

# 基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器

王文涛 刘建军 洪 治

(中国计量学院太赫兹技术与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 太赫兹滤波器在成像、光谱技术及传感等领域有着广泛的应用。提出并制备了一种基于三个方形封闭谐振环(CRR)结构的太赫兹多频带滤波器。利用时域有限差分法分析了共振峰产生的机理,讨论了 CRR 结构尺寸与共振频率之间的关系。三个 CRR 滤波器共振峰的产生除了有自身电场耦合作用和相邻环间的磁场耦合作用外,还有内、外环的作用。对所制备的滤波器进行了透射性能测试,获得该滤波器三个共振峰的中心频率分别为 0.33、0.68、1.13 THz,实验结果与仿真设计基本相符。

**关键词** 光学器件;太赫兹;滤波器;封闭谐振环;计算机仿真技术

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0323001

## Multiband Terahertz Filter Based on Three Nested Closed Rings

Wang Wentao Liu Jianjun Hong Zhi

(Centre for Terahertz Research, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** Terahertz filter can be used for various applications such as imaging, spectroscopy and sensing. We propose and fabricate a terahertz multiband filter using three nested closed-ring resonators (CRRs) on polyimide substrate. We numerically analyze the physical origin of the multispectral response and discuss the dependence of the resonance frequencies on the geometrical parameters of the closed rings. It is found that the three resonant peaks of the proposed filter originate from not only the dipole electric response of the three rings and the magnetic response between the adjacent rings, but also the effect from inner or outer CRR. The performance of the filter is measured by terahertz time-domain spectroscopy (TDS), and the experimental results show three distinct resonant peaks at 0.33, 0.68, 1.13 THz, which are in good agreement with simulations.

**Key words** optical devices; terahertz; filter; closed-ring resonator; computer simulation technology

**OCIS codes** 230.7408; 300.6495; 300.6170; 310.6628; 350.2450

## 1 引 言

自 Pendry 等<sup>[1]</sup>提出开口谐振环(SRR)结构来实现电磁响应后,各种基于 SRR 结构的电磁器件的研究得到了快速发展<sup>[2~4]</sup>。Zhao 等<sup>[5]</sup>对 SRR 结构做了改动,实验制备单个具有轴对称性的封闭方形谐振环(CRR)结构实现了单频电磁响应。目前,用两个 CRR 在微波波段实现双频带电磁响应已有理论分析报道<sup>[6,7]</sup>,分析指出 CRR 尺寸越大,谐振频率越小。而且,Shen 等<sup>[8]</sup>用三个 CRR 结构制备了用于

微波的三频带吸波器。另外,基于两个 CRR 结构的共振吸收峰分别在 2.7 THz 和 5.2 THz 处的太赫兹(THz)双频带吸波器也已有实验报道<sup>[9]</sup>。上述研究表明,对于 CRR 结构器件,共振频率与 CRR 尺寸成反比,共振峰的个数与 CRR 个数成正比。这些对称 CRR 结构器件对电场偏振方向不敏感,通过改变 CRR 的个数、尺寸和周期可以灵活地选择共振峰的数量及位置。CRR 结构的这些优点以及 CRR 的互补结构特点使其成为太赫兹波器件的候选结构,可

**收稿日期:** 2012-09-26; **收到修改稿日期:** 2012-10-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(60977066)资助课题。

**作者简介:** 王文涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹器件方面的研究。E-mail: wentaokaka22@163.com

**导师简介:** 洪 治(1964—),男,博士,研究员,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: hongzhi@cjl.u.edu.cn

(通信联系人)

用于多指纹峰特征的生物化学检测(如爆炸物等)和成像等领域。

本文提出了一种由三个方形 CRR 嵌套组合而成的三频带太赫兹滤波器。利用时域有限差分(FDTD)法分析共振峰产生的机理,讨论了样品尺寸对滤波器共振峰频率的影响。制备了样品并对其透射性能进行了测试。

## 2 滤波器设计

太赫兹滤波器一般是由在半导体、石英或者高性能聚合物薄膜材料上周期性排列的金属共振单元

组成的。本文中,衬底材料选用厚度为  $50\ \mu\text{m}$  的聚酰亚胺(PI)薄膜,PI 在太赫兹波段介电常数较小,且具有柔软性等优点。共振单元由三个方形 CRR 组合而成,这种结构的对称性确保了该滤波器对电场偏振不敏感。整个样品是由共振单元在  $x$ 、 $y$  方向上周期性排列而成的。共振单元结构简略图如图 1(a)所示,图中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为三个方形 CRR 的边长, $w$  为金属线宽, $p$  为周期。滤波器的性能,如共振频率、带宽、透射率等,与共振单元的形状和尺寸密切相关。

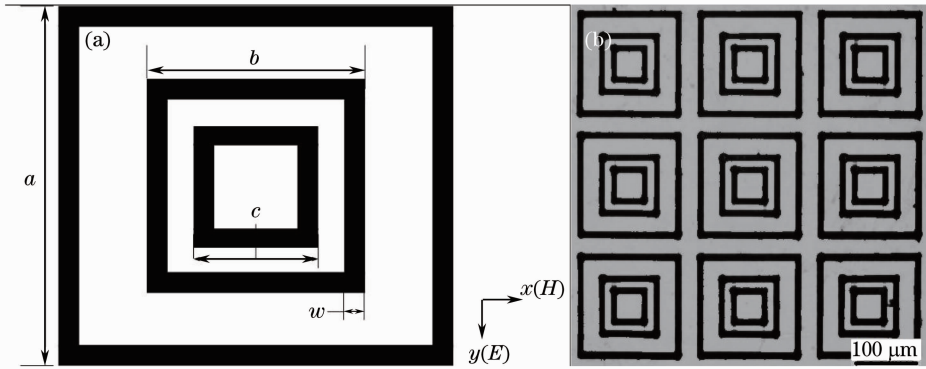


图 1 (a)共振单元简略图;(b)滤波器显微镜照片

Fig. 1 (a) Sketch of the CRR unit cell; (b) microscope image of the fabricated filter

通过时域有限差分法(CST Microwave Studio 三维全波仿真软件)对该结构器件进行了数值分析。仿真中,衬底材料假设为无损耗,介电常数设置为 3.5,金属铜的厚度假定为  $3\ \mu\text{m}$ ,电导率为  $5.8 \times 10^7\ \text{S/m}$ 。共振单元尺寸为: $a=175\ \mu\text{m}$ , $b=100\ \mu\text{m}$ , $c=60\ \mu\text{m}$ , $w=10\ \mu\text{m}$ , $p=200\ \mu\text{m}$ 。太赫兹波的传播方向设定为垂直于样品平面, $x$  和  $y$  方向分别设定为磁场和电场边界条件,如图 1(a)所示。仿真结果如图 2 所示,从图中可以看出,该结构在  $0.1 \sim 1.2\ \text{THz}$  范围内有三

个共振峰,其中中心频率  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别为  $0.32$ 、 $0.71$ 、 $1.10\ \text{THz}$ ,两相邻共振峰间隔  $0.39\ \text{THz}$ ,且三个共振峰的透射率均接近 0。

## 3 滤波器数值分析

### 3.1 共振峰产生的机理分析

为了分析该滤波器三个共振峰产生的机理,对该样品在三个中心频率处的表面电流分布进行了模拟,如图 3 所示。从图 3(a)~(c)可以看出,在外电场的作用下,每个 CRR 在沿着电场方向的环边上都有振荡电流,能产生强的电场耦合作用,引起电场响应<sup>[8]</sup>,环越大,响应频率越小。事实上,共振峰的产生除了有电场耦合作用外,还有由相邻 CRR 之间的反向振荡电流引起的相互作用,这种反向平行的电流会在环与环之间激发磁场响应。对样品在各个共振频率处的表面磁场分别进行了模拟分析,发现当相邻环间距越大时,它们之间的相互作用越弱,这与文献[7]得到的结论一致。另外,由图 3(c)中的表面电流分布可以看出, $f_3$  的产生除了有内环的电场作用和内环与中间环的磁场作用外,外环对其也有一定的贡献。但从图 3(a)中看出,内环对  $f_1$  处共

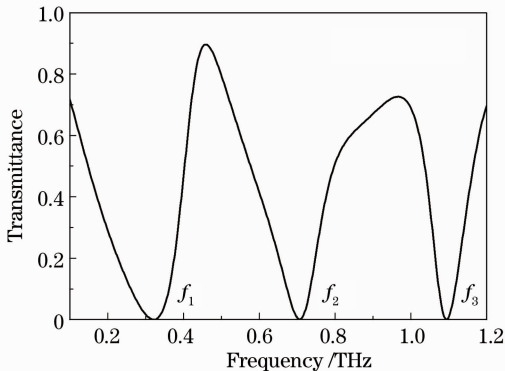


图 2 滤波器透射率仿真谱

Fig. 2 Simulated transmittance spectra of the CRR filter

振峰的作用基本可以忽略。分别对去掉内环或外环的双环滤波器进行模拟仿真，与三环滤波器的共振频率  $f_1$ 、 $f_3$  比较，结果也证实了内环对  $f_1$  影响非常

小，而外环对  $f_3$  有一定的作用，并且当外环尺寸越大时，三环的共振峰频率  $f_3$  相对于没有外环的双环结构共振峰频率移动越大。

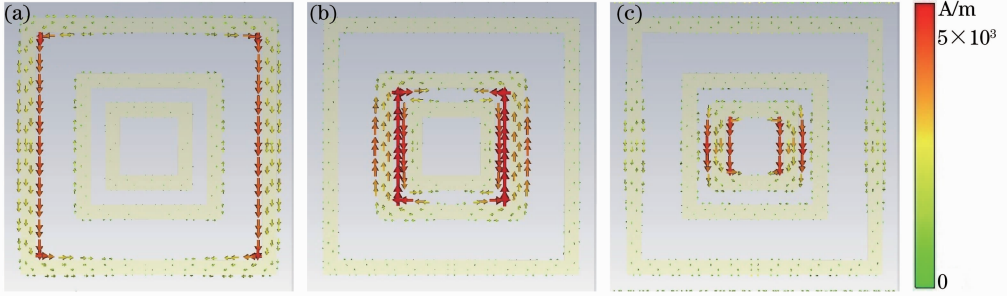


图3 (a)  $f_1$ , (b)  $f_2$  和 (c)  $f_3$  对应的表面电流分布

Fig. 3 Distribution of surface current for the three resonant peaks at (a)  $f_1$ , (b)  $f_2$  and (c)  $f_3$

### 3.2 滤波器与 CRR 尺寸的关系

为了进一步了解该结构滤波器的性能，还从理论上分析了周期和线宽不变时方形环的尺寸变化对滤波器的影响，仿真结果如图 4 所示。当  $130 \mu\text{m} \leq a \leq 190 \mu\text{m}$  时，随着外环长度  $a$  的增大， $f_1$  逐渐向低频移动，而  $f_2$  和  $f_3$  有较小的变化，如图 4(a) 所示，这也能证明外环对  $f_3$  共振峰的产生有一定的作用，与上文所得结论一致。同样当  $90 \mu\text{m} \leq b \leq 150 \mu\text{m}$  时，随  $b$  变化的滤波器的透射率谱如图 4(b) 所示。当  $50 \mu\text{m} \leq c \leq 70 \mu\text{m}$  时， $c$  增大， $f_3$  显著减小，共振峰

Q 值也减小，如图 4(c) 所示。 $f_2$  同样随  $c$  增大而明显减小， $f_2$  的移动主要是内环与中间环之间的磁场相互作用造成的；而  $f_1$  只有非常微小的变化，这也说明了内环对  $f_1$  共振峰的作用可以忽略。另外，经分析发现，该滤波器的共振频率与 CRR 尺寸之间存在着一种近似的线性关系，图 4(d) 为共振频率随  $b$  值的变化。这为设计具有特定共振频率的滤波器提供了很好的理论依据和数值参考。另外，通过数值模拟分析还可以得出，调节 CRR 尺寸及周期可以方便地在大的频率范围内调节三个共振峰频率。

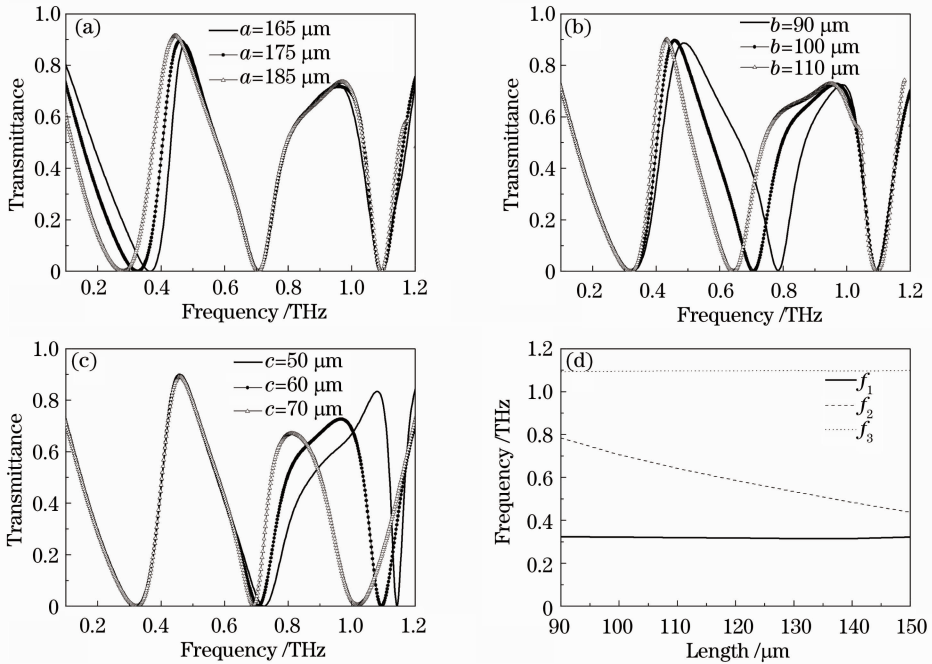


图4 滤波器共振频率分别随(a)  $a$ , (b)  $b$ , (c)  $c$  变化的透射率谱及(d)其与  $b$  值的关系

Fig. 4 Simulated spectral response of the CRR filter with varied parameters (a)  $a$ , (b)  $b$ , (c)  $c$  and (d) three resonant frequencies as functions of  $b$

## 4 样品制备与实验

### 4.1 样品制备

利用激光诱导和化学镀铜的方法在  $50\ \mu\text{m}$  厚的 PI 上制备了滤波器样品。这种方法的曝光过程无需掩模,可以灵活地刻写任意形状图案结构。样品详细制备过程见文献[10]。目前所制备样品的尺寸误差大约为  $\pm 1\ \mu\text{m}$ ,样品的加工精度及均匀性主要与激光功率的稳定性、样品的平整度及平移台的重复性等有关。所制备的整个器件样品的大小为  $1\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$ ,样品的显微镜照片如图 1(b)所示。显微镜显示,所制备的 CRR 尺寸约为: $a = 174\ \mu\text{m}$ , $b = 101\ \mu\text{m}$ , $c = 60\ \mu\text{m}$ , $w = 10\ \mu\text{m}$ , $p = 200\ \mu\text{m}$ 。经 Dektek150 型台阶仪测量,样品的金属铜条(包括银层)厚度为  $4\ \mu\text{m}$ 。

### 4.2 滤波器性能测试与分析

对所制备的滤波器用太赫兹时域光谱仪 (THz-TDS) 进行了透射特性测试。实验中,太赫兹波的入射方向垂直于器件表面。为了减少空气中水分对太赫兹信号的吸收,THz-TDS 光路被密封在充有干燥氮气的箱子中,相对湿度小于 1%,测量在室温下进行,测试结果如图 5 所示。在  $0.1 \sim 1.5\ \text{THz}$  范围内,该样品具有三个共振峰,其中心频率分别为  $0.33$ 、 $0.68$ 、 $1.13\ \text{THz}$ ,与仿真设计的共振频率(图 2)存在微小的偏差,这主要是样品制备过程中存在尺寸误差所引起的。而实验得到三个共振峰的最小透射率分别为  $1.3\%$ 、 $9.7\%$ 、 $7.6\%$ ,与仿真设计有较大的差别。在考虑实际衬底材料有损耗的情况下,用 CST 软件再对滤波器进行了数值仿真,仿真中将衬底材料的介电常数设为  $3.5 + 0.2i$ ,仿真结果如图 5 中实线所示。结果表明这种差异可能是由衬底材料 PI 在太赫兹波段存在较大吸收引起的。后续工作中,可以利用在太赫兹波段吸收较小的材料,如高密度

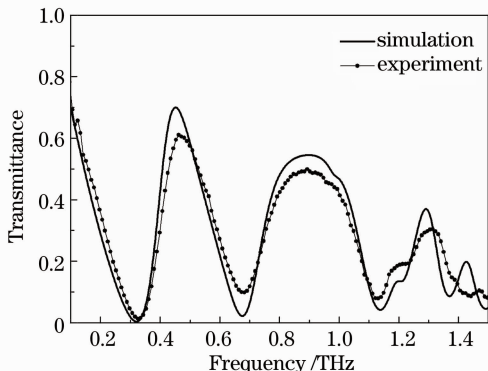


图 5 CRR 滤波器透射率谱

Fig. 5 Transmittance spectra of the CRR filter

聚乙烯(HDPE)<sup>[11]</sup>或低密度聚乙烯(LDPE)<sup>[12]</sup>等作为器件的衬底材料,以提高器件性能。

## 5 结 论

设计并制备了一种基于三个方形 CRR 结构的多频带太赫兹滤波器,这种滤波器具有结构简单、对电场偏振不敏感等优点。分析了共振峰产生的机理,发现外环对高频共振峰  $f_3$  的产生有一定的作用,并且当外环尺寸越大时,这种作用越强,但内环对低频共振峰  $f_1$  的影响则可以忽略。理论上讨论了该滤波器的共振频率与 CRR 尺寸之间的关系。可以通过调节每个 CRR 的尺寸或周期来灵活设计共振峰的位置。实验测试结果表明,该滤波器的三个共振峰频率与仿真设计一致。另外,还可以通过利用 CRR 的互补结构来制备多频带太赫兹带通滤波器,用于多指纹峰特征检测与成像。

### 参 考 文 献

- J. P. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 1999, **47**(11): 2075~2084
- N. Katsarakis, G. Konstantinidis, A. Kostopoulos *et al.*. Magnetic response of split-ring resonators in the far-infrared frequency regime[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1348~1350
- T. Driscoll, G. O. Andreev, D. N. Basov *et al.*. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(6): 062511
- A. K. Azad, A. J. Taylor, E. Smirnova *et al.*. Characterization and analysis of terahertz metamaterials based on rectangular splitting resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(1): 011119
- H. Zhao, M. C. Martin. Negative index of refraction observed in a single layer of closed ring magnetic dipole resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(25): 253119
- Z. G. Dong, M. X. Xu, S. Y. Lei *et al.*. Negative refraction with magnetic resonance in a metallic double-ring metamaterial [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(6): 064101
- P. Ding, E. J. Liang, L. Zhang *et al.*. Antisymmetric resonant mode and negative refraction in double-ring resonators under normal-to-plane incidence [J]. *Phys. Rev. E*, 2009, **79**(1): 016604
- X. P. Shen, T. J. Cui, J. M. Zhao *et al.*. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9401~9407
- Y. Ma, Q. Chen, J. Grant *et al.*. A terahertz polarization insensitive dual band metamaterial absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 945~947
- Wang Wentao, Liu Jianjun, Li Xiangjun *et al.*. Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser induced and non-electrolytic plating with copper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1231002  
王文涛,刘建军,李向军等.激光诱导和化学镀铜制备太赫兹线栅偏振器和滤波器[J].*光学学报*, 2012, **32**(12): 1231002
- Y. Ma, A. Khalid, T. D. Drysdale *et al.*. Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1555~1557
- S. Y. Benjamin, F. Christophe, Hungyen Lin *et al.*. Low-cost ultra-thin broadband terahertz beam-splitter [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(5): 4968~4978