

## 太赫兹波段谐振频率可调的开口谐振环结构\*

戴雨涵 陈小浪 赵强<sup>†</sup> 张继华 陈宏伟 杨传仁

(电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

(2012年8月6日收到; 2012年9月21日收到修改稿)

开口谐振环 (SRRs) 结构可以激励磁谐振, 实现负的磁导率. 提出在 SRRs 两环间隙内引入相对交错的金属短线, 并研究了金属短线对谐振频率的影响. 结果表明: 随着金属短线数目的增多, 谐振频率显著降低, 同时金属短线的结构参数如长度、宽度及间距也会对谐振频率产生影响. 最后验证了金属短线的引入对减小器件尺寸有明显作用, 且不因介质基底的存在而受到影响. 新型磁谐振单元可为今后超材料的设计及实际应用提供新的参考.

关键词: 左手材料, 开口谐振环, 太赫兹, 小型化

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.064101

## 1 引言

左手材料 (left-handed metamaterials, LHMs) 是一种介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负的人工周期结构材料<sup>[1-3]</sup>. 1968 年, 苏联物理学家 Veselago<sup>[4]</sup> 首先研究了左手材料的基本理论问题. 随后, 英国物理学家 Pendry 等<sup>[5,6]</sup> 于 1996 年相继提出: 由周期性排列的金属线和金属谐振环组成的介质, 其等效介电常数和等效磁导率在微波段为负值. 在该理论基础上, Shelby 等<sup>[7]</sup> 用金属线和开口谐振环 (SRRs) 阵列组合成功制备了世界上第一块人造左手材料. 近年来, 随着左手材料独有的物理特性被人们逐步认识, 围绕左手材料的各项研究也迅速展开, 并不断促进着这一新兴领域的飞速发展.

左手材料对电磁波的响应特性始终是人们关注的重点. 由于左手材料的特征峰主要取决于开口谐振环 SRRs 的磁谐振频率, 因此深入研究 SRRs 的磁谐振行为对于左手材料的研制具有重要的科学意义和应用价值. 目前已有的研究成果主要集中在 SRRs 的结构参数, 如线宽、开口大小及内外环间距等方面<sup>[8-10]</sup>. 关于 SRRs 基底或表面覆盖物材料对谐振的影响方面, 也有了一定程度的研究<sup>[11]</sup>. 在掌握了左手材料对电磁波响应规律的基础上, 一

个需要重视并解决的问题 (也是 SRRs 结构在设计过程中应当注意的), 便是如何实现器件小型化. 随着电子通讯技术的不断发展及微细加工工艺的日益成熟, 体积小型化已成为电子元器件的发展趋势和必然要求, 能否有效控制左手材料的体积尺寸, 已成为影响其实际生产使用的关键因素. 通过加载高介电常数基底, 可以降低左手材料的谐振频率, 减小器件尺寸, 但高介电常数基底会导致损耗的增大, 降低器件工作效率. 所以寻找合适的结构是解决器件小型化问题的主要途径之一.

本文提出在 SRRs 两环间隙内引入相对交错的金属短线, 并对因金属短线的加入所引起的电磁波透射性能变化进行研究, 最终得到了工作在太赫兹波段的新颖 SRRs 结构单元. 通过与传统 SRRs 结构比较发现, 新结构能以更小的尺寸在相同频率下发生谐振. 因此, 新型 SRRs 结构在体积小型化方面具有明显优势, 并为今后的实际使用提供了有意义的参考.

## 2 数值模拟及讨论

## 2.1 SRRs 模型

模拟中采用的一系列磁谐振单元是由传统的 SRRs 和两环间相对交错的金属短线构成, 共 5 种

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61201007) 和中央高等院校基本科研业务费 (批准号: ZYGX2011J022) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zqphys@gmail.com

结构, 其短线数目  $N$  分别为 0, 10, 14, 22, 及 26, 具体结构见图 1, 图 2. SRRs 的边长  $L = 30 \mu\text{m}$ , 线宽  $W = 3 \mu\text{m}$ , 开口宽度  $G_p = 4 \mu\text{m}$ , 两环间距  $G = 3.5 \mu\text{m}$ . 金属短线的长  $L_x$ , 宽  $W_x$  及间距  $G_x$  分别为 3, 2 和  $0.5 \mu\text{m}$ .

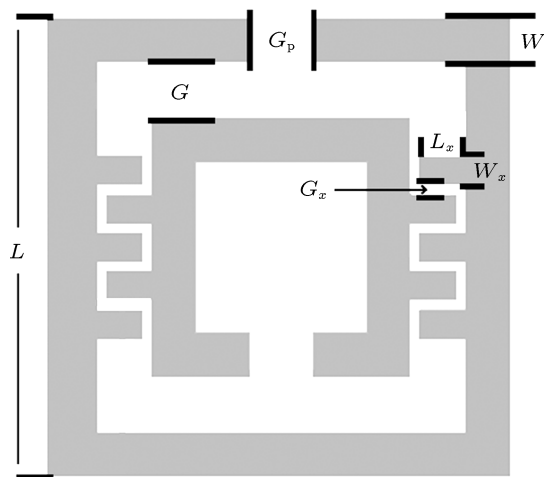


图 1 含有 10 支金属短线的 SRRs

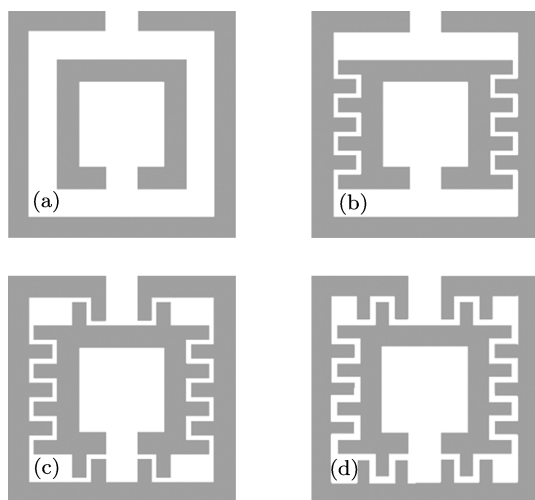


图 2 (a) 无金属短线 SRRs; (b), (c), (d) 短线数目为 14, 22, 26 的 SRRs

本文的数值仿真采用基于有限元积分技术的商业软件 CST Microwave Studio. 仿真时, 边界条件如图 3 所示, 电磁波沿  $x$  方向传播, 电场沿  $y$  方向, 磁场沿  $z$  方向. 为了避免基底对 SRRs 的迟滞效应, 对以上单元的数值仿真均在真空中进行, 无介质基底, 金属为铜, 电导率为  $5.8 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}$ .

## 2.2 金属短线数目对谐振频率的影响

在传统 SRRs 两环间添加相对交错的金属短线, 添加数目分别为 10, 14, 22 及 26. 对以上几种

SRRs 结构的电磁波透射特性进行数值模拟, 并将结果与传统 SRRs 比较, 结果如图 4 所示. 当金属短线数目  $N = 0$ , 即传统 SRRs, 其电磁波透射曲线在 1.22 THz 出现一个谷值, 说明在该频点发生谐振. 而在两环间添加金属短线且数目不断增大时, 谐振频率显著降低. 当添加 26 支短线时, 谐振频率降至 0.72 THz, 降幅达到 40.98%.

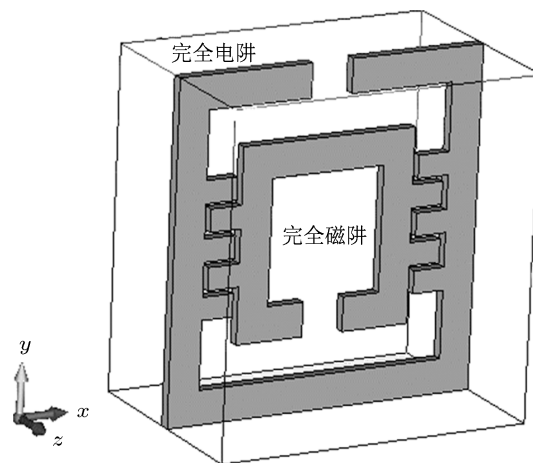


图 3 SRRs 单元边界条件

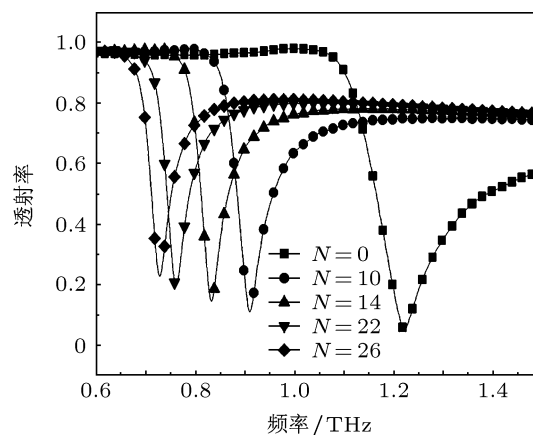


图 4 短线数目  $N$  对谐振响应的影响

图 5 为含 10 支短线 SRRs 在谐振频率下的表面电流分布图. 由图中圈注部分可看出, 当 SRRs 产生磁谐振时, 大小环金属短线处产生强烈的表面感应电流, 且电流方向相反, 说明大量异性电荷在此聚集, 形成电容.

对于 SRRs 结构, 金属线产生电感, 大小环开口及两环间隙产生电容, 当电磁波入射到磁谐振器上时, 入射电磁波的磁场会在其上产生磁感应电流, 从而形成 LC 谐振回路. 因此 SRRs 的两环开口及间隙处结构参数对其谐振响应有着至关重要的作

用. 根据文献 [9], SRRs 的磁谐振频率可近似由以下公式给出:

$$\omega_m = \left\{ \sqrt{2\pi L_{av} \left[ \left( \frac{\pi C_g}{2} \right) + C_{s1} + C_{s2} \right]} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

其中,  $L_{av}$  为金属环平均电感值,  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  分别为外环及内环开口处的电容值,  $C_g$  则为两环间隙处的电容. 当 SRRs 两环间加有金属线并发生磁谐振时, 两环间电容  $C_g$  增大, 根据 (1) 式, 两环间电容值  $C_g$  增大会导致谐振频率降低. 因此, 在 SRRs 两环间加入金属短线会使谐振频率降低.

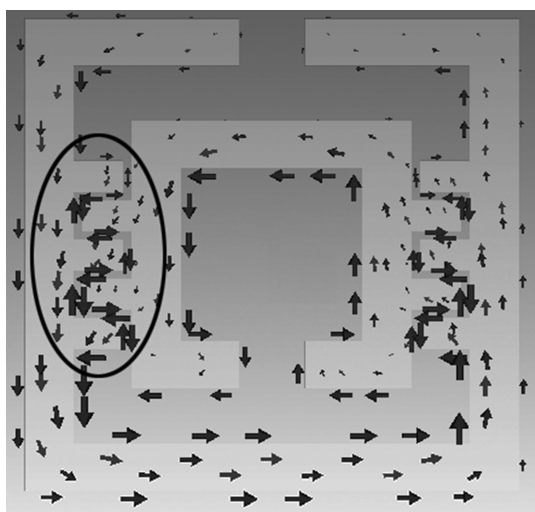


图5 含 10 支短线 SRRs 的表面电流分布

### 2.3 金属短线结构参数对谐振频率的影响

为研究金属短线结构参数对 SRRs 谐振频率的影响, 以短线数目  $N = 10$  的 SRRs 单元为研究模型, 短线长度  $L_x = 3 \mu\text{m}$ , 宽度  $W_x = 2 \mu\text{m}$ , 间距  $G_x = 0.5 \mu\text{m}$ . 分别改变三项中的一项, 保持其他两项不变, 得出短线结构对谐振的影响, 见图 6—8.

保持金属短线的宽度  $W_x$  与间距  $G_x$  不变, 当长度  $L_x$  由  $1.5 \mu\text{m}$  增加到  $3 \mu\text{m}$  时, SRRs 的谐振频率由  $1.15 \text{ THz}$  下降至  $0.91 \text{ THz}$ , 呈现红移, 降幅为  $20.87\%$ .

保持金属短线的长度  $L_x$  与间距  $G_x$  不变, 改变  $W_x$ , SRRs 的谐振频率随  $W_x$  的增加近似呈线性下降. 当  $W_x$  由  $1.0 \mu\text{m}$  增加到  $2.5 \mu\text{m}$  时, 谐振频率由  $0.94 \text{ THz}$  下降至  $0.89 \text{ THz}$ , 呈现红移, 降幅近  $5.32\%$ .

保持金属短线的长度  $L_x$  与宽度  $W_x$  不变, 当间距  $G_x$  由  $0.3 \mu\text{m}$  增加到  $0.9 \mu\text{m}$  时, SRRs 的谐振频率由  $0.85 \text{ THz}$  增大至  $0.94 \text{ THz}$ , 呈现蓝移, 增幅为

$10.59\%$ . 同时, 需要注意的是, 随着  $G_x$  的增大, 即金属短线的排布更为稀疏, 谐振频率的变化程度也在逐渐减弱,  $G_x$  对谐振频率的影响不断减小.

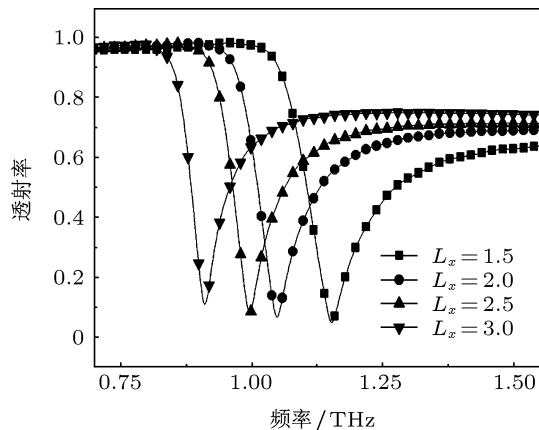


图6 短线长度  $L_x$  对谐振响应的影响

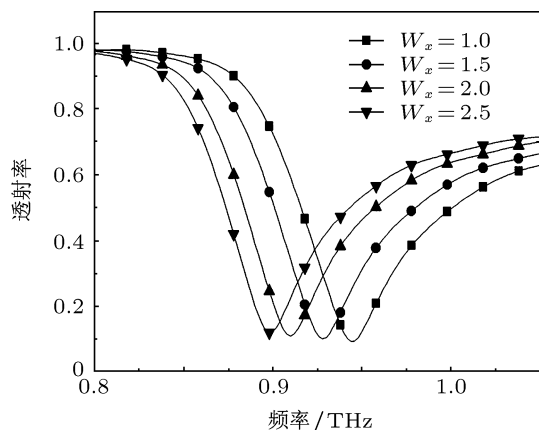


图7 短线宽度  $W_x$  对谐振响应的影响

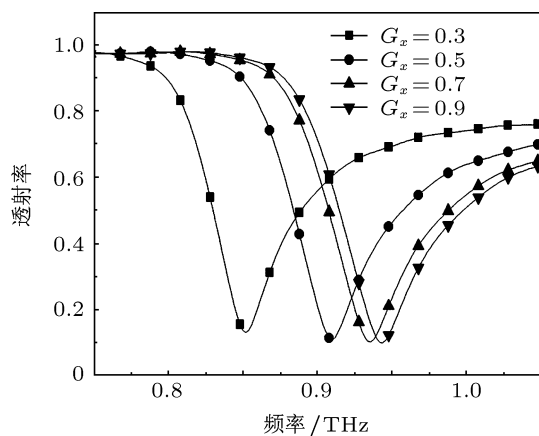


图8 短线间隙距离  $G_x$  对谐振响应的影响

总体上讲, 对于加有金属短线的 SRRs 结构单元, 其谐振频率随着  $L_x$ ,  $W_x$  的增大及  $G_x$  的减小而

不断向低频移动. 这是因为,  $L_x$ ,  $W_x$  的增大及  $G_x$  的减小, 意味着金属短线的排布更加紧密, 两金属环间距也同时减小, 导致两环之间的电容值  $C_g$  增大, 从而使谐振频率降低.

## 2.4 添加金属短线对减小器件尺寸的意义

对于 SRRs 结构, 其单元尺寸是影响谐振频率的首要因素<sup>[12]</sup>. 以图 2(a) 所描述的传统 SRRs 结构为模型, 通过改变边长  $L$ , 其他参数保持不变, 来研究单元尺寸与谐振频率的关系, 具体结果见图 9.

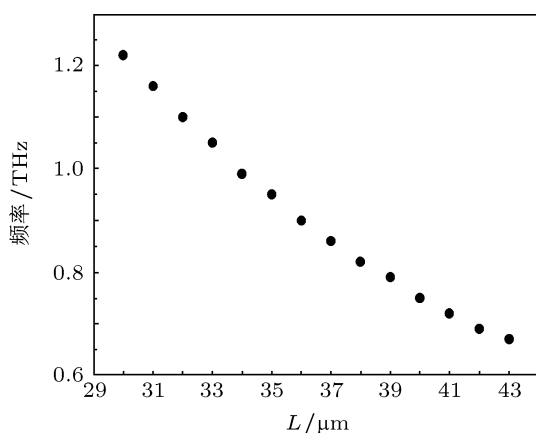


图9 外环边长  $L$  对谐振频率的影响

由图可见, 随着单元尺寸的增大, SRRs 的谐振频率不断降低. 当外环边长由  $30 \mu\text{m}$  增加至  $43 \mu\text{m}$  时, 谐振频率由  $1.22 \text{ THz}$  降至  $0.67 \text{ THz}$ . 与含有 26 支金属短线的新型 SRRs 相比, 要使两种结构单元的谐振频率相同, 即  $0.72 \text{ THz}$ , 加有金属短线的新型 SRRs 的外环边长  $L$  仅需  $30 \mu\text{m}$ , 而传统 SRRs 的外环边长  $L$  则要增大至  $41 \mu\text{m}$ , 边长增大  $36.67\%$ , 单元面积增大  $86.78\%$ . 由此看出, 通过在 SRRs 的两环间加入金属短线, 可有效减小器件尺寸.

## 2.5 介质基底对谐振响应的影响

以上内容均为 SRRs 结构在真空中所得的模拟结果, 忽略了介质基底的存在. 实际上, 介质基底因其介电常数、损耗及厚度的不同, 也会对 SRRs 结构的谐振响应产生一定的影响, 以下研究由介质基底所造成的影响.

以含有 10 支金属短线的 SRRs 结构为研究模型, 金属为铜, 厚度为  $3 \mu\text{m}$ . 基底材料为氧化铝, 介电常数为 9.9, 损耗角正切值为 0.0001. 仿真时边界条件不变, 电磁波沿  $x$  方向入射, 电场沿  $y$  方向, 磁

场沿  $z$  方向. 具体如图 10 所示.

图 11(a)—(d) 分别为当基底厚度是  $50, 100, 200$  和  $300 \mu\text{m}$  时的  $S_{21}$  曲线图. 由图看出, 基底的存在改变了 SRRs 的谐振频率, 由无基底时的  $0.9 \text{ THz}$  左右降至  $0.5 \text{ THz}$  左右. 当基底厚度从  $50 \mu\text{m}$  增加至  $300 \mu\text{m}$  时, 谐振频率由  $0.494 \text{ THz}$  升高至  $0.514 \text{ THz}$ , 但谐振强度却有较大的减弱. 所以说, 基底材料的介电常数将主要影响 SRRs 的谐振频率, 而厚度主要影响其谐振强度.

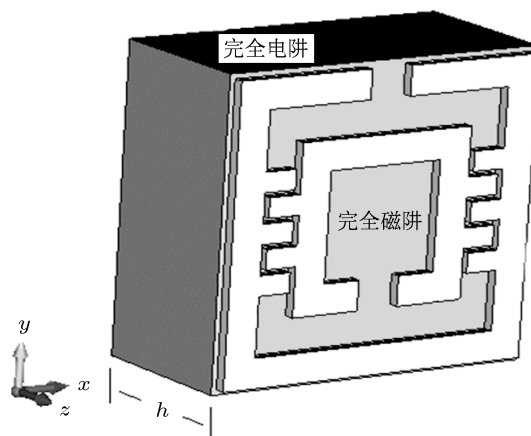


图10 含有介质基底 SRRs 的仿真边界条件

现研究当存在介质基板时, 金属短线对谐振频率的影响. 如图 12 所示, 设基板依旧为氧化铝材料, 厚度  $h = 300 \mu\text{m}$ , 金属结构的参数同图 1 所示模型一致. 当 SRRs 结构无金属短线, 即  $N = 0$ , 谐振频率为  $0.684 \text{ THz}$ ; 当  $N$  增加至 26 时, 谐振频率大幅度下降, 变为  $0.362 \text{ THz}$ , 降幅达  $47.08\%$ . 若以传统方式, 即增大外环尺寸  $L$  的方式来降低谐振频率, 使无金属短线的 SRRs 结构在  $0.362 \text{ THz}$  发生谐振, 如图 13,  $L$  则应增大为  $44 \mu\text{m}$ , 长度增幅  $46.67\%$ , 器件面积增幅  $115.11\%$ . 因此, 介质基板的存在虽然减弱了 SRRs 结构的谐振强度, 但并不影响金属短线对减小器件尺寸方面的作用.

## 3 结论

本文通过传统 SRRs 结构中引入金属短线, 设计了新的磁谐振单元, 并数值仿真了该新型谐振单元在太赫兹波段的谐振行为, 分析研究了金属短线和介质基底的存在对 SRRs 谐振响应的影响. 结果表明, 谐振频率随着金属短线数目的增多而降低, 且当短线数目为 26 时, 磁谐振频率由  $1.22 \text{ THz}$  下降至  $0.72 \text{ THz}$ , 降幅达到  $40.98\%$ . 此外, 谐振频率

也会随着金属短线长度  $L_x$ , 宽度  $W_x$  的增加及间距  $G_x$  的减小而降低. 最后, 通过与传统 SRRs 结构相比较, 证明了有短线的新型 SRRs 结构在器件小型化方面的显著优势. 加入介质基底的仿真结果也表明, 介质基底也不会影响到金属短线对减小器件尺寸方面的作用. 相关的研究工作对于新型负磁导率

材料及新型左手材料的设计具有重要的现实意义, 并为太赫兹波段的器件设计工作提供了有意义的参考.

感谢空军工程大学理学院屈绍波教授和王甲富老师.

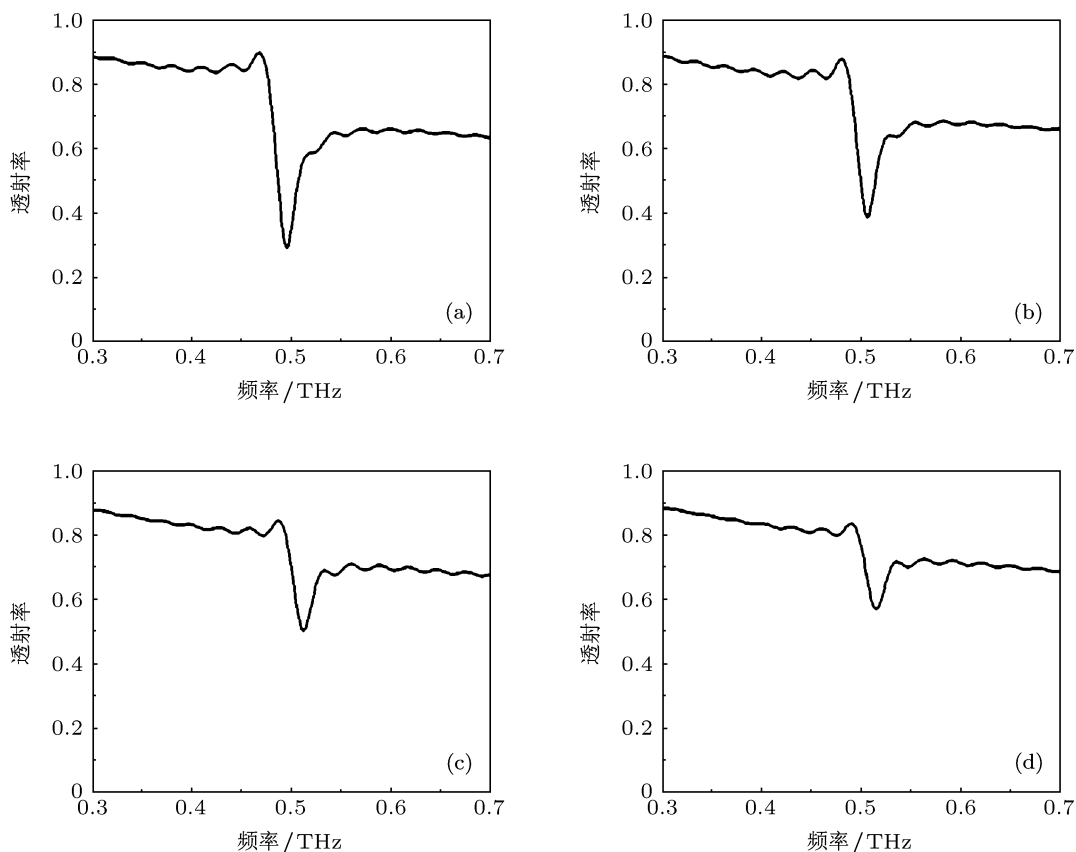


图 11 不同厚度基底对谐振响应的影响

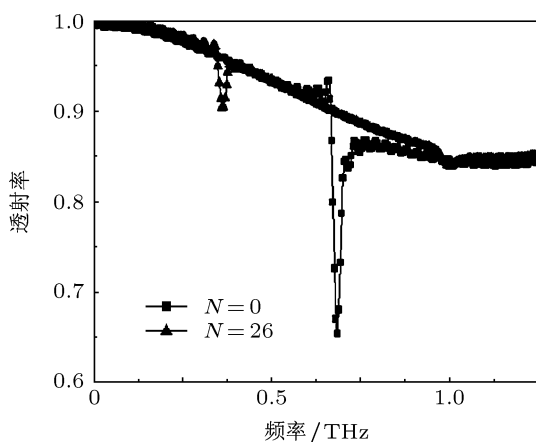


图 12  $h = 300 \mu\text{m}$  时不同数目短线的谐振响应

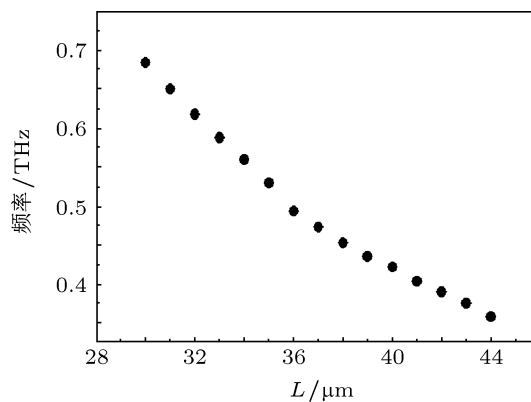


图 13  $h = 300 \mu\text{m}$  时  $L$  对谐振频率的影响

- [1] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [2] Sun Y Z, Ran L X, Peng L, Wang W G, Li T, Zhao X, Chen Q L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 174
- [3] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1025
- [4] Veselago V G 1968 *Soviet Phys. Usp.* **10** 509
- [5] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Yongs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [6] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE. Trans. Microwave Theor. Tech.* **47** 2075
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [8] Yao J Q, Yang P F, Bing P B, Di Z G 2011 *Laser & Infrared* **41** 825 (in Chinese) [姚建铨, 杨鹏飞, 邴丕彬, 邸支刚 2011 激光与红外 **41** 825]
- [9] Radkovskaya A, Shamonin M, Stevens C J, Faulkner G, Edwards D J, Shamonina E, Solymar L 2005 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **46** 473
- [10] Aydin K, Bulu I, Guven K, Kafesaki M, Soukoulis C M, Ozbay E 2005 *New J. Phys.* **7** 168
- [11] Labidi M, Tahar J B, Choubani F 2011 *Opt. Express* **19** 733
- [12] Wu J F, Sun M Z, Zhang C M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3844 (in Chinese) [吴俊芳, 孙明昭, 张淳民 2009 物理学报 **58** 3844]

# Tunable split ring resonators in terahertz band\*

Dai Yu-Han   Chen Xiao-Lang   Zhao Qiang<sup>†</sup>   Zhang Ji-Hua  
Chen Hong-Wei   Yang Chuan-Ren

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 6 August 2012; revised manuscript received 21 September 2012)

## Abstract

Split ring resonators (SRRs) can be used as a negative permeability medium near its magnetic resonance frequency. In this paper, a new type of THz-band magnetic resonance structure is proposed by introducing metal wires into traditional SRRs, and the effect of metal wires on the transmission characteristics of SRRs is numerically investigated. The results show that the resonant frequency of SRRs significantly decreases with the number of metal wires increasing. The parameters of metal wires, such as length  $L_x$ , width  $W_x$  and distance  $G_x$  also have influence on the resonant frequency of SRRs. Meanwhile, the results verify that the introduction of metal wires play an important role in reducing the size of the device, and cannot be affected by the presence of dielectric substrate. The new magnetic resonance structure proposed in this paper provides a reference for the design and practical applications of metamaterials in the future.

**Keywords:** left-handed metamaterials, split ring resonators, THz, miniaturization

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.62.064101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201007) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. ZYGX2011J022).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zqphys@gmail.com