

垂直入射条件下金属环的谐振特性*

陈娟 张安学[†] 田春明

(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2010 年 10 月 20 日收到; 2011 年 4 月 2 日收到修改稿)

本文研究垂直入射条件下水平极化和垂直极化时金属开口谐振环 (split ring resonator, SRR) 的电磁响应行为. 通过分析这两种情况下的透射系数、介电常数和磁导率, 发现垂直极化时, SRR 可以产生电谐振实现负介电常数, 其频段远高于磁谐振频段; 水平极化时, SRR 只能产生磁谐振实现负磁导率, 其频段与水平入射时的 SRR 的磁谐振频段相对应. 通过仿真对此进行了证明, 并对产生电谐振和磁谐振的原因进行了分析.

关键词: 左手材料, 金属开口谐振环, 电谐振, 磁谐振

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.25.Bs

1 引言

左手材料 (left handed metamaterials, LHM) 是一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的人工周期结构材料, 具有许多奇异性, 如负折射效应^[1]、反常 Doppler 效应^[2] 和完美透镜效应^[3] 等. 目前, 在微波频段, 利用周期性排列的金属开口谐振环和导电金属线来分别实现负磁导率和负介电常数^[4,5] 是实现左手材料结构的主要形式之一, 组合方式较为复杂. 因此, 许多研究着力于在更为简单和实用的单一结构中实现“双负”^[6-8]. 但是, 不论采用哪种结构实现左手材料, 都要求入射电磁波的波矢方向平行于左手材料样品, 即波矢平行于贴片所在的平面. 而随着对左手材料研究的不断深入, 特别是对于极具应用价值的红外、可见光高频段的左手材料, 许多实验方案通常采用在介质基板上刻蚀单层的周期排列金属结构图案, 很难以电磁波平行入射的方式对其电磁响应行为进行研究, 必须将电磁波垂直入射于样品, 因此, 越来越多的工作集中于垂直入射问题^[9-12]. 如 Soukoulis 等^[9-11] 分别采用金属线对结构和“工”字对结构在电磁波垂直入射情况下实现了负折射. 刘亚红等^[12] 讨论了垂直入射条件下厚金属环结构的负磁导率与左手材料行为, 但只讨论了电场方向平行于开口的情况, 对

另一个极化方向没有进行分析.

本文研究垂直入射条件下金属开口谐振环的电磁响应行为, 考虑了水平极化和垂直极化两种情况. 虽然目前对金属开口谐振环的研究非常广泛^[12-15], 但大部分工作还集中在平行入射条件下, 且考虑的都是金属环的磁谐振行为, 关于金属环可以产生电谐振的研究还未见报道. 本文通过分析发现, 当入射波为垂直极化时, SRR 可以产生电谐振实现负介电常数, 其频段远高于磁谐振频段; 水平极化时, SRR 只能产生磁谐振实现负磁导率, 其频段与水平入射时的 SRR 的磁谐振频段相对应.

2 金属开口谐振环的电谐振行为

本文所采用的金属开口谐振环单元结构如图 1 所示. 环的几何参数为: 高度 $L = 3 \text{ mm}$, 金属线宽 0.25 mm , 环开口长度 0.5 mm , 内外环间隔 0.5 mm , 环的厚度为 0.1 mm . 电磁波垂直入射金属环, 波矢量 $\mathbf{K} = -k\hat{z}$. 我们首先讨论电场 $\mathbf{E}$ 垂直极化的情况, 即 $\mathbf{E} = E_y\hat{y}$. 采用 CST MICROWAVE STUDIO (CST) 软件对金属开口谐振环的透射系数进行计算, 所得结果如图 2 中实线所示. 从该图可以看出, 在 30 GHz 附近, 透射曲线出现禁带, 谐振环的相位发生跃变.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61001039) 和高等学校博士学科点专项基金 (批准号: 20090201120030) 资助的课题.

[†] E-mail: anxuezhong@mail.xjtu.edu.cn

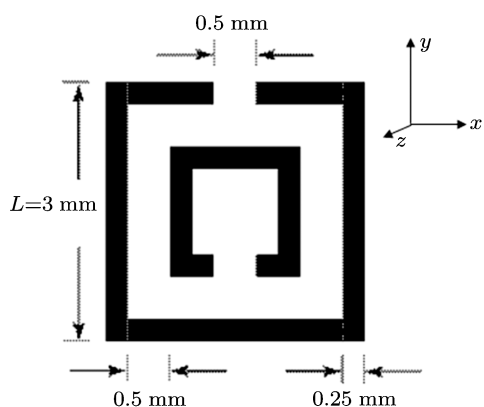


图1 金属开口谐振环的单元结构示意图

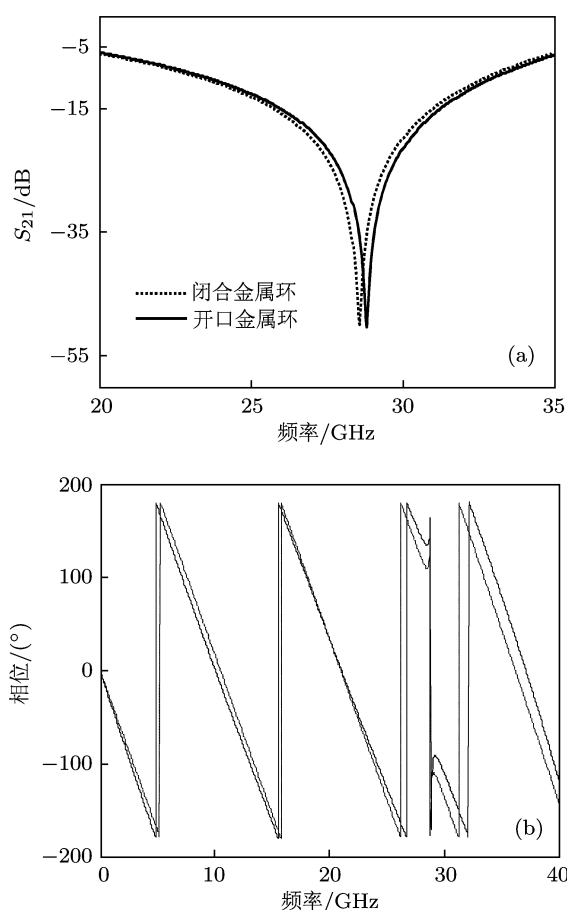


图2 (a) 垂直极化条件下, 谐振环透射系数的幅度; (b) 垂直极化条件下, 谐振环透射系数的相位

图2中的禁带说明在30 GHz附近谐振环的介电常数 ϵ 或磁导率 μ 为负值, 即在30 GHz处存在电谐振或磁谐振效应. 谐振形式可采用将金属开口环进行封闭的办法来进行辨别. 这是因为SRR的磁谐振效应主要由开口处的感应电流引起, 开口封闭后, 磁谐振将会受到很大影响, 而电谐振基本不受影响. 封闭金属环的透射系数如图2中虚线所示,

从该图可以看出, 将金属开口环进行封闭后, 谐振效应基本没有发生变化, 只是谐振频率降低了1%, 这说明该处的禁带效应是由电谐振引起, 谐振点的偏移是由开口封闭后金属线长度的增加而导致.

更有效的区分电谐振和磁谐振的方法是计算此时的介电常数 ϵ 和磁导率 μ . 由仿真所得的散射参数可以计算出金属开口谐振环的等效介电常数和磁导率^[16], 所得结果如图3所示. 为了显示的需要, 图中对电参数进行了归一化, 即令 $\epsilon_n(f) = \frac{\epsilon(f)}{\max|\epsilon(f)|}$, $\mu_n(f) = \frac{\mu(f)}{\max|\mu(f)|}$, 其中 ϵ_n 和 μ_n 为归一化参数. 从图中可以看出, 禁带附近, 介电常数 ϵ 为负值, 磁导率 μ 为正值. 这进一步说明了此时的谐振是电谐振.

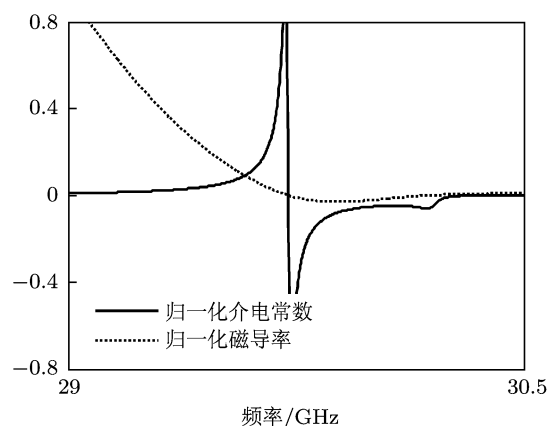


图3 垂直极化条件下, 金属开口谐振环的归一化介电常数和磁导率

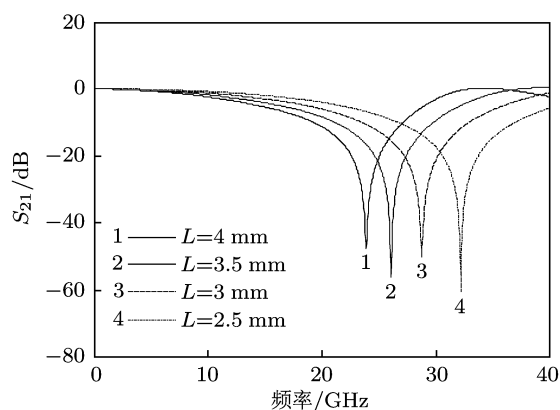


图4 金属开口环谐振频率随高度L的变化

以上分析说明, 在垂直入射情况下, 金属开口谐振环可产生电谐振效应, 实现负介电常数. 这打破了传统研究所认为的SRR只能实现负磁导率的观点. 该电谐振主要是由金属环中平行于外部电场的金属线引起, 改变环的高度L, 谐振频率会发生相应的变化. 图4中给出了不同高度下的金属环的

谐振频率. 由图可以看出, 随着谐振环高度的增加, 谐振频率逐渐降低.

3 金属开口谐振环的磁谐振行为

为了进一步研究金属开口谐振环的电磁响应行为, 我们旋转入射波的极化方向, 即令 $\mathbf{E} = E_x \hat{x}$ (水平极化). 分别计算金属环中存在开口和开口闭合时的透射系数, 计算结果如图 5 所示. 从该图可以看出, 当电场为水平极化时, 开口金属环在 13 GHz 处出现禁带, 相位在 13 GHz 处发生跃变. 将金属谐振环开口封闭, 13 GHz 处的谐振和相位跃变完全消失, 这说明该谐振为磁谐振. 计算此时的介电常数 ϵ 和磁导率 μ , 所得结果如图 6 所示. 由图可以看出, 13 GHz 处, 介电常数为正值, 磁导率为负值. 这进一步说明了 13 GHz 处存在的谐振为磁谐振.

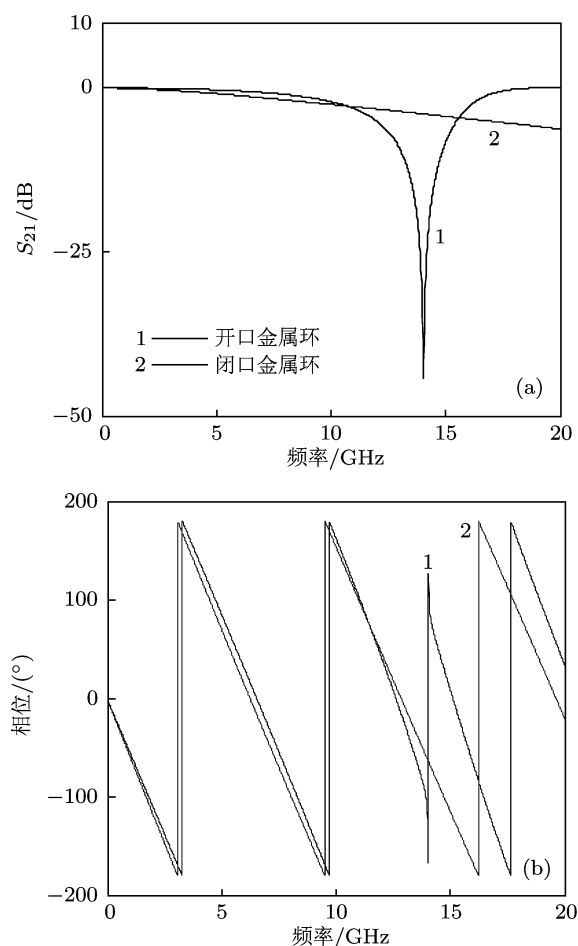


图 5 (a) 水平极化条件下, 谐振环透射系数的幅度; (b) 水平极化条件下, 谐振环透射系数的相位

下面, 我们分析磁谐振产生的原因. 水平极

化时, 金属环表面的电流分布如图 7 所示. 从该图可以看出, 此时的电流呈环形分布, 其产生的磁矩, 与原磁场方向相反 (原磁场沿 $-y$ 方向). 由 $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ 和 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 可知, 当磁响应足够强时, $-\chi_m$ 远大于 1, 磁导率表现为负值, 金属开口环出现磁谐振行为.

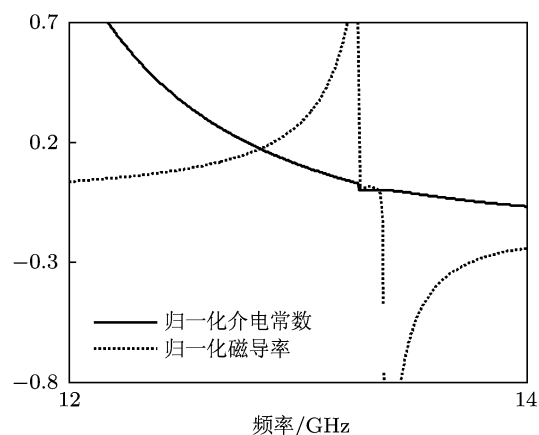


图 6 水平极化条件下, 金属开口谐振环的介电常数和磁导率

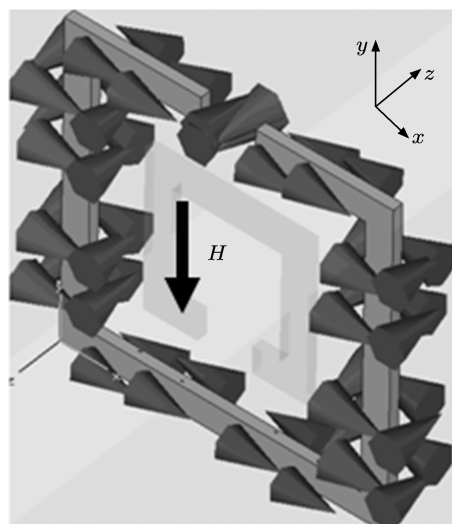


图 7 金属环表面电流分布

值得注意的是, 本文的开口谐振环结构与文献 [14] 中的结构相同. 文献 [14] 中也得出了在 13 GHz 处金属环存在磁谐振的结论, 但需注意, 文献 [14] 中电磁波为平行入射, 即波矢量 $\mathbf{K} = k\hat{x}$, 且电场沿 y 方向. 而本文中的电磁波垂直入射, 波矢量 $\mathbf{K} = -k\hat{z}$, 且电场沿 x 方向. 本文通过模拟证明了垂直入射情况下, 金属环也存在磁谐振效应, 且谐振频率与平行入射时的相同, 但电场极化方向需旋转 90° .

4 结 论

详细分析了垂直入射情况下周期排列的金属开口谐振环的电磁响应行为. 讨论了水平极化和垂直极化两种情况下的谐振现象. 通过计算分析发现: 当电场为垂直极化时, 金属开口谐振环存在电谐振. 证明了在垂直入射条件下, 金属开口谐振环也可实

现负介电常数; 当电场为水平极化时, 金属环只存在磁谐振, 磁导率为负数, 且谐振频率与平行入射时的谐振频率相同.

本文采用封闭金属环和计算结构参数两种方法对所得结论进行了证明, 并对产生电谐振和磁谐振的原因进行了分析. 本文所得结论对于左手材料结构的设计具有一定的指导意义.

-
- [1] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
 - [2] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 5650
 - [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
 - [4] Woodley J F, Wheeler M S 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066605
 - [5] Liu R P, Degiron A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263504
 - [6] Wang D X, Ran L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 254103
 - [7] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
 - [8] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
 - [9] Zhou J F, Koschny T, Zhang L, Tuttle G, Soukoulis C M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 221103
 - [10] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 41101(R)
 - [11] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M 2007 *Science* **315** 47
 - [12] Liu Y H, Song J, Luo C R, Fu Q H, Zhao X P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 934 (in Chinese) [刘亚红, 宋娟, 罗春荣, 付全红, 赵晓鹏 2008 物理学报 **57** 934]
 - [13] Smith D R, Vier D C, Kroll N, Schultz S 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2246
 - [14] Moss C D, Grzegorzczak T M, Zhang Y, Kong J A, 2002 *Prog. Electromagn. Res.* **35** 315
 - [15] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵乾, 赵晓鹏, 康雷, 张富利, 刘亚红, 罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
 - [16] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605

Resonant behavior of split ring resonator in perpendicular propagation*

Chen Juan Zhang An-Xue[†] Tian Chun-Ming

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 20 October 2010; revised manuscript received 2 April 2011)

Abstract

We systematically investigate the transmission characteristics of the split ring resonator (SRR) for propagation perpendicular to the plane of the ring resonator. Both the vertical polarization and the horizontal polarization are considered. A retrieval procedure is used to obtain permittivity ε and permeability μ . It is found that in the normal incidence case the SRR also has strong electric and magnetic responses. The electric response occurs when electric field is parallel to the side of the SRR (vertical polarization) and the frequency band is often higher than that of magnetic resonance. The magnetic response needs a polarization rotation (horizontal polarization) and the magnetic resonant frequency is the same as that of parallel incidence. The conclusions are demonstrated and the reasons for the electric and magnetic resonances are also discussed theoretically.

Keywords: left handed metamaterials, split-ring resonators, electric resonance, magnetic resonance

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 42.25.Bs

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61001039), and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20090201120030).

[†] E-mail: anxuezhang@mail.xjtu.edu.cn