

开口谐振环阵列在太赫兹波段的谐振特性实验研究

丁元 朱俊伟 郭宇晗 袁哲 徐诗尧 杨燚 张豹山 唐东明

南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093

摘要 实验制备了单元尺寸在微米量级的开口谐振环周期阵列样品, 测试了其在 0.1~2 THz 频段的散射系数, 验证了不同极化方向的垂直入射可产生单独的电谐振或同时产生磁谐振的传输特性, 验证了材料电导率对样品的谐振频率的影响。结合仿真计算结果, 得到了等效的负介电常数和负磁导率随频率的变化关系, 及其电、磁谐振频率与谐振环单元尺寸增大倍数 k 的关系曲线。实验和仿真均表明, 样品的电谐振频率与 $1/k$ 线性相关, 而磁谐振频率与 $1/k$ 成正比关系。

关键词 材料; 左手材料; 开口谐振环; 太赫兹; 电谐振; 磁谐振

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0216002

Experimental Study of Resonance Characteristics of Split Ring Resonators in Terahertz Band

Ding Yuan Zhu Junwei Guo Yuhan Yuan Zhe Xu Shiyao

Yang Yi Zhang Baoshan Tang Dongming

School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract The scattering parameters of the micrometer sized split ring resonators (SRR) samples are measured in the frequency range of 0.1 to 2 THz. The incident wave with different polarization directions produces a single electric resonance or both electric and magnetic resonances simultaneously in the normal incidence case. The effect of the material conductivity on the resonant frequency of SRRs is discussed. Based on the simulation results, the relationship between the effective permeability and permittivity and the frequencies are shown, and the curve of resonance frequencies with respect to the different size enlargement factors (k) of the SRR unit is plotted. Both the experimental and the simulation results indicate that the electric and magnetic resonance frequencies linearly depend on $1/k$.

Key words materials; metamaterial; split ring resonators; terahertz wave; electric resonance; magnetic resonance

OCIS codes 160.3918; 300.6495; 350.3618; 260.2110; 260.5740

1 引言

左手材料(LHMs)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,由于其一系列的反常电磁行为^[1],如负折射效应、逆多普勒效应,反常 Cerenkov 辐射以及完美透镜效应等,引起国内外学者的高度关注。英国科学家 Pendry 等^[2]于 1996 年发现周期性排列的导电金属线,其等效介电常数在微波段为负值。1999 年, Pendry 等^[3]又发现周期性排列的金属谐振环在微波段的等效磁导率也为负值。根据这些理论, Shelby 等^[4]在 2001 年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。

太赫兹波段的左手材料具有广泛的应用前景^[5-6],例如可用于生物指纹识别,微型分光仪,磁谐振成像设

收稿日期: 2014-08-26; 收到修改稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(11104134, 11004095, 61271077)

作者简介: 丁元(1993—),男,硕士研究生,主要从事高频材料和器件应用方面的研究。E-mail: dhhsues@163.com

导师简介: 唐东明(1979—),男,博士,副教授,主要从事高频材料和器件应用方面的研究。E-mail: dmtang@nju.edu.cn
(通信联系人)

备等。然而能在高频波段产生磁谐振的材料尤其稀少,SRRs的提出使得人工实现太赫兹波段的负磁导率材料成为可能。2004年,Yen等^[7]将SRRs的单元尺寸缩小到太赫兹频率波长的1/7,表明非磁性的SRRs在太赫兹波段能实现磁谐振,从而使得左手材料的研究从微波波段过渡到太赫兹波段。

目前,国内对于左手材料在太赫兹波段的研究主要以仿真为主^[8-10],实验开展较少的原因之一在于难以将微米量级的金属单元结构制成较大面积的周期阵列图案。本文实验利用准分子激光微加工技术制备了多种SRRs阵列样品,测试获得了其在0.1~2 THz频段的散射系数,针对不同材料(铜、铁钴硼)、不同单元尺寸的样品进行不同极化角度的垂直入射,并与仿真结果进行比较,分析了各因素对SRRs透射系数以及谐振频率的影响规律。

2 实验和结果

在0.5 mm厚的Si片($\epsilon=11.9$)上沉积200 nm的铜膜,微加工为金属SRRs周期结构图案,单元结构如图1(a)所示。制备出的单元尺寸最小样品编号为A1,照片见图1(b),各尺寸为: $a=44 \mu\text{m}$, $l=30 \mu\text{m}$, $w=g=4 \mu\text{m}$, $d=3 \mu\text{m}$ 。实验加工的其他各样品参数如表1所列,每个样品总尺寸均为6 mm×6 mm。

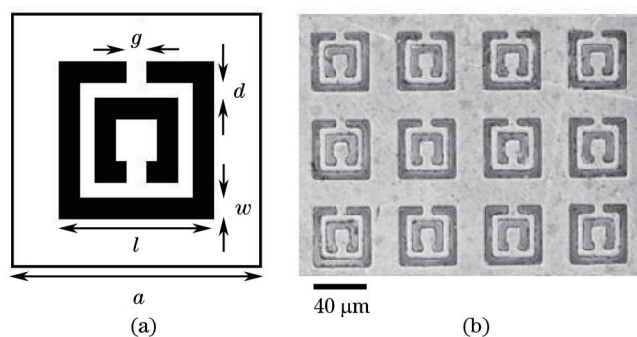


图1 (a)金属SRRs的单元结构示意图;(b)谐振环阵列的显微镜照片

Fig.1 (a) Schematic of a SRRs; (b) scanning electron micrograph of the SRRs array

实验采用准分子微加工的激光器为Coherent公司的Compex Pro 205F准分子激光器,激光经过匀化和聚焦,将掩模板上20 mm×20 mm面积的图案在样品上刻蚀出2 mm×2 mm的图案,将图案在平面内平移刻蚀可形成更大面积的图案。

对各个SRRs样品进行垂直入射的太赫兹电磁波的S参数测试,采用设备为Advantest公司的TAS7500TS太赫兹波光谱和成像分析平台,频段为0.1~2 THz,可对样品的时域光谱自动提取的幅度和相位进行快速傅里叶变换,获得SRRs样品频域的透射系数。样品可在其所在平面内旋转,改变开口边与电磁波极化电场方向的夹角。

表1 实验样品编号和参数

Table 1 SRRs sample parameters adopted in the experiment

No.	Material /Thickness	Substrate /Thickness	$a / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$	$w / \mu\text{m}$	$g / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$
A1	Cu/200 nm	Si/0.5mm	44	30	4	4	3
A2	Cu/200 nm	Si/0.5mm	88	60	8	8	6
A3	Cu/200 nm	Si/0.5mm	132	90	12	12	9
B1	FeCoB/200 nm	Si/0.5mm	44	30	4	4	3

2.1 垂直入射下的SRRs的电磁响应

因为SRRs具有非对称结构,对于入射电磁波的响应除了电耦合和磁耦合之外,还存在磁电耦合,构成了双各向异性材料^[11-12],所以实验需考虑SRRs相对于电磁波电场极化方向的摆放方式。本文主要研究电磁波的波矢垂直于SRRs平面的入射情况,包括两种典型方式,即如图2(a)中所示的电场方向垂直于有开口的边以及如图2(b)中所示的电场方向平行于开口边。

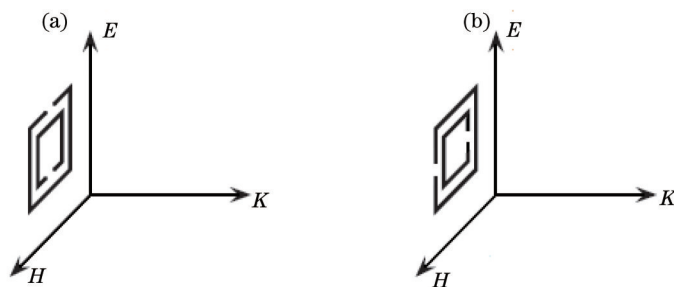


图2 电磁波垂直入射SRRs的两种方式。(a)电场方向垂直于开口的边;(b)电场方向平行于开口的边

Fig.2 Schematic of SRRs placed in two different ways under normal incidence with electromagnetic wave's polarization perpendicular (a) or parallel to the opensides

电磁波从上述两种不同入射情况对样品 A1 进行测试,分别得到如图 3 所示的透射曲线。电场平行于开口边的透射曲线(如图 3 实线所示)中存在两个传输禁带,分别位于 0.65 THz 和 1.90 THz。根据 Chen 等提出的改进的 S 参数反演法^[13],对透射曲线进行等效磁导率和介电常数的反演,可知第一个传输禁带是由磁谐振引起的,可以得到负的磁导率,而第二个传输禁带是电谐振引起的,可以得到负的介电常数^[14-15]。而当电场方向垂直于开口边时,如图 3 虚线所示,仅有一个电谐振导致的禁带,位于 1.77 THz,不存在磁谐振。

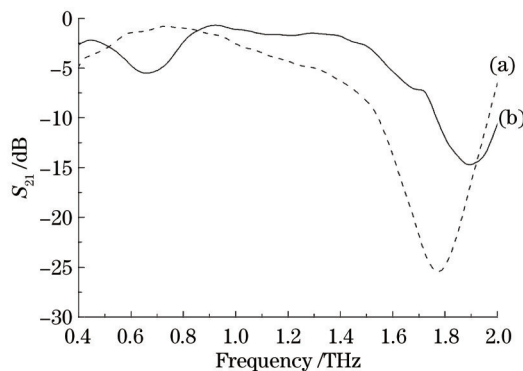


图3 样品 A1 的透射曲线。虚线对应图 2(a)情形,实线为图 2(b)情形

Fig.3 Transmission curves of sample A1, corresponding to the cases in Fig.2(a) (dashed line) and Fig.2(b) (solid line), respectively

2.2 单元尺寸和材料对 SRRs 电磁特征响应的影响

为了研究 SRRs 在更多频段的电磁谐振情况,将样品 A1 的单元尺寸分别放大 2 和 3 倍,加工了铜 SRRs 样品 A2、A3,参数如表 1 所示。对 A2、A3 两样品进行上述电场方向平行于开口边的测试实验,结果如图 4 所示。样品单元尺寸放大 2 和 3 倍,磁谐振的传输禁带分别出现在 0.27 THz 和 0.12 THz,而电谐振的传输禁带则分别出现在 0.90 THz 和 0.60 THz。可见通过改变 SRRs 样品中的单元尺寸能在不同频段产生等效的负介电常数和负磁导率。

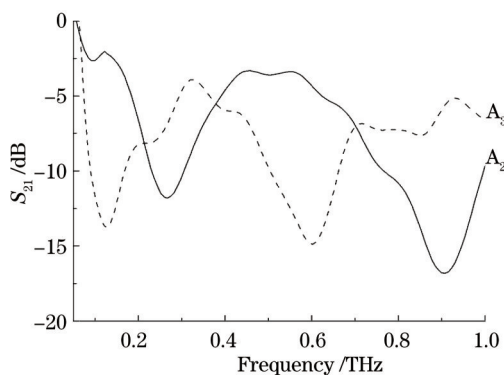


图4 两种单元尺寸样品的透射曲线

Fig.4 Transmission curves of two different SRRs samples

理论上已知材料电导率也是影响SRRs的透射系数和谐振频率的重要因素^[3],作为对比,本实验另采用铁钴硼薄膜加工了SRRs样品B1,尺寸参数与A1一致。当入射太赫兹波的电场方向平行于开口边,透射曲线如图5所示。样品磁、电谐振导致的传输禁带在0.53 THz和1.67 THz,分别低于同样尺寸铜样品A1的磁、电谐振0.65 THz和1.90 THz(如图3所示),磁谐振频率相差约0.12 THz,电谐振频率相差0.23 THz;样品的电导率相差达到两个数量级,其中A1的铜膜电导率为 5.8×10^7 S/m,样品B1采用的FeCoB薄膜的电导率为 5.2×10^5 S/m。由此可见,同样单元尺寸的SRRs,电导率较小的材料具有的电磁谐振的频率也较小,但是材料电导率的改变在THz频段所引起的谐振频率变化并不大。

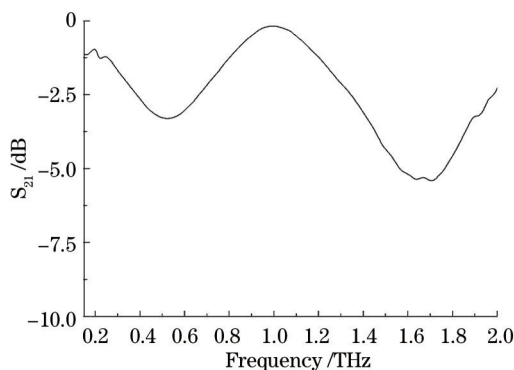


图5 以FeCoB为材料的SRRs样品B1的透射曲线
Fig.5 Transmission curve of sample B1 (FeCoB SRRs)

3 数值仿真与分析讨论

利用基于时域有限积分法(FITD)的软件CST Microwave Studio对铜SRRs进行仿真,各项参数如表1所列,计算得到透射曲线如图6所示。仿真得出电场方向平行于开口边时的磁谐振频率为0.805 THz,电谐振频率为1.85 THz;电场方向垂直于开口边,电谐振频率为1.89 THz。比较图3与图6,可见实验与仿真的透射曲线具有一致性。

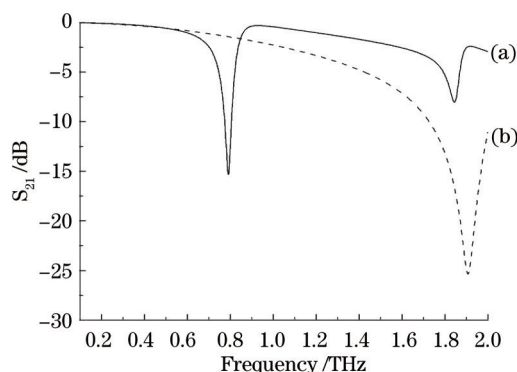


图6 仿真计算的样品A1的透射曲线。虚线对应图2(a)情形,实线对应图2(b)情形

Fig.6 Simulation results of transmission curves of sample A1 corresponding to the cased in Fig.2(a) (dashed line) and Fig.2(b) (solid line) respectively

为了更有效地说明谐振特性,根据透射曲线反演^[13-15]得出归一化等效磁导率和介电常数,如图7所示。从图7可以看出,在0.8 THz附近,磁导率表现为负值,而在1.85~1.90 THz处,介电常数表现为负值。这个结果证实了透射曲线所显示出的两个传输禁带的谐振特性是不同的,即分别是磁谐振和电谐振。

为定量地讨论单元尺寸等比例变化对SRRs在太赫兹波段的电、磁谐振的影响,定义样品A1采用的单元尺寸,为1倍尺寸,利用CST Microwave Studio分别仿真计算单元尺寸放大 k 倍时的电、磁谐振频率。图8为以 k 的倒数为横坐标的谐振频率变化曲线,可见样品A1、A2和A3的实验结果与仿真结果相互符合。图8表明,电谐振频率大致与 $1/k$ 成线性关系,变化率为1.68。磁谐振频率则正比于 $1/k$,变化曲线延长线大致通过原

点,变化率为0.725,这可根据 Baena 等所提出的 SRRs 等效电路理论^[16]解释:磁谐振的原因是由于 SRRs 存在等效电容 C 与等效电感 L ,磁谐振频率 $\omega_{mp}^2 \propto 1/LC$,其中 L 正比于 SRRs 的单元几何面积,所以理论上在达到饱和尺寸^[17-18]之前磁谐振频率应与 $1/k$ 成正比。

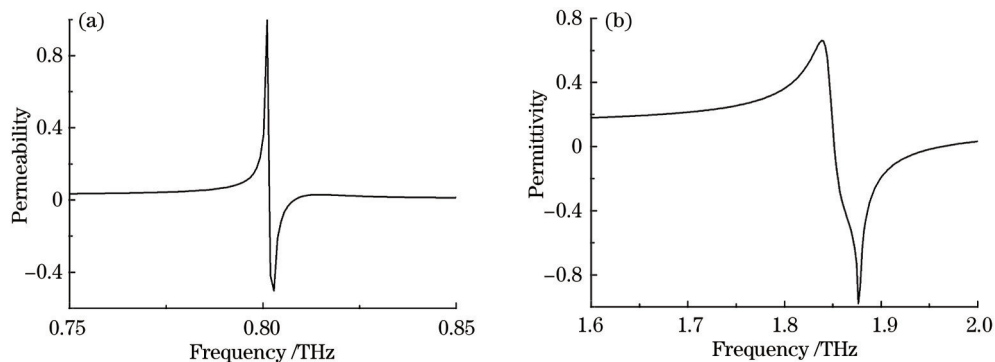


图 7 相应频段的归一化(a)等效磁导率以及(b)等效介电常数

Fig.7 Normalized effective (a) permeability and (b) permittivity in the corresponding band

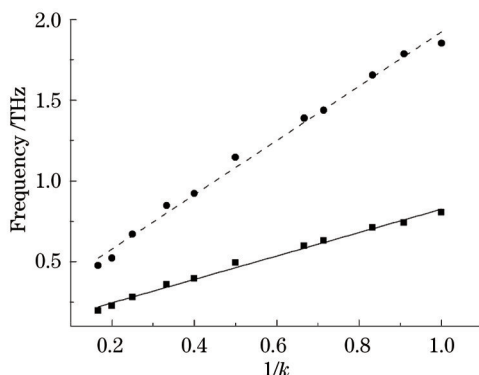


图 8 仿真计算 SRRs 谐振频率随 $1/k$ 的变化曲线,实线对应磁谐振频率,虚线对应电谐振频率

Fig.8 Curves of resonance frequencies of SRRs with respect to $1/k$ (using simulation result). The dashed line and solid line are corresponding to the electric and magnetic resonance frequencies, respectively

通过上述的仿真与实验结果分析可知,改变单元尺寸能有效改变 SRRs 的谐振频率,有可能通过将不同单元尺寸的两组单元设计组合在同一样品中,使得整个样品的电谐振区域和磁谐振区域重合,在不加入导电金属线的情况下实现一种自身产生负折射率的平面型材料,这方面的设计仿真需要更多细致深入的工作,也将是进一步工作的重要内容之一。

4 结 论

通过实验测量微米量级单元尺寸的 SRRs 样品在太赫兹频段的散射系数,研究了样品的电谐振和磁谐振规律,验证了不同极化方向垂直入射产生的单独的电谐振或同时产生磁、电谐振的特性,验证了材料电导率可以在一定程度上影响 SRRs 的谐振频率。结合仿真计算结果,得到了 SRRs 的电、磁谐振频率与单元尺寸的放大倍数 k 的关系:谐振频率与 $1/k$ 成线性关系。上述工作对各太赫兹波频段的 SRRs 的设计和应用有一定的指导意义,并有望用于设计一种无金属棒结构的负折射率 SRRs 材料。

参 考 文 献

- 1 V G Veselago. The electrodynamics of substance with simultaneously negative value of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Usp, 1968, 10(4): 509-514.
- 2 J B Pendry, A J Holden, W J Stewart, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(25): 4773-4776.
- 3 J B Pendry, A J Holden, D J Robbins, *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Transactions

- on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075–2084.
- 4 R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77–79.
- 5 B Ferguson, X C Zhang. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26–33.
- 6 D M Wu, N Fang, C Sun, *et al.*. Terahertz plasmonic high pass filter [J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(1): 201–203.
- 7 T J Yen, W J Padilla, N Fang, *et al.*. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. Science, 2004, 303(5663): 1494–1496.
- 8 Liang Lanju, Yan Xin, Yao Jianquan, *et al.*. Two-dimensional left-handed material based on parallel metallic double rods in terahertz wave [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0316001.
梁兰菊, 闫 昕, 姚建铨, 等. 基于平行金属双柱的太赫兹波二维左手材料[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0316001.
- 9 Wang Wentao, Liu Jianjun, Hong Zhi. Terahertz multiband terahertz filter based on three nested closed rings [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323001.
王文涛, 刘建军, 洪 治. 基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323001.
- 10 Han Hao, Wu Dongwei, Liu Jianjun, *et al.*. A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0423003.
韩 昊, 武东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0423003.
- 11 R Marques, F Medina, R R E Idrissi. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials [J]. Phys Rev B, 2002, 65(14): 144440.
- 12 D R Smith, J Gollub, J J Mock, *et al.*. Calculation and measurement of bianisotropy in a split ring resonator [J]. J Appl Phys, 2006, 100(2): 024507.
- 13 X Chen, T M Grzegorzcyk, B Wu, *et al.*. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials [J]. Phys Rev E, 2004, 70(1): 016608.
- 14 B G Quan, X L Xu, H F Yang, *et al.*. Time-resolved broadband analysis of split ring resonators in terahertz region [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(4): 041101.
- 15 X L Xu, B G Quan, C Z Gu, *et al.*. Bianisotropic response of microfabricated metamaterials in the terahertz region [J]. J Opt Soc Am B, 2006, 23(6): 1174–1180.
- 16 J D Baena, J Bonache, F Martin, *et al.*. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4): 1451–1461.
- 17 J Zhou, T Koschny, M Kafesaki, *et al.*. Saturation of the magnetic response of split-ring resonators at optical frequencies [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95(22): 223902.
- 18 M W Klein, C Enkrich, M Wegener, *et al.*. Single-slit split-ring resonators at optical frequencies: Limits of size scaling [J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1259–1261

栏目编辑: 张浩佳