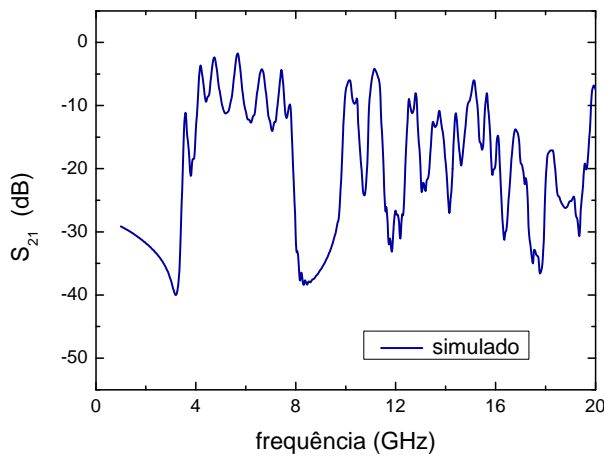


Figura 6. (a) Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} para o ressonador de anéis repartidos com $g = 1,10$ mm de 6 células inserido no guia de onda. A curva vermelha mostra os valores de S_{21} medido experimentalmente e a curva cinza, a calibração com o guia de onda vazio; (b) Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} simulado para a mesma rede.

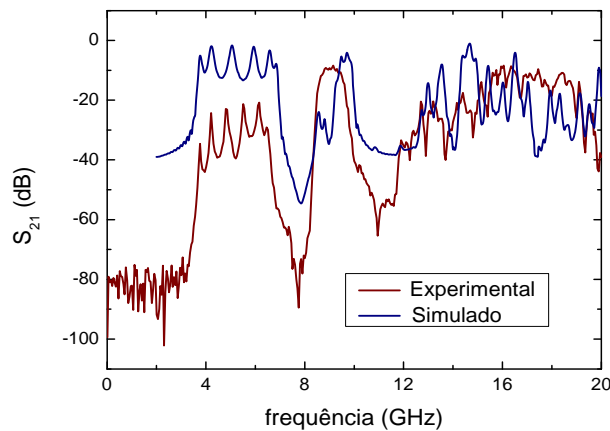


Figura 8. Magnitude (dB) do coeficiente de transmissão S_{21} para a estrutura periódica de sete CRRs (“closed-ring resonator”) imersa no guia de onda. A curva vermelha mostra os valores medidos experimentalmente e a curva azul, os simulados pelo CST.

CONCLUSÕES

Um estudo de redes periódicas formadas de anéis tanto repartidos e como não-repartidos com seis células foi implementado experimentalmente, em que foram determinadas as bandas de transmissão magnéticas e elétricas. As características experimentais são bastante similares 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, fechadas, 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.

COMPARISON BETWEEN METAMATERIALS STRUCTURES OF SPLIT-RING AND CLOSED-RING RESONATORS

ABSTRACT

Metamaterials are artificial metal-dielectric composites engineered to control the flow of electromagnetic waves and their propagation characteristics change. In this work, resonator incorporating two concentric metallic split rings are printed on a substrate of kapton (polyamide). The experiments consisted of inserting a periodic structure with six rings into a rectangular cross-section waveguide of $2.29 \times 1.02 \text{ mm}^2$ (cutoff frequency of 6.55 GHz) and identifying the bands of magnetic and electric transmission; a magnetic frequency centered at 3.45 GHz was measured, value well below the cutoff frequency, which features a medium with simultaneously negative permeability and permittivity, thus demonstrating that these structures can support wavelengths much larger than the size of the rings. In contrast, the structure with closed rings displays only electric band. Therefore, for closed rings there is no current flowing between the inner and outer rings and, thus, the magnetic resonance does not occur.

Key-words: Metamaterials, split-ring resonators, closed-ring resonators, magnetic response, electric response.