

基于人工复合材料的太赫兹波双波段滤波^{*}

赵冬梅¹⁾ 施宇蕾^{1)†} 周庆莉¹⁾ 李磊¹⁾ 孙会娟²⁾³⁾ 张存林¹⁾

1) (太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室;北京市太赫兹波谱与成像重点实验室;
中关村开放实验室,首都师范大学物理系,北京 100048)

2) (北京联合大学基础部,北京 100101)

3) (北京理工大学光电学院,北京 100081)

(2010年10月25日收到;2010年12月13日收到修改稿)

本文分别从实验和理论模拟两方面详细的讨论了金属双环和反双环两种亚波长阵列结构在太赫兹波段的双频率响应特性. 这两种双环结构都可以实现双频率调制,金属双环结构表现为两个明显的吸收峰,反双环结构则表现出明显的透过峰. 这两种结构不仅在物理结构上互补,在太赫兹波段的响应也表现为吸收和透过互补的特性. 其中高频响应来源于内环电子振荡,低频影响则来源于外环电子振荡,并且这种结构在太赫兹波段的响应与周期无关.

关键词: 太赫兹, 滤波器, 亚波长阵列, FDTD

PACS: 33. 20. Ea, 42. 60. Da, 42. 50. St, 61. 50. Ah

1. 引言

近年来,随着亚皮秒脉冲产生与探测技术的发展,太赫兹 (THz) 辐射技术受到了越来越广泛的关注. THz 波是一种宽带电磁波,具有非常独特的性质,它可以透过多种电介质材料以及气相物质,这些介质在 THz 波段具有丰富的吸收和色散性质. 通过测量并分析样品的 THz 信号可以获得材料的物质成分和物理、化学以及生物学信息^[1-6]. 太赫兹波段的人工复合材料更是引起了极大的关注,典型的太赫兹器件包括偏振片^[7]、滤波片^[8]和偏振补偿片^[9]等. 这些大都是通过微加工技术,在半导体基底上生长的具有一定几何结构的亚波长金属阵列,由于金属结构的形状和尺寸不同可以实现在太赫兹波段的各种滤波要求. 金属结构中的自由电子与 THz 波相互作用,是产生特殊电磁响应的根本原因^[10,11]. 因此,改变这些结构的几何形状或者尺寸就可以根据要求制作出不同功能的电磁响应器件. 以往的研究工作多数采用的是单一频率的太赫兹

波滤波器件,本文在此基础上提出了一种双频率调制的太赫兹滤波方法.

2. 样品制备

人工复合材料通常是将金属材料植入到体材料体内或表面,采用加工合成等工艺制成具有新颖特征的复合材料. 由于这种合成材料微结构上的差异使其在电磁场响应过程中表现出良好的电磁特性和响应功能,并在电磁器件的设计和制造中得到了良好的应用. Pendry 在 1999 提出的共振劈裂环^[12,13] (split ring resonator, SRR) 结构就是这种复合材料的典型代表,SRR 可以同时实现负的电响应和磁响应,引起了人们对这一结构的极大关注.

本文中所用到的金属双环和反双环样品的制备是通过紫外光曝光技术和薄膜沉积技术相结合而实现的. 使用 S1813, LOR 双层光刻胶,经过紫外曝光显影步骤,在厚度 $p = 1.5 \text{ mm}$ 的石英玻璃上形成具有双环结构的光刻胶图形,然后再利用热蒸发金属沉积系统在其表面沉积一层厚度 $t = 2 \text{ }\mu\text{m}$ 的金

^{*} 国家重点基础研究计划 973 (批准号:2007CB310408,2006CB302901),国家自然科学基金 (批准号:10804077,11011120242,10904098),北京市教委项目 (批准号:KM200910028006),北京市科技新星,北京市属市管高校人才强教计划项目,国家信息功能材料重点实验室和中国科学院上海微系统与信息技术研究所资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yulei_shi@hotmail.com

属薄膜(金),然后通过溶脱工艺获得结构样品. 样品及其参数规格如图 1 所示, T 为样品周期, W 为金属环宽度, G 为内外环间距, R 为内环半径. 图 1

(a) 为金属双环结构,其中黑色部分是基底,黄色是金属. 图 1(b) 为反双环结构,其中黄色部分是金属,黑色部分是基底.

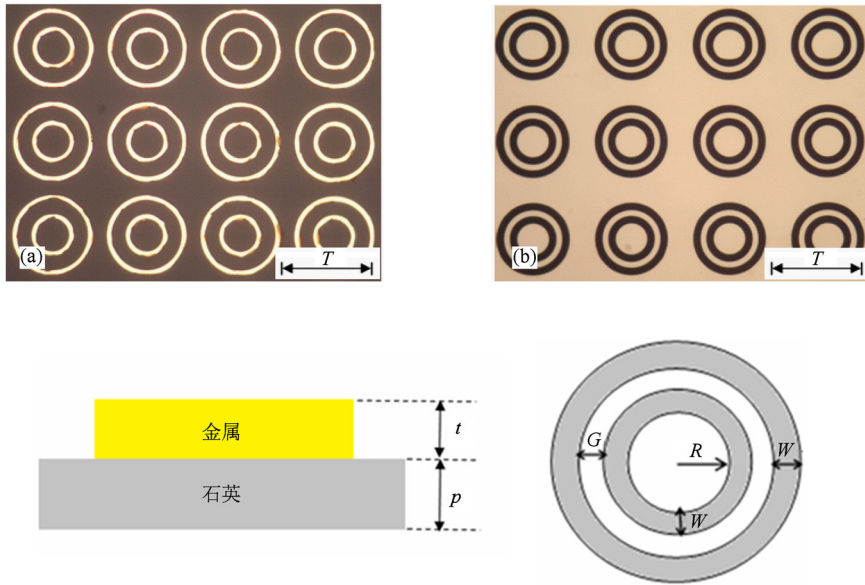


图 1 双环和反双环结构图(基底均为石英玻片,金属层厚度 $t = 2 \mu\text{m}$,基底厚度 $p = 1.5 \text{ mm}$) (a) 为金属双环结构;(b) 为反双环结构

3. 实验装置

本文所用的实验装置是典型的太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)^[14,15]. 主要由飞秒激光器、THz 辐射产生装置及其探测装置,以及时间延迟控制系统组成. 激光器发出频率为 82 MTHz,中心波长为 800 nm 的飞秒激光脉冲,周期为 100 fs. 经过分束镜后被分为产生脉冲和探测脉冲. 前者经过时间延

迟系统后入射到 ZnTe 晶体产生 THz 波. 通过控制时间延迟系统来调节产生脉冲和探测脉冲之间的时间延迟,最终可以探测出 THz 脉冲的整个时域波形. 如图 2 为典型的 THz-TDS 透射系统,其中产生路产生的 THz 波经过抛物面镜进行准直和聚焦,实验中样品将置于焦点处. THz 波穿透样品后即携带了样品信息,通过进一步数据处理即可得到样品在 THz 波段透过谱. 在本实验中,始终保证 THz 波垂直于样品表面入射.

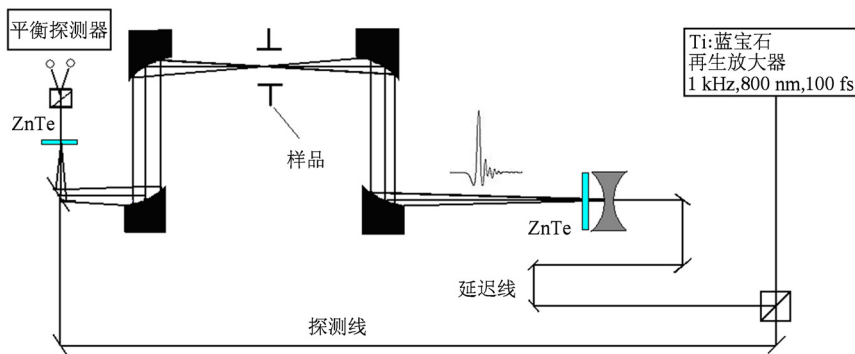


图 2 太赫兹时域光谱系统

4. 实验结果

金属双环和反双环结构在形状上互补,其在太赫兹波段的电磁响应也应该具有互补特性,为了验证这

一结论,作如下实验,将尺寸参数为 $T_1 = T_2 = 60 \mu\text{m}$, $W_1 = W_2 = 4 \mu\text{m}$, $G_1 = G_2 = 4 \mu\text{m}$ 的金属双环和反双环结构进行太赫兹透过谱测量. 图 3 即为金属双环样品 Sam_1 与反双环样品 Sam_2 在太赫兹波段的透过谱,图 3(a) 为实验结果, (b) 为 FDTD 模拟结果.

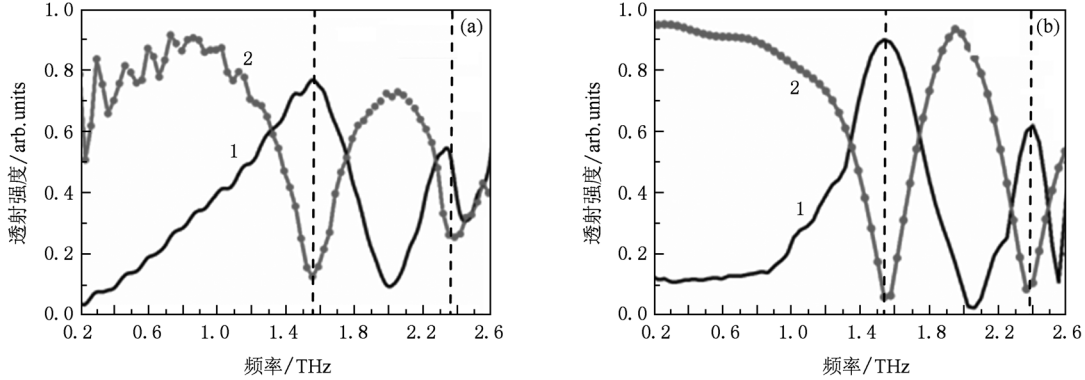


图 3 金属双环 Sam_1 与反双环 Sam_2 透过谱 (a) 图为实验结果; (b) 为模拟结果

从图 3(a) 中可以看出,金属双环结构 (Sam_1) 在 0.2 THz 到 2.6 THz 范围内有两个明显的吸收峰,值分别是 1.55 THz 和 2.31 THz,反双环结构 (Sam_2) 也在同样的频率下表现出两个明显的透过峰,金属双环结构与反双环结构都表现出了双频率调制. 图 3(b) 是基于 FDTD 的理论模拟结果,与实验结果一致,印证了这两种互补结构在太赫兹透过谱上的互补特性. FDTD 模拟就是一种以 Maxwell 方程为基本依据的数值模拟方法. 计算中,在 x 方向和 y 方向采用周期边界条件,在 z 方向采用 PML 吸收边界条件. 计算中所用的网格为 x, y, z 方向边长均为 $0.5 \mu\text{m}$ 的立方体. FDTD 模拟可以广泛应用于各个波段的电磁响应描述,可以准确的给出太赫兹波与金属结构中的自由电子相互作用的直观

结果.

金属双环结构的透过谱特征为表现为两个明显的吸收峰,证明金属双环结构中的自由电子在这两个频率下对太赫兹吸收较强,因而导致透过率减小;而反双环则具有两个明显的透过峰,证明此时金属结构中的自由电子在这两个频率下对太赫兹的吸收最弱. 两种结构由于物理结构的互补,在太赫兹波的电磁响应也互补.

为了进一步研究这种结构双频率响应的影响因素,本文对不同周期下的样品进行透过谱比对,研究结构周期 T 对吸收频率的影响. 实验与模拟中选取的样品是金属双环结构,选取参数为 $R = 10 \mu\text{m}$, $W = 3 \mu\text{m}$, $G = 9 \mu\text{m}$, 周期 T 的取值为 $60 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$, 结果如图 4 所示.

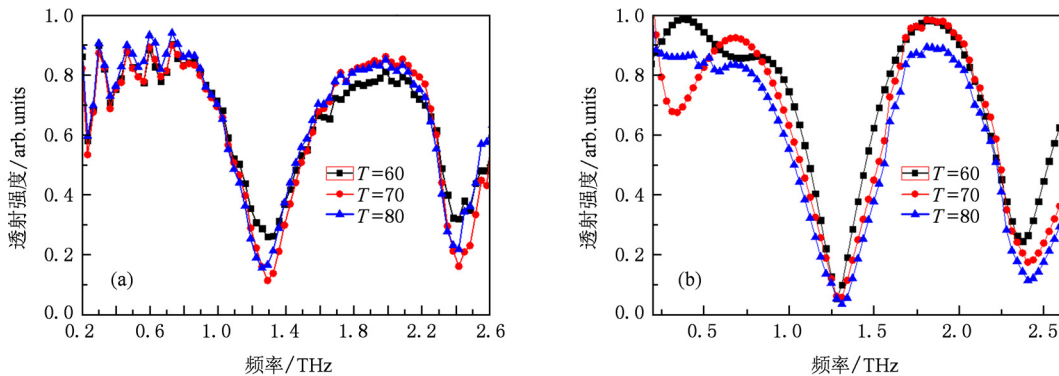


图 4 不同周期下的样品透过谱 (a) 图为实验结果; (b) 为模拟结果

从图 4(a) 可以看出随着样品周期 T 的变化吸收峰的位置几乎没有发生移动,并且与 FDTD 模拟

结果(图 4(b)) 符合. 因此我们可以得到结论,周期对于双环结构在太赫兹波段响应频率没有影响,今

后在实际应用中,可以适当的放宽对周期因子的要求,使制作工艺简化.

既然结构周期 T 对吸收峰位置没有明显影响,为了进一步判断造成这种现象的原因. 本文对仅改变内环和外环尺寸时的太赫兹透过谱进行了分析. 图 5 为只改变内环尺寸时的金属双环和反双环样品太赫兹透过谱. 实验中所用到的双环和反双环样品参数均为 $T = 70 \mu\text{m}$, $R = 10 \mu\text{m}$, $W = 3 \mu\text{m}$, G 的取值为 $3 \mu\text{m}$, $6 \mu\text{m}$, 保证内环半径 R 不变时,改变内外环间距 G 的大小实际上是只改变了外环的尺寸. 图 5(a), (b) 为金属双环结构实验和模拟结果; (c), (d) 为反双环结构实验和模拟结果.

和模拟结果. 从图 5. (a), (c) 中可以看出,对于金属双环结构而言,随着内外环间距 G 的增大,外环尺寸增大,第一个特征峰对应的频率逐渐出现红移,而第二个特征峰的位置并没有移动. 为了验证实验结果,用 FDTD 方法对内外环间距 $G = 3 \mu\text{m}$, $6 \mu\text{m}$, $9 \mu\text{m}$ 分别进行理论模拟如图 5(b), (d), 随着 G 的增大第一个峰也同样表现出了红移特性,实验结果与 FDTD 理论模拟结果相符合. 因此得出结论:无论是金属双环结构的吸收峰还是反双环结构的透过峰,外环尺寸的改变仅影响第一个峰的位置,也就是只影响低频响应,对高频响应没有影响.

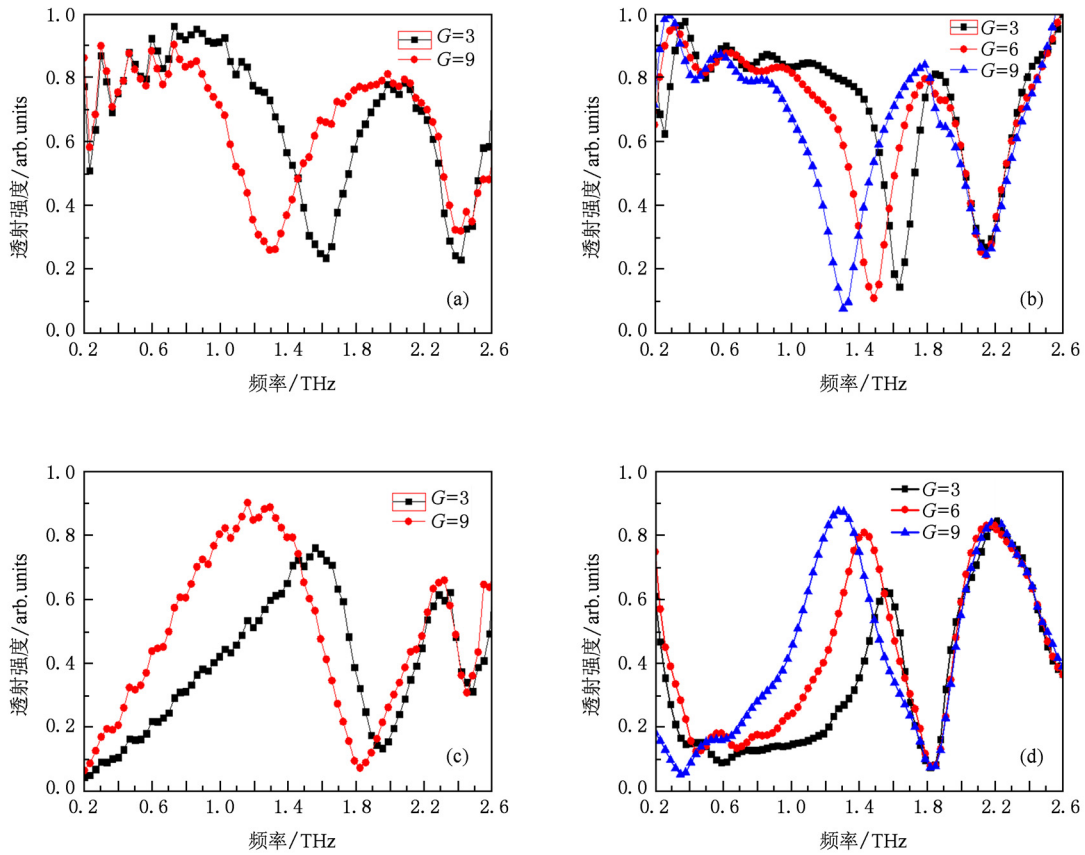


图 5 内外环间距 G 改变情况下的太赫兹透过谱 (a), (b) 是金属双环的实验和模拟结果; (c), (d) 是反双环的实验和模拟结果

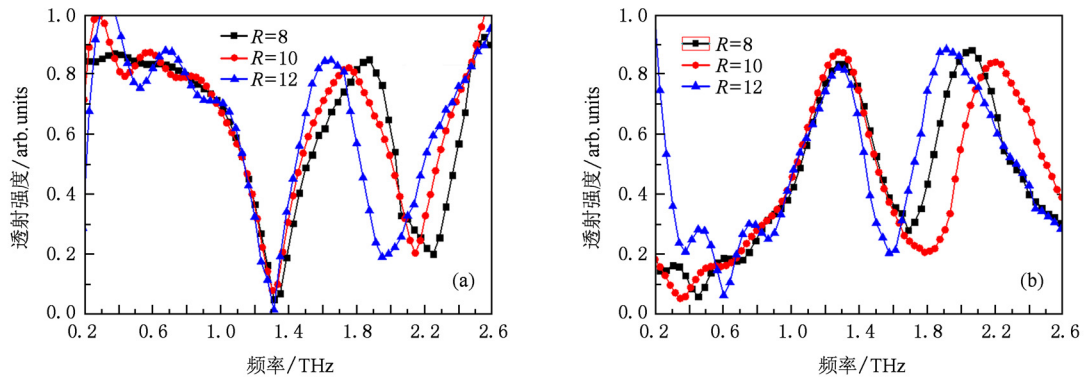


图 6 仅改变内环尺寸时的太赫兹透过谱 (a) 图为金属双环结构模拟结果; (b) 为反双环结构模拟结果

在研究内环尺寸变化对响应频率的影响时,由于样品制作过程工艺复杂,因此只从 FDTD 理论模拟角度进行说明,图 6 即为 FDTD 模拟结果,选用的尺寸为 $T = 60 \mu\text{m}$, $W = 3 \mu\text{m}$, $R = 8 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}$, 同时保证外环尺寸不变.

从图 6 可以看出,当仅改变内环尺寸 R 的时候无论是金属双环结构还是反双环结构,第一个峰值的位置都不变,而随着 R 的增大,第二个峰值会发生红移,也就是说内环尺寸影响的是高频

响应.

通过图 5 和图 6 可以看出,金属双环结构和反双环结构两个特征频率的低频特征峰来源于外环的影响,而高频特征峰来源于内环的影响. 产生这种电磁响应的内在本质我们可以从表面的电流分布来进一步说明. 图 7 所示分别为只保留内环或外环的模拟结果,以及在 1.55 THz 和 2.31 THz 这两个特殊响应频率下的金属表面电流分布,尺寸选取与 Sam_1 和 Sam_2 相同.

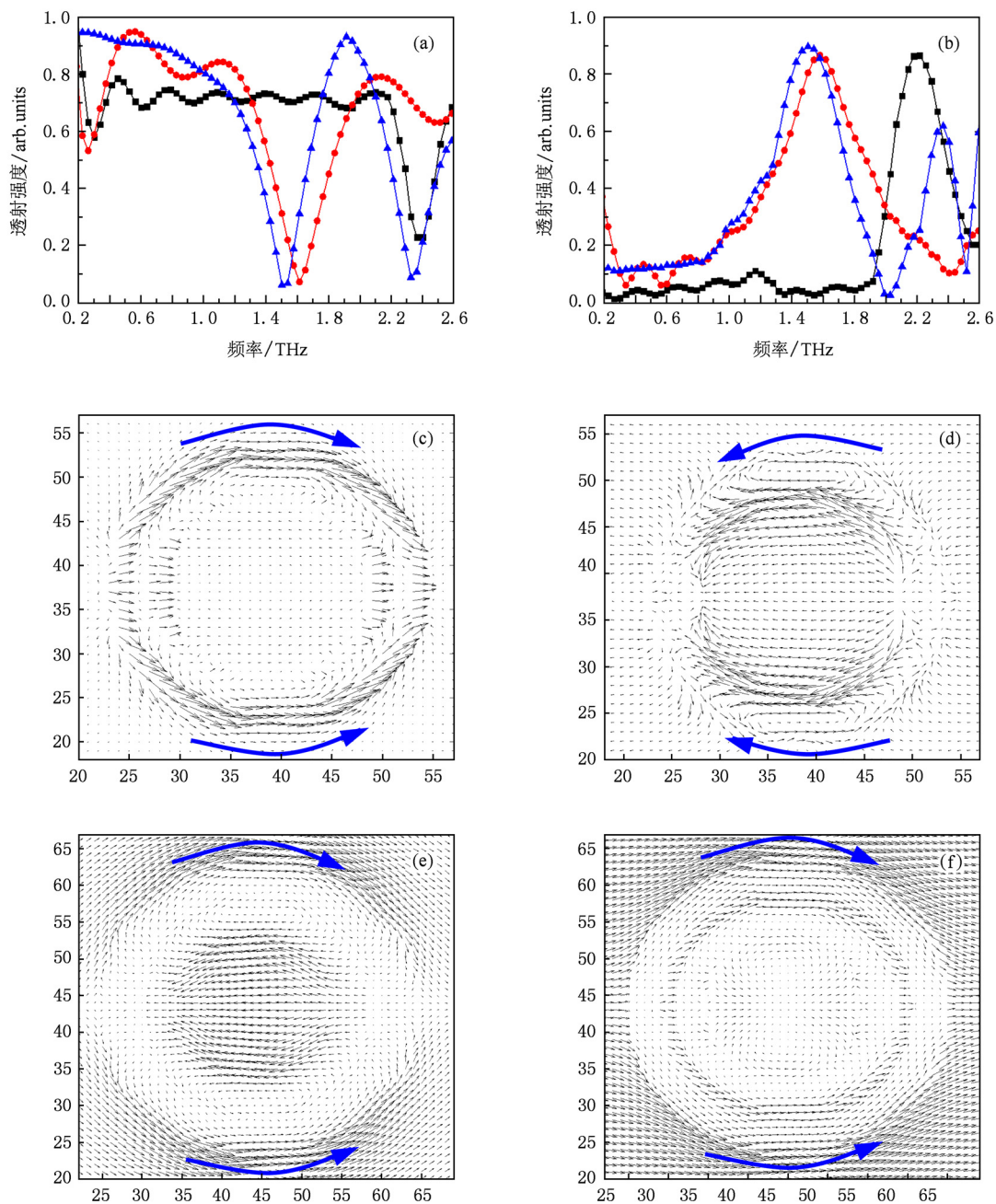


图 7 单独内外环太赫兹透过谱 (a)为金属双环结构的内环和外环图;(b)为反双环结构的内环和外环图;(c),(d)是 1.55 THz 和 2.31 THz 下金属双环结构表面电流分布;(e),(f)是 1.55 THz 和 2.31 THz 下反双环结构表面电流分布

图 7(a), (b) 中方块点线为只有内环时的透过谱, 圆点线为只有外环时的透过谱, 三角线为内外环都有时的双环透过谱. 可以看出无论是双环结构还是反双环结构, 当仅有内环时, 太赫兹在高频部分出现特征响应, 仅有外环时太赫兹仅在低频部分出现特征响应, 内外环同时存在时会出现如上所说的双频率调制, 这与图 6 的结果相符合.

为了更加直观的描述电子与太赫兹波的相互作用, 在 1.55 THz 和 2.31 THz 这两个特殊响应频率处, 分别做这两种结构的电流分布图, 如图 7(c), (d), (e), (f) 所示, 图中箭头为电流矢量方向. 其中, (c), (d) 为金属双环结构在 1.55 THz 和 2.31 THz 时的电流分布, (e), (f) 是反双环结构在 1.55 THz 和 2.31 THz 时的电流分布. 从图 7(c) 看出对于金属双环结构在 1.55 THz 时, 电流密度主要分布在外环部分, 内环分布则很弱. 图 7(d) 为金属双环结构在 2.31 THz 时的电流分布, 此时电流主要分布在内环部分, 而外环相对很微弱, 同样反双环的 (e), (f) 也具有类似电流分布. 但是图 7(d) 的电流方向与其他三个相反, 这是因为金属中的自由电子

受到太赫兹偏振方向的影响, 不同时刻下的电流方向有所不同, 但并不影响其电流密度分布情况.

5. 结 论

本文从实验和模拟两个方面出发, 对金属双环和反双环结构进行了比较详细的讨论. 这两种结构物理形状上互补, 在太赫兹波段的响应情况也互补. 金属双环结构在 1.55 THz 和 2.31 THz 有两个明显的吸收峰, 表明金属结构中的自由电子在这两个频率下对太赫兹的吸收最强. 反双环结构在同样的频率下表现出两个明显的透过峰, 说明在这两个频率下反双环结构中的自由电子对太赫兹吸收较弱. 双频率响应中的低频响应来源于外环电子的影响, 高频响应则来源于内环电子的影响. 因此我们可以通过控制内外环的尺寸来控制太赫兹波段的响应. 这种新型结构的研究可以用于太赫兹波段的滤波器件的制作, 在此基础上, 还可以进一步研制多层环状结构的多频率响应滤波器件, 满足更高的滤波要求.

- [1] Landy N I, Bingham C M, Tyler T 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [2] Shi Y L, Zhou Q L, Zhang C L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 12
- [3] Pickwell E, Cole B E, Fitzgerald A J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2190
- [4] Ma X J, Zhao H W 2008 *Chin. Phys. B* **17** 6
- [5] Ma S H, Shi Y L, Xu X L 2006 *Chin. Phys.* **15** 8
- [6] Laman N, Sree Harsha S 2008 *Optics Express* **16** 4094
- [7] Baker C, Lo T, Tribe W R, Cole B E 2007 *IEEE* **95** 1559
- [8] Weiss C, Torosyan G, Avetisyan Y 2001 *Optics Letters* **26** 563
- [9] Sasa kiyuzo, Yuriavetisyan, Kawasekodo 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3323
- [10] Ma Y, Khalid A, Drysdale T D 2009 *Optics Letters* **34** 10
- [11] Ma Y, Chen Q, Khalid A 2009 *Optics Letters* **35** 4
- [12] Pendry J B, Martín-Moreno L 2004 *Science Magazine* **5** 847
- [13] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [14] Grischkowsky D, Keiding S 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **1990** 7
- [15] Schall M, Walther M, Jepsen P U 2001 *Phys. Rev. B* **64** 094301

Direct fabrication of terahertz dual-band resonator^{*}

Zhao Dong-Mei¹⁾ Shi Yu-Lei^{1)†} Zhou Qing-Li¹⁾ Li Lei¹⁾ Sun Hui-Juan²⁾³⁾ Zhang Cun-Lin¹⁾

1) (*Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics,*

Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

2) (*Basic Course Department of Beijing Union University, Beijing 100101, China*)

3) (*School of optoelectronics of Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(Received 25 October 2010; revised manuscript received 13 December 2010)

Abstract

This paper deals with the dual-band response of double ring metal array structure and anti-double ring structure in a terahertz wave range. The two samples are complementary in structure and their responses in the terahertz band are also complementary. The double ring structure shows two absorption crests and the anti-double ring structure shows two corresponding peaks at the same frequencies. The inner ring of the double ring structure is a source of high-frequency response, while the outer ring leads to the low-frequency vibration. Therefore, we can change the inner and the outer ring size respectively to control the terahertz response. And this response is unaffected by the period of the structure. The double ring structures provide a new method to produce multi-frequency terahertz resonator.

Keywords: THz, resonator, sub wavelength array, FDTD

PACS: 33. 20. Ea, 42. 60. Da, 42. 50. St, 61. 50. Ah

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2007CB310408, 2006CB302901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804077, 11011120242, 10904098), the Beijing Municipal Commission of Education (Grant No KM200910028006), the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning under the Jurisdiction of Beijing Municipality, and the State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences.

[†] Corresponding author. E-mail: yulei_shi@hotmail.com