

Extraction of effective parameters of double omega shaped metamaterial (Extraction des paramètres effectifs d'une structure métamatériau sous la forme « double oméga »)

Abdelaziz Qarchi ¹, Hicham Belkebir ¹, Abdellah Mir ²

1 Département AEEE, ENSAM, Marjane 2, BP 15290 Elmansour, Université Moulay Ismail, Meknès, Morocco..

2 Département de physique, laboratoire de physique des matériaux et modélisation des systèmes (LPMMS), Faculté des sciences, associé au CNRST (URAC 08), Université Moulay Ismail, Meknès, Morocco.

Received in 15 Nov 2010, Revised 15 Nov 2010, Accepted 18 Jan 2011.

* Corresponding author : E-mail : qarchia@yahoo.fr; Tel : +212661848832; Fax : +212.

Abstract

The metamaterials are composite structures based on the assembly of magnetic resonators and infinitely long metal rods at sub-wavelength scale, however there are some other structures which exhibit the same behavior, in particular the structure "double omega", subject of our study. The extraction of effective parameters by the method of reflection-transmission coefficients demonstrates the metamaterial behavior of the said structure.

key words : Metamaterials ; Double Omega structure ; Effective Parameters ; Negative refraction.

Résumé

Les métamatériaux sont des structures composites basées sur l'assemblage des résonateurs magnétiques et des tiges métalliques infiniment longues à l'échelle sub-longueur d'onde, cependant il existe d'autres structures qui exhibent le même comportement, en particulier la structure « double oméga » objet de notre étude. L'extraction des paramètres effectifs par la méthode des coefficients de réflexion-transmission démontre le comportement en métamatériau de ladite structure.

Mots-clés : Métamatériau ; Structure double Oméga ; Paramètres effectifs ; Réfraction négative.

1. Introduction

En 1968, Victor Veselago [1], un physicien russe avait proposé qu'un milieu ayant une perméabilité et une permittivité simultanément négatives aurait des propriétés différentes en comparaison avec des milieux conventionnels, notamment une réfraction négative, une vitesse de groupe négative, une inversion de rayonnement de Cerenkov et de l'effet Doppler.

Il a fallu attendre l'an 2000 pour voir la première réalisation d'un tel milieu avec la synthèse de ce que Sir John Pendry a baptisé Swiss Roll ou Rouleau Suisse, structure qui présente une activité artificielle au domaine des micro-ondes, et par la suite une autre structure moins absorbante nommé SRR (Split Ring Resonator) [2] ou Résonateur en Anneau Fondu (RAF), structure qui, en l'associant à un réseau de tige métallique [3], Pendry a pu obtenir un milieu ayant un indice de réfraction négatif.

Plusieurs nomenclatures sont apparues depuis la synthèse d'un tel milieu ; milieu main gauche [1-4], milieu à indice de réfraction négatif (media with negative refractive index)[1-5-6], « backward-wave » qui veut dire milieu où l'onde se déplace en arrière [7], et DNG (double négative materials) [8] et métamatériau.

Un métamatériau est donc un assemblage de deux structures, l'une qui présente une perméabilité négative (SRR), et l'autre qui présente une permittivité négative (réseau de tiges métalliques).

Néanmoins, plusieurs travaux ont démontré la possibilité de synthèse d'un milieu pareil par le moyen de différentes formes, en particulier la forme S [9], la forme U [10], la forme V [11], la forme triangulaire [12] et la forme dendrite [13].

Dans notre travail, nous présentons une structure qui a la particularité de présenter à la fois une perméabilité et une permittivité négative. Par le biais du logiciel commercial HFSS [14] qui utilise les éléments finis comme méthode

de calcul, et en incidence normale, les paramètres « S » sont extraits de la simulation de la maille primitive de la structure, et par une technique d'inversion des coefficients de Fresnel [15], les paramètres effectifs sont déterminés, ainsi on montre qu'il existe une plage de fréquence où l'indice de réfraction effectif du milieu est négatif.

2. Design et simulation

La structure proposée dans cette étude est de l'or sous la forme de la lettre grec Oméga disposé sur les deux faces opposées d'un substrat diélectrique (Duroïd) de permittivité 2.2, d'épaisseur 1mm, la périodicité dans l'espace est de 3.63 mm, les dimensions sont explicitées sur la figure 1.

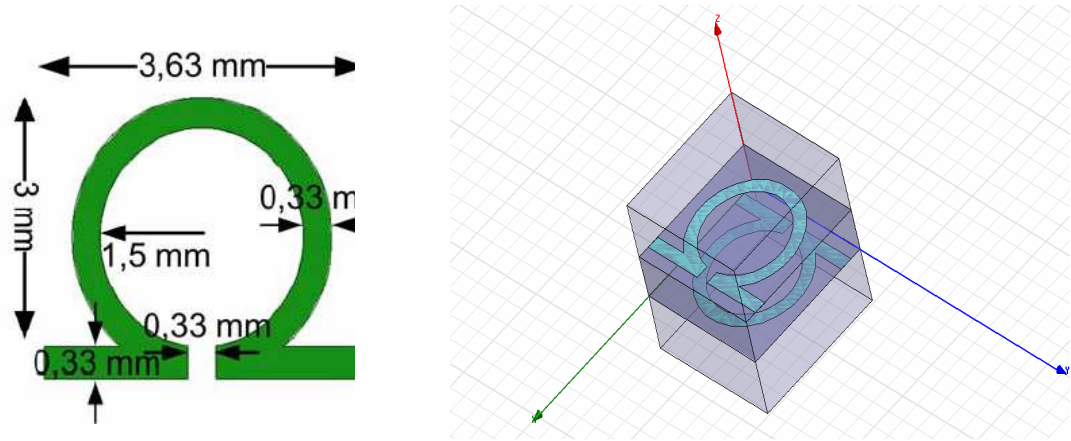


Fig.1 : Géométrie et dimensions de la structure double Oméga.

La structure est polarisée de façon à ce que le champ magnétique est dirigé suivant l'axe z, le champ électrique est dirigée suivant l'axe y, le vecteur d'onde est dirigé suivant l'axe x, des conditions aux limites de mur magnétique et mur électrique sont appliquées respectivement et perpendiculairement aux axes z et y. La simulation est faite sur une bande de fréquence entre 5 GHz et 27 GHz avec un incrément de 0.01 GHz.

L'extraction des paramètres effectifs est réalisée à partir des paramètres « S » comme c'est décrit sur la référence [15] selon la méthode :

$$t^{-1} = \left[\cos(nkd) - \frac{i}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \sin(nkd) \right] e^{ikd} \quad (1)$$

$$\frac{r}{t} = \frac{-i}{2} \left(z - \frac{1}{z} \right) \sin(nkd) \quad (2)$$

Avec k est le nombre d'onde, d est l'épaisseur de la structure, et $t' = te^{ikd}$ est le coefficient de transmission normalisé.

Ainsi en inversant les équations (1) et (2), on obtient :

$$z = \frac{+ \sqrt{(1+r)^2 - t'^2}}{- \sqrt{(1-r)^2 - t'^2}} \quad (3)$$

$$im(n) = \frac{+im \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2t'} [1 - (r^2 - t'^2)] \right) \right)}{kd} \quad (4)$$

$$re(n) = \frac{+re \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{2t'} [1 - (r^2 - t'^2)] \right) \right)}{kd} \quad (5)$$

Ou encore en utilisant les paramètres « S » comme cela est décrit à la référence [12] :

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \tag{6}$$

$$n = \left(\frac{\cos^{-1}\left(\frac{1}{2S_{21}}[1 - (S_{11}^2 - S_{21}^2)]\right)}{kd} \right) \tag{7}$$

L'ambiguïté sur les signes des équations (3), (4) et (5) est vite évitée si on tient compte du fait que la partie réelle de l'impédance est positive s'il s'agit d'un milieu passif, et la partie imaginaire de l'indice de réfraction est positive pour assurer que l'amplitude de l'onde incidente décroît à l'intérieur de la structure.

Ensuite la perméabilité et la permittivité sont déduites du fait que $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ et $z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$.

3. Résultats de simulation

L'analyse fréquentielle des paramètres S (coefficients de réflexion-transmission) montre l'existence d'une résonance sub-longueur d'onde qui est due à l'effet capacitif créé par la géométrie de la structure, ainsi nous avons un simple résonateur LC avec une fréquence de résonance qui ne dépend que de l'inductance et de la capacité de la structure équivalente $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. La résonance est située aux alentours de la fréquence 18.59 GHz (Voir la fig.2). L'impédance

du milieu positive comme le montre la fig.3 assure que le milieu est passif. La perméabilité évolue comme le modèle de Lorentz, elle est négative sur la plage de fréquence située entre 16.15 GHz et 22.50 GHz comme il apparaît sur la fig.4. La fig.5 montre que la permittivité est négative sur la plage de fréquence située avant 18.59 GHz, ce qui est en parfait accord avec le modèle de Drude. L'indice de réfraction est négatif sur la plage de fréquence située entre 16.15 GHz et 18.59 GHz, c'est la plage de fréquence où la permittivité et la perméabilité sont simultanément négatives comme il apparaît sur la Fig. 6. Il faut noter qu'il est possible de piloter la transmission en modifiant un certain nombre de paramètres à savoir les dimensions de la structure (hauteur, largeur, ouverture du gap...) et la nature du substrat et son épaisseur... Ainsi on montre que la synthèse d'un milieu à indice de réfraction négatif est possible avec une géométrie pareille sans avoir recours aux réseaux de tiges métalliques comme c'est le cas pour les Métamatériaux classiques.

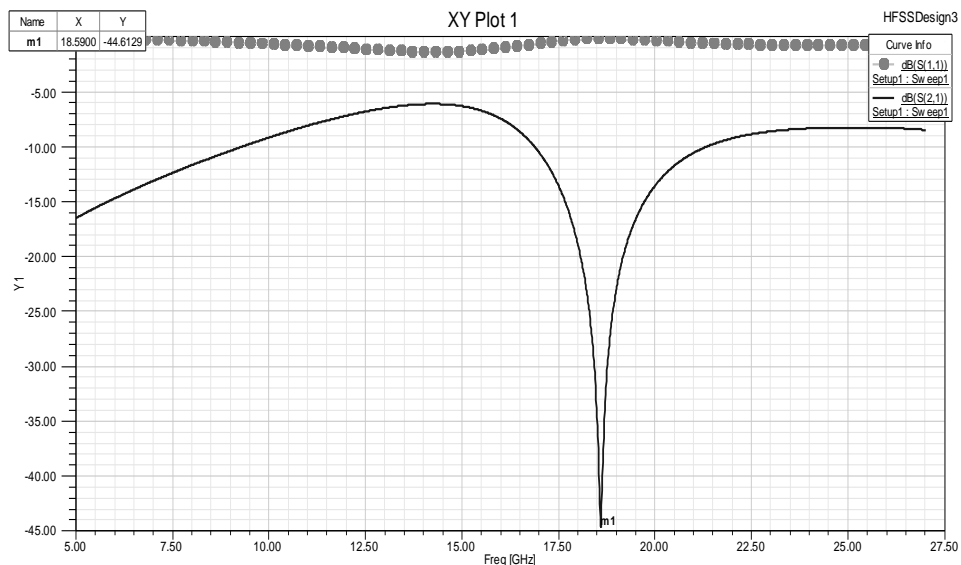


Fig.2 : Evolution fréquentielle de la partie réelle des coefficients de réflexion-transmission montre une résonance à la fréquence de 18.59 GHz.

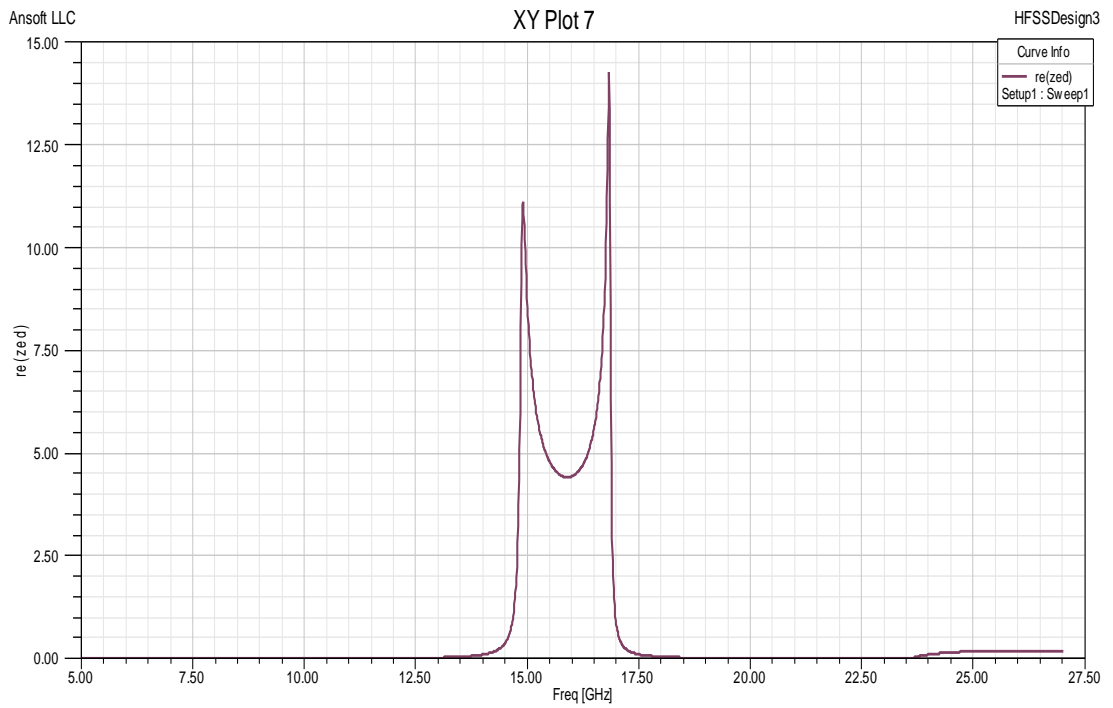


Fig.3: La partie réelle de l'impédance est positive, il s'agit d'un milieu passif.

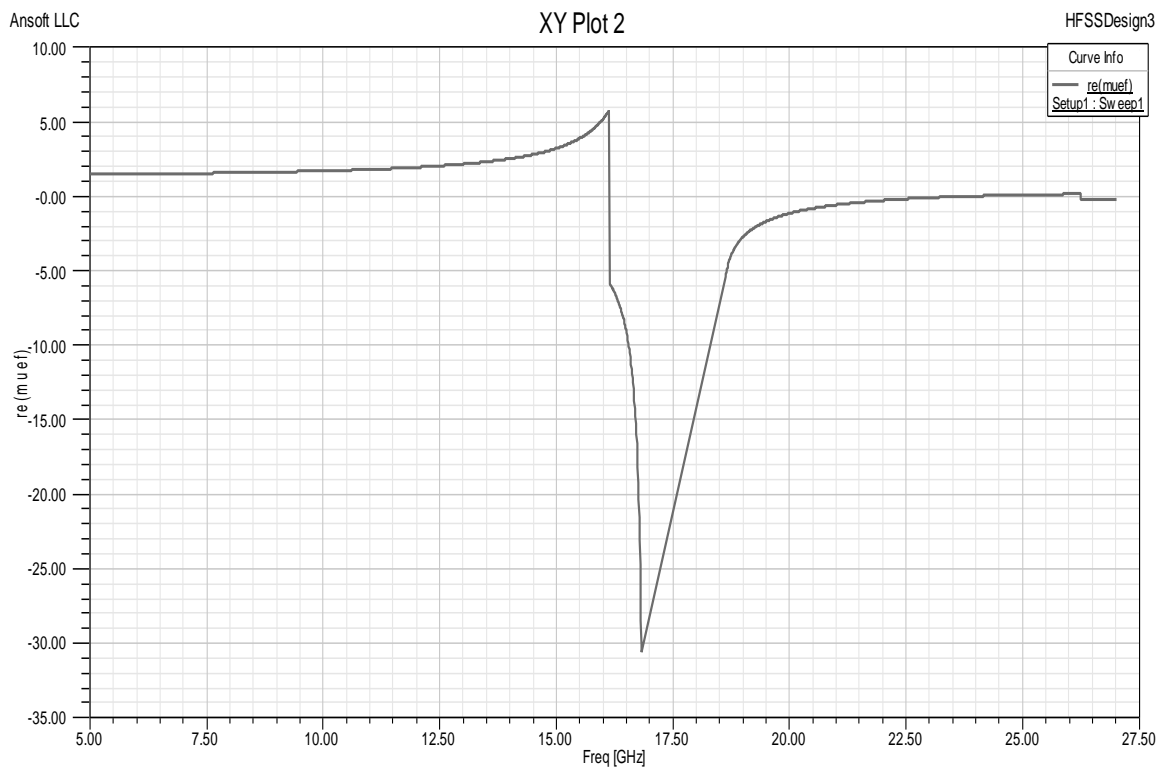


Fig.4 : La partie réelle de la perméabilité est négative sur la bande de fréquence 16.5 GHz et 22.5 GHz.

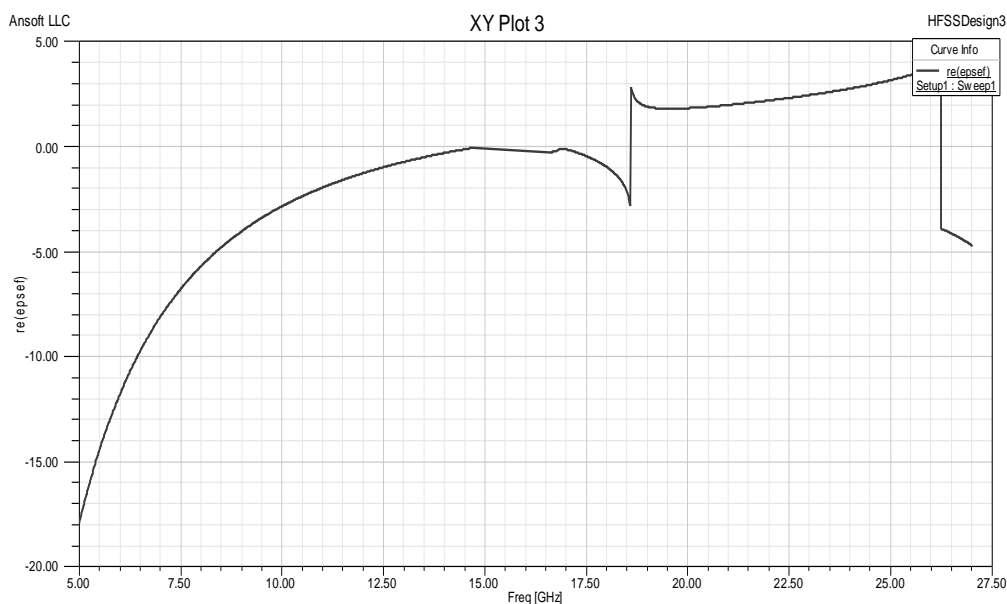


Fig.5 : la partie réelle de la permittivité est négative sur la bande précédant la fréquence plasmas à 18.59 GHz.

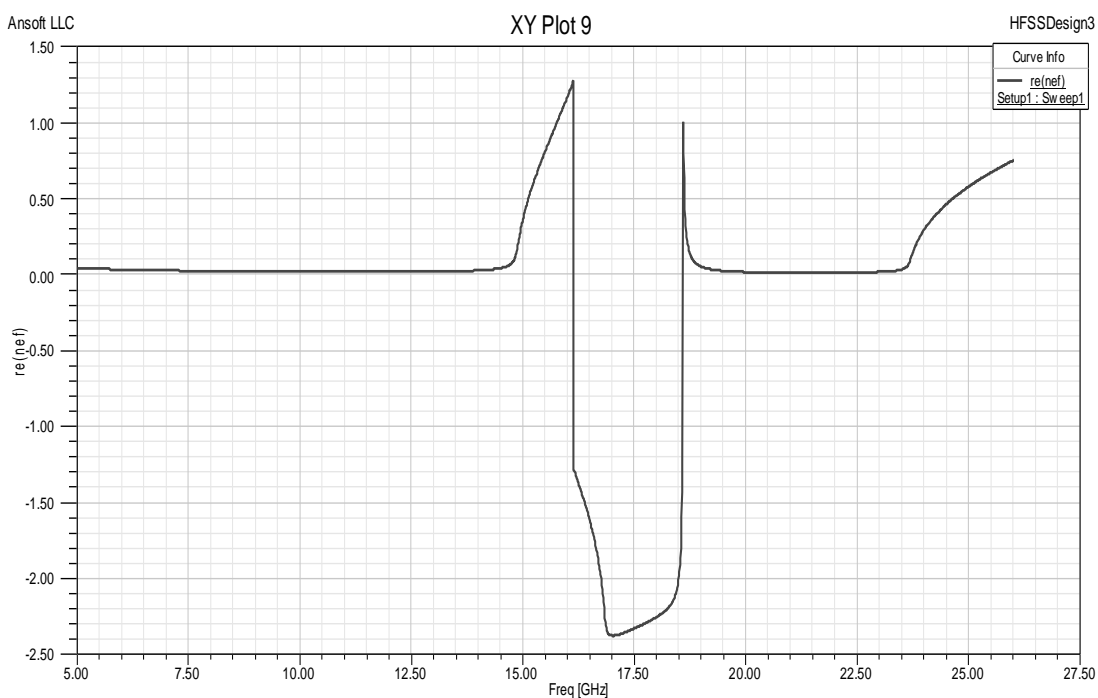


Fig.6 : Evolution fréquentielle de la partie réelle de l'indice de réfraction du milieu, elle est négative sur la bande de fréquence de 16.15 GHz et 18.59 GHz.

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté une structure métamatériau un peu particulière sous la forme "double oméga". Sa particularité provient du fait qu'elle exhibe à la fois des activités électrique et magnétique à cause de son caractère bianisotropique. Une telle configuration géométrique nous a permis de mettre en évidence une plage de fréquences où la structure se comporte comme un milieu à indice de réfraction négatif. L'exploitation de ces résultats dans la réalisation d'un tel milieu dans le domaine optique est confrontée aux problèmes d'absorption d'une part, et aux difficultés technologiques qui imposent des dimensions nanométriques à la structure d'autre part.

5. Références

1. Veselago, V. G., "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Usp. Fiz. Nauk*, 10 (1968) 509. [*Usp. Fiz. Nauk*], 92 (1967) 517.
2. Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J. and Stewart, W. J., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47 (1999) 2075.
3. Pendry, J.B., Holden, A. J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J., "low frequency plasmons in thin wire structures", *J. Phys.: Condens. Matter* 10 (1998) 4785.
4. Caloz, C., Okabe, H., Iwai, T. and Itoh, T., "Transmission line approach of left-handed materials," in Proc.USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Antonio, 1 (2002) 39.
5. Pendry, J. B., "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, 85, (2000) 3966.
6. Iyer, A. K. and Eleftheriades, G. V., "Negative refractive index metamaterials supporting 2-D waves," *IEEE MTT International Microwave Symposium (IMS) Digest*, Seattle, WA, (2002) 1067.
7. Lindell, I. V., Tretyakov, S. A., Nikoskinen, K. I. and Ilvonen, S., "BW media—Media with negative parameters, capable of supporting backward waves," *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 31 (2001) 129.
8. Ziolkowski, R. W. and Heyman, E., "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability," *Phys. Rev. E*, 64 (2001) 056625.
9. Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzczak, T. M. and Kong, J. A. "left handed metamaterials composed of only S shaped resonators", *physical review E*, 70 (2004) 057605.
10. Gallas, B., Robbie, K., Abdeddaïm, M., Guida, G., Yang, J. Rivory, J. and Priou, A., "Silver square nanospirals mimic optical properties of U shaped metamaterials", *Optics express*, 18 (2010) 16335.
11. Ekmekci, E., Turhan Sayan, G., "investigation of permittivity and permeability for a novel V shaped metamaterial using simulated S parameters", *proceedings of 5th international conference on electrical and electronics engineering*, Bursa, Turkey (2007).
12. Sabah, C., "tunable metamaterial design composed of triangular Split Ring Resonator and wire strip for S and C microwave bands", *Progress in Electromagnetics Research B*, 22 (2010) 341.
13. Zhao, W., Zhao, X. , "fabrication and characterization of metamaterials at optical frequencies", *optical materials* 32 (2010) 422.
14. High Frequency Structure Simulator v 11", *Ansoft Corporation*, 2008.
15. Smith, D.R. and Schultz, S., Markos, P., Soukoulis, C.M., "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflexion and transmission coefficients" *Phys. Rev. B*, 65 (2002) 195104.

(2011) www.jmaterenvironsci.com