

Projeto, Fabricação, Testes e Resposta em Frequência de *Double Negative Metamaterials* em uma dimensão utilizando *Split-Ring Resonator* com Geometria Triangular Equilátera de Cobre em Dielétrico Teflom e Fibra de Vidro

José Everardo J. Ferreira*, José Edimar B. Oliveira*, Luiz Alberto de Andrade**

* Departamento de Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Endereço: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil
Fax: + 55 – 01239473704; email: rasgador@ita.br

** Divisão de Materiais(AMR-C) – Instituto de Aeronáutica e Espaço
Fax: + 55 – 01239476404

Resumo — Desde o primeiro trabalho teórico do Físico Russo Victor G. Veselago publicado em 1968 muitos grupos de pesquisa têm se destacado na concretização desses materiais extraordinários denominados de *Left Handed Metamaterials* (LHM) ou simplesmente Metamateriais. Este trabalho mostra uma caracterização de LHM usando uma estrutura composta por dez arrays 7x7 *Split-Ring Resonators* (SRRs) de geometria triangular equilátera de cobre em *Printed Circuit Board*(PCB) de Teflom com fibra de vidro, onde será medido os parâmetros constitutivos μ e ϵ da estrutura sob teste na frequência de ressonância, e em consequência, será determinado o índice de refração n . Por fim, os dados obtidos serão comparados com os dados conhecidos na literatura no que tange as estruturas SRRs com geometrias circular e retangular.

Palavras-chaves — LHM Metamaterial, SRR Triangular, Índice de Refração Negativo, Politetrafluoretileno.

I. INTRODUÇÃO

1) *Considerações Iniciais*: Segundo o Prof. Dr. John Pendry – *Imperial College London*, a interação entre luz e materiais é a chave na exploração e controle da luz. Assim posto, o índice de refração é o parâmetro chave na interação luz e matéria. Desta simples observação seguem as contribuições na área da Fotônica: lentes usadas em câmeras, fibras óticas, raios laser, etc. Dessa forma, explorando tanto a química como os materiais microestruturados e nanoestruturados, e que tais *Double Negative (DNG)* ou Metamateriais podem ser produzidos artificialmente podendo revelar propriedades nunca encontradas na natureza, como por exemplo, o antiparalelismo entre as velocidades de fase e de grupo (vetor de Poynting). Esta nova classe de metamaterials onde o comprimento físico da estrutura é menor do que o

comprimento de onda da radiação eletromagnética na frequência operacional permite o acesso a materiais com uma diversidade elevada no que tange as propriedades eletromagnéticas. A relação direta entre o comprimento de onda da luz usada e o montante de dados que podem ser fornecidos no registro de meios de comunicação está abaixo do limite de difração. A luz infravermelha permite que um CD de áudio tenha uma capacidade de 600 MB, já uma luz vermelha de comprimento de onda inferior ao infravermelho, eleva a capacidade para DVD em 2GB, enquanto a luz azul, com comprimento de onda curtíssimo, os chamados dispositivos *Blu-Rays*; cuja capacidade de armazenamento eleva-se para 50GB. "Usando materiais convencionais não podemos ir mais longe, contudo, os materiais DNG podem transpor este limite fundamental", explica o Professor Pendry [1]. No que concerne à área de Defesa, o interesse pelo emprego dos metamateriais tem tomado um rumo bastante acelerado, como se pode comprovar através dos trabalhos divulgados em revistas conceituadas na comunidade científica, tais como: *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *Elsevier*, *Nature*, *Newline*, etc. Neste contexto, grupos de pesquisa, por exemplo: do Prof. Dr. David Smith - *Duke University-CA*, Prof. Dr. Vladimir Shalaev – *Purdue University*, Prof. Dr. Xiang Zhang – *University of Califórnia at Berkeley*, etc, estão numa corrida acirrada na fabricação da "manta da invisibilidade" (*Invisibility Cloak*) como degrau inovador da Tecnologia *Stealth* que é também conhecida como *Low Observability Technology (LOT)*. Na área da Medicina, vislumbra-se, entre outros, à aplicação dos metamateriais em exames envolvendo imagens, como por exemplo, exames de ressonância magnética.

2) *Definição de Metamaterial*: Metamateriais (MTMs) Eletromagnético são largamente definidos como estruturas eletromagnéticas homogêneas efetivamente artificial com propriedades não usuais e não estão prontamente disponíveis na natureza. Uma estrutura é dita efetivamente

homogênea quando o tamanho médio da célula estrutural (p) é muito menor do que o comprimento de onda guiado (λ_g). Por isso, o tamanho médio da célula deve ser menor do que um quarto do comprimento de onda guiado, conforme (1) [2].

$$p < \lambda_g / 4 \quad (1)$$

3) *Breve Histórico:* A permissividade ϵ (épsilon) e a permeabilidade magnética μ (mu) são características fundamentais da matéria que determinam a propagação de ondas eletromagnéticas na matéria, na realidade são os únicos parâmetros que figuram na equação da dispersão e que permite a conexão entre a frequência ω de uma onda monocromática e o seu vetor de onda κ , no caso em que o meio é isotrópico, a equação da dispersão (2) fica resumida em (3), assim, temos[2]:

$$\left| \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{ij} \mu_{ij} - k^2 \delta_{ij} + \kappa_i k_j \right| = 0 \quad (2)$$

$$\kappa^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \quad (3) \quad n^2 = \mu \epsilon \quad (4)$$

Onde: n^2 é o quadrado do índice de refração do meio.

ω : é a frequência

Não levando em consideração as perdas e admitindo os valores reais n , ϵ e μ ; de (2) e (4) podemos inferir que simultâneas mudanças dos sinais de ϵ e μ não há efeitos significativos nas relações (3) e (4). Tal situação pode ser interpretada de várias maneiras; primeiro, podemos admitir que as propriedades da matéria não sejam afetadas pela mudança simultânea dos sinais de μ e épsilon. Segundo, pode ser que para ϵ e μ serem simultaneamente negativo, contradiria algumas leis fundamentais da natureza; dessa forma, nenhuma substância natural possui simultaneamente μ e épsilon negativos, finalmente, poderíamos admitir que um material com μ e épsilon (ambos complexos) com componentes reais simultaneamente negativas, teremos uma resposta bem diferente dos materiais convencionais *Right Handed Materials* (RHM) contidos no primeiro quadrante da figura 1. Os LHMs possuem o índice de refração negativo que é a chave do portal da manta da invisibilidade, ponto de máximo na Tecnologia *Stealth*. O índice de refração é uma das características fundamentais da propagação da luz nos materiais, sejam eles RHM ou LHM [16].

O conceito de material artificial teve início no final do século XIX quando em 1898 Jagadis Chunder Bose conduziu o primeiro experimento de microondas em estruturas trançadas que hoje chamamos de “artificial Chiral Media” [3].

Em 1914, Lindman trabalhou em *Chiral Media* o qual ele modelou através da dispersão de várias diminutas hélices de fio orientadas aleatoriamente num meio *host* [5].

Já em 1948, W. E. Kock criou Lentes leves fazendo uso de microondas com arranjos de esferas condutoras, discos e *strips*, dispostos periodicamente [6], dessa forma, tornou-se factível a possibilidade de criar um meio artificial com o propósito de obter um índice de refração efetivo do meio artificial sob teste, desde então, materiais artificiais complexos tem sido objeto de estudo por muitos grupos de pesquisa de vários países. Como é do conhecimento da

comunidade científica e pelo acervo bibliográfico sobre o tema em questão (LHM), é concebível que em meios compósitos particulares, ondas eletromagnéticas interagem com as inclusões que são SRRs de geometria triangular, circular, retangular, etc; indução elétrica e momentos magnéticos que por sua vez afetam o macroscópico, no caso, a permissividade efetiva e a permeabilidade da estrutura integral. Note que estrutura artificial integralizada é igual às inclusões mais substrato (dielétrico).

Desde que os metamateriais passaram a ser sintetizado através da inserção de inclusões artificialmente fabricadas num meio *host* especificado ou numa superfície *host*, isto propicia ao projetista e/ou pesquisador uma larga coleção de parâmetros independentes (graus de liberdade), tal como as propriedades do material *host*, o tamanho, a forma, e composição das inclusões, densidade, arranjos, e alinhamento das inclusões, trabalhar tudo isso de forma criar um metamaterial com uma resposta eletromagnética específica diferente das respostas de cada material envolvido individualmente, é uma sinergia complexa. Em resumo, todos esses parâmetros projetados e sintonizados no comportamento indutivo e capacitivo das inclusões sob teste, podem desempenhar um papel chave no resultado final da síntese e processo. Entre a geometria ou o formato e/ou arranjo das inclusões no *host* são possibilidades agregadoras no processamento de metamateriais [7].

É com esta motivação que muitos grupos de pesquisa, em todo o mundo, estão estudando as mais diversas combinações dessa classe de LHM, além das idéias dinâmicas e inovadoras, sugestões para futuras aplicações desses materiais nas áreas de Defesa, Medicina, Telecomunicações, Computação, etc, tem sido propostas em larga escala. Nesse escopo, enfatizam-se os métodos de fabricação, várias geometrias às inclusões, são condições de contorno indispensáveis na obtenção do sucesso da tarefa proposta. Além disso, a literatura atual lança o *thin wire* e o *Split Ring Resonator* (SRR) usado originalmente pelo Dr. David Smith – *Purdue University*, Schultz and Shelby [7],[9]; preconizado pelo Dr. John Pendry – *Imperial College London*[8], *capacitively loaded strips*(CLS) e SRR feito pelo Dr. Richard Ziolkowski – *University of Arizona* [10], e a estudo teórico numérico para inclusões ômega por Dr. N. Engheta – *University of Pennsylvania*, S. Nalatury, and A. Hoorfar[11].

4) *O Terceiro Quadrante:* Contido na Fig. 1, temos a região Veselago ou Materiais de Veselago[3].

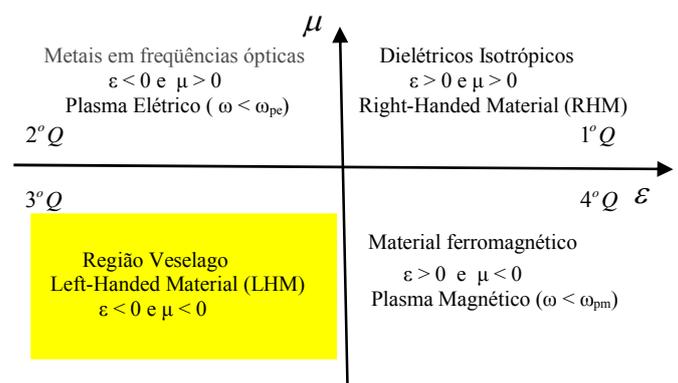


Fig. 1 Permissividade x permeabilidade ($\epsilon \times \mu$)

5) LHM e as Equações de Maxwell:

Considerando uma região cheia de um material homogêneo e isotrópico, as equações de Maxwell no Sistema SI podem ser escritas [15]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

De modo que com $e^{j\omega t}$ variando no tempo e as relações constitutivas onde,

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} \quad \text{e} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

Onde temos

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu^* \vec{H}, \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (7)$$

Onde:

μ^* é a permeabilidade magnética complexa, e

ϵ é a permissividade elétrica, parte real.

De (7), o rotacional do vetor campo magnético \vec{H} , ou seja, $\nabla \times \vec{H}$, também pode ser escrito:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} \quad (8)$$

Onde a quantidade entre parêntesis é definido como a permissividade elétrica complexa ou constante dielétrica complexa ϵ^* , isto é,

$$\epsilon^* = \left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (9)$$

Aqui o σ é a condutividade do material. Quando a condutividade é larga, o material é considerado metálico natural; do contrário, é considerado um material dielétrico. A constante dielétrica complexa também pode ser escrita da seguinte forma:

$\epsilon^* = \epsilon_o (\epsilon' - j\epsilon'')$, com ϵ'' denominado de fator de perdas, e é definido por:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_o} \quad (11)$$

Permissividade elétrica normalizada:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_o} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (12)$$

De maneira análoga para a permeabilidade magnética, temos

$$\mu_r = \frac{\mu^*}{\mu_o} = \mu' - j\mu'' \quad (13)$$

Podemos ainda escrever (12) da seguinte forma:

$$\epsilon' = \text{Re} \left(\frac{\epsilon^*}{\epsilon_o} \right) \quad \text{e} \quad \epsilon'' = -\text{Im} \left(\frac{\epsilon^*}{\epsilon_o} \right) \quad (14)$$

$$\epsilon_r = \epsilon' (1 - j \text{tg} \delta_e), \quad \text{onde} \quad \text{tg} \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (15)$$

O termo $\text{tg} \delta_e$ significa as perdas elétrica de primeira ordem.

De forma análoga a equação (13), no que tange a permeabilidade magnética, temos:

$$\mu' = \text{Re} \left(\frac{\mu^*}{\mu_o} \right) \quad \text{e} \quad \mu'' = -\text{Im} \left(\frac{\mu^*}{\mu_o} \right) \quad (16)$$

$$\mu_r = \mu' (1 - j \text{tg} \delta_m) \quad \text{onde} \quad \text{tg} \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (17)$$

O termo $\text{tg} \delta_m$ significa as perdas magnética de primeira ordem.

II. SIMULAÇÃO

Para prever a resposta de frequência da célula unitária de geometria triangular na configuração metamaterial proposta, cada um reconhece as suas características periódicas e recorre-se a uma formulação matemática baseada em modos de expansão de Floquet [13]. A geometria da célula investigada nesta publicação é ilustrada na Fig 2.a, ao passo que a sua resposta de frequência foi predita usando um programa de simulação CST *Microwave Studio* (www.cst.com).

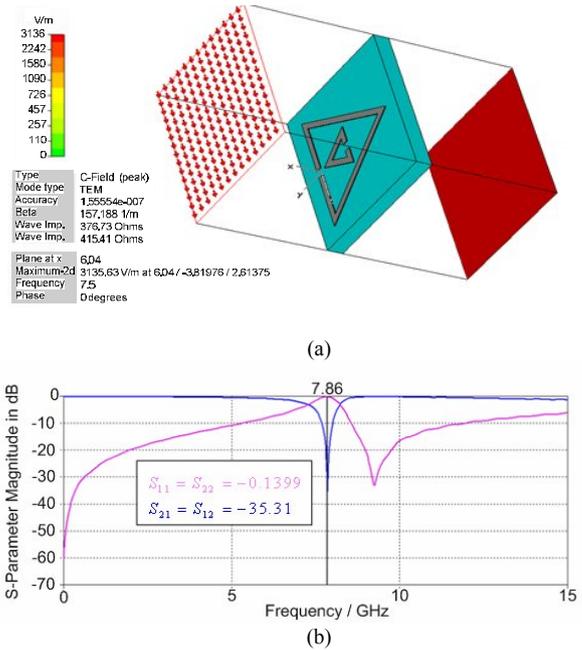


Fig. 2: Característica do Metamaterial. (a) geometria da célula unitária (b) resposta em frequência

A resposta em frequência como visto na Fig. 2 (b) a cima, está em consonância com a Fig. 16 (a) na página 1526 da referência [12].

III. Fabricação do Metamaterial

As previsões teóricas e simuladas ao longo das pesquisas estão sendo usadas para confecção do *set-up* experimental, uma vez que as placas contendo *arrays* de *Split-Ring Resonators* nas seguintes geometrias: triangular, trapezoidal, circular e retangular que já estão prontos. No que tange ao SRR circular, faremos um *set-up* diferenciado, fins atender solicitação da Unicamp. Foi feito uma Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), fins auxiliar no *set-up* experimental, é fundamental saber como está organizado o dielétrico, no caso a junção de fibra de vidro com Teflom, pois implicará na resposta do épsilon normalizado e em conseqüência, na capacitância equivalente. Na fig.3, podemos observar duas cores onde a região da cor cinza escura denota o polímero Teflom, enquanto que a região da cor cinza clara significa a aglomeração de fibras de vidro introduzidas no polímero e a cor branca significa o cobre. O ponto mais importante é compreender a relação entre a resposta de frequência e o revestimento interno e a morfologia intrínseca do substrato, e como eles estão arranjados em suas camadas, tudo isso, convergem às diferentes respostas e comportamentos do dielétrico a uma determinada faixa de frequência [14].

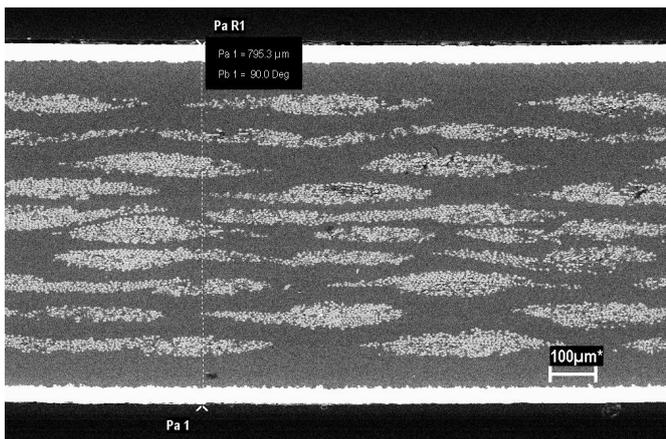


Fig. 3: Substrato do Metamaterial - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

IV. Conclusão

Este Paper mostra a resposta em frequência de um SRR de geometria triangular equilátera numa estrutura eletromagnética do tipo *microstripline* em PCB composto de *polytetrafluoroethylene* (PTFE) / fibra de vidro trançada. A realização da estrutura proposta foi investigada baseada na dependência da sua resposta de frequência e fazendo uso dos parâmetros S, obtendo uma ressonância numa frequência próxima de 8 GHz, limite inferior da banda X.

REFERÊNCIAS

- [1] The Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) Newline Issue 33, Spring 2005, pp. 10 e 11.
- [2] Cristophe Caloz, Tatsuo Itoh, Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application, 2006.
- [3] V. G. Veselago, "The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of μ e ϵ Sov. Phys. Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan-Feb. 1968.

- [4] J. C. Bose, "On the Rotation of Plane of Polarization of Electric Waves by Twisted Structure," Proceedings of the Royal Society, Vol.63, PP. 146-152, 1898.
- [5] K. L. V. Lindell, A. H. Sihvola, and J. Kurkijarvi, "Karl F. Lindman: The last Hertzian and a Harbinger of Electromagnetic Chirality," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 34, No. 3, pp. 24 – 30, 1992.
- [6] W. E. Kock, "Metalic Delay Lenses" Bell Systems Technical Journal, Vol. 27, pp. 58 – 82, 1948.
- [7] D. R. Smith, W. J. Padilha, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, 1 May 2000.
- [8] J. B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins, W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, No. 11, pp. 20075 – 2081, 1999.
- [9] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," Science, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, 6 April 2001.
- [10] R. W. Ziolkowski, "Tailoring the electromagnetic responses of metamaterials: Double negative metamaterial designs and experiments," a talk at the IEEE-Nano '2000 Conference, Washington DC, August 26-28, 2002. Also see R. W. Ziolkowski, "Double Negative Metamaterial, Physics, Design and Experiments," Presented at KITP Quantum Optics, July 2002, available at <http://online.kitp.ucsb.edu/online/qo02/ziolkowski/>
- [11] N. Engheta, S. Nalatury, and A. Hoorfar, "The Role of Geometry of Inclusions in Forming Metamaterials with Negative Permittivity and Permeability" a poster presented at XXVII General Assembly of International Union of Radio Science (URSI GA'02), in Maastricht, The Netherlands, August 17-24, 2002. Paper #1935 in the CD.
- [12] R. W. Ziolkowski, "Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials," IEEE transaction on Antenna and Propagation, Vol. 51, NO. 7, July 2003.
- [13] R. Chiniard, A. Barka and O. Pascal "Floquet Modes Expansion Coupled to Multidomain Techniques Devoted to Large Phased Array Modelling", European Microwave Conference, Vol. 1, 2005.
- [14] W. David Kingery, H. K. Bowen, and Donald R. Uhlmann, Introduction to Ceramics, pp. 913 -1006, Hardcover – April 20, 1976.
- [15] M. Sucher, and J. Fox, "Handbook of MICROWAVE MEASUREMENTS," Third Edition, Vol. II, 1963.
- [16] A. K. Sarychev, and V. M. Shalaev, "Electrodynamics of Metamaterials," First Edition, 2007.