

文章编号: 2095-4980(2021)02-0185-04

## 基于太赫兹人工超材料的带阻滤波器

张旻南<sup>1,2</sup>, 李虹<sup>3</sup>, 马立鹏<sup>1,2</sup>, 王守山<sup>1</sup>, 李彬<sup>\*1</sup>

(1.公安部第一研究所, 北京 100048; 2.北京中天锋安全防护技术有限公司, 北京 100048;  
3.云南省公安厅 禁毒局, 云南 昆明 650228)

**摘要:** 鉴于太赫兹辐射的特殊性, 其难以与自然界中多数材料发生电磁相互作用, 导致太赫兹功能器件匮乏。人工超材料通过人工设计结构单元的周期排列组合, 可实现太赫兹波段电磁响应的调控。本文设计一种由二氧化硅衬底上的单层金属方形谐振环结构构成的太赫兹带阻人工超材料, 具有窄带宽、深带阻特性、偏振不敏感特性, 通过近场电场和表面电流分析, 带阻共振特性源于谐振环结构的电偶极共振。该设计结构简单, 易于制备, 在太赫兹调制器件、太赫兹通信、光电探测等领域具有应用价值。

**关键词:** 太赫兹超材料; 带阻滤波器; 电偶极共振; 透过率带阻

中图分类号: TN604

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020273

## A terahertz metamaterial for band-stop filter

ZHANG Minnan<sup>1,2</sup>, LI Hong<sup>3</sup>, MA Lipeng<sup>1,2</sup>, WANG Shoushan<sup>1</sup>, LI Bin<sup>\*1</sup>

(1.The First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China; 2.Beijing Zhong-Tianfeng Security Protection Technologies Co.,Ltd, Beijing 100048, China; 3.Narcotics Bureau, Yunnan Provincial Public Security Department, Yunnan Kunming 650228, China)

**Abstract:** It is difficult for the terahertz radiation to interact electromagnetically with most materials in nature due to its spectral specificity, which results in the terrible scarcity of terahertz functional devices. The terahertz metamaterial which is periodic arrangement of artificially designed units with subwavelength, can regulate the electromagnetic response of the terahertz band and become the research hotspot. In this paper, a kind of terahertz band-stop metamaterial with a single-layer metal square resonant ring on silicon dioxide substrate is designed, which has a narrow width and deep band-stop characteristics, and is insensitive to polarization. The band-stop resonance is attributed to the electric dipole resonance in the metal square resonant ring. Moreover, the proposed structure is easy for fabrication, and will be applied in the fields of terahertz modulation devices, THz communication and photoelectric detection.

**Keywords:** terahertz metamaterial; band stop filter; electric dipole resonance; transmission band stop

太赫兹(THz)波通常是指频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 其在低频段与微波重合, 在高频段与红外波段重合, 是衔接电子学和光子学的重要波段<sup>[1-4]</sup>。随着微纳加工工艺及超快光电子学等技术的发展与进步, 由人工设计的周期性排列的亚波长结构单元构成的人工电磁超材料, 极大丰富了电磁响应特性的多样性, 太赫兹技术得到快速发展, 为太赫兹吸收器件提供了广阔的设计空间。目前太赫兹技术已广泛应用于爆炸物检测<sup>[5]</sup>、毒品检测<sup>[6]</sup>、安检成像<sup>[7]</sup>等领域。随着 6G 通信的到来, 太赫兹技术成为时代发展的关键, 特别是太赫兹源、太赫兹功能器件、太赫兹探测器等需求。作为太赫兹系统的重要组成部分<sup>[8-9]</sup>, 太赫兹功能器件的研究也越来越受到重视, 其中带阻滤波器功能器件<sup>[10-13]</sup>在太赫兹通信、成像领域应用广泛。2017 年 LI Peng 等提出一种由一个可移动的条和一个固定的倒梯形环组成的微电子机械系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)太赫兹带阻滤波器, 通过直流电压可实现对结构的面内平移以达到带阻可调谐的目的<sup>[14]</sup>。2019 年王俊林等基于金属-介质-金属结构的太赫兹超材料宽阻带滤波器, 具有较宽的阻带和较好的频率选择性。本文利用单层金属方形谐振环结构设计了

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-08-07

作者简介: 张旻南(1974-), 男, 工程师, 主要研究方向为禁毒技术。email:365979854@qq.com

\*通信作者: 李彬 email:tshlib@126.com

一种窄阻带太赫兹带阻滤波器<sup>[15]</sup>，通过三维电磁场仿真分析了共振透射带阻的起源，且该滤波器具有偏振不敏感特性，在太赫兹调制器件中具有潜在的应用价值。

### 1 器件设计与仿真设计

太赫兹带阻滤波器人工超材料结构设计如图 1 所示，超构表面由方形谐振环周期排列组成，衬底为二氧化硅。其中，方形谐振环尺寸如图 1(b)所示，阵列周期  $P=120\ \mu\text{m}$  ( $P_x=P_y$ )，厚度  $h$  为 300 nm。本文采用时域有限差分法 (Lumerical, Finite-Difference Time-Domain Solutions) 进行三维电磁场模拟仿真，电场偏振方向沿  $x$  轴方向，传播方向沿  $z$  轴，在  $x,y$  方向采用周期边界条件，在  $z$  轴方向采用完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML) 边界条件。超构表面金属为铜，其电导率  $5.96 \times 10^7\ \text{S/m}$ <sup>[16]</sup>；二氧化硅折射率采用 Palik 模型<sup>[17]</sup>。

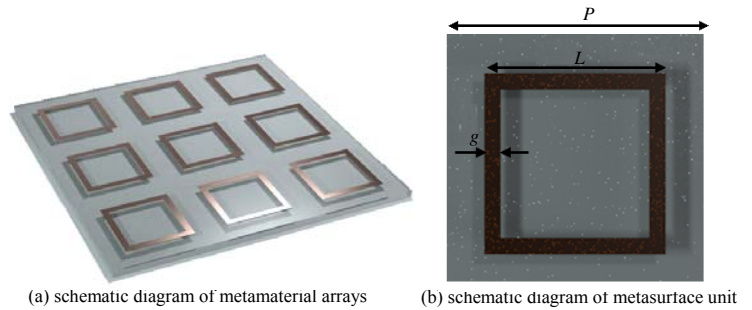


Fig.1 Structural schematic diagram of terahertz band-stop filter

图 1 太赫兹带阻人工超材料结构示意图

### 2 数据分析与讨论

通过时域有限差分法对太赫兹带阻滤波器的透过率进行计算。图 2(a)为方形谐振单元宽度  $g=5\ \mu\text{m}$  时的透过率曲线，透过率带阻共振中心频率随方形谐振单元长度  $L$  的增加而发生红移，带宽逐渐减小；图 2(b)为方形谐振单元长度  $L=80\ \mu\text{m}$  时的透过率曲线，透过率带阻共振中心频率随方形谐振单元宽度  $g$  的增加而发生蓝移，带宽逐渐增大。共振频率随结构单元长度和宽度变化的特性，具有电偶极共振属性。在  $L=80\ \mu\text{m}$ 、 $g=5\ \mu\text{m}$  时，其共振频率  $f=0.79\ \text{THz}$ ，带阻深度达到  $-31.5\ \text{dB}$ ，带宽为  $0.07\ \text{THz}$  ( $T_{(f1=0.76\ \text{THz})}=T_{(f2=0.84\ \text{THz})}=15.75\ \text{dB}$ )，插入损耗为  $-0.50\ \text{dB}$ ，具有良好的窄带阻滤波器特性。

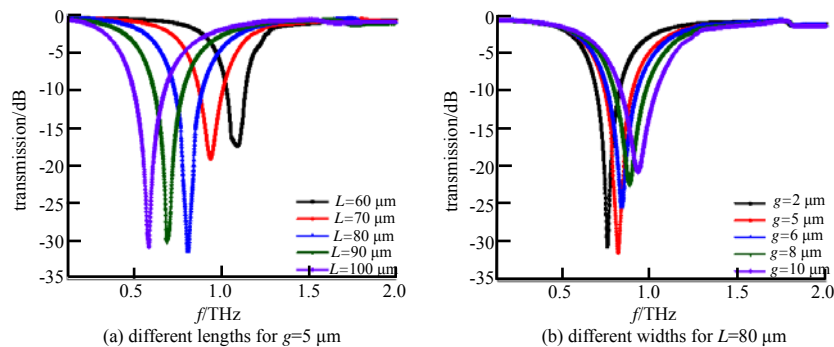


Fig.2 Transmission of terahertz band-stop filter with different lengths

图 2 不同长度和宽度的太赫兹带阻滤波器透过率曲线

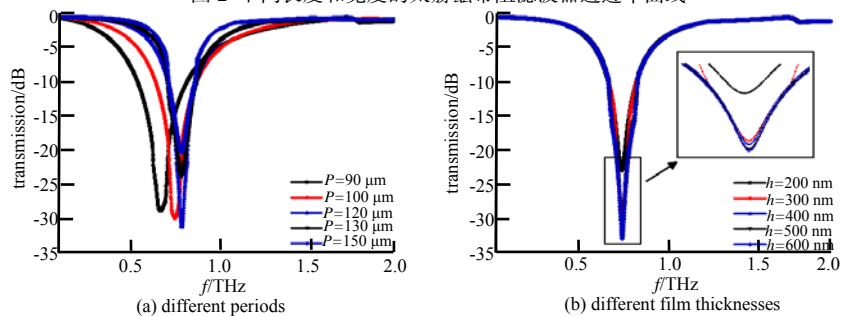


Fig.3 Transmission of terahertz band-stop filter

图 3 太赫兹带阻滤波器传输方式

研究结构单元周期  $P$  和铜薄膜厚度  $h$  对共振频率和调制深度的影响如图 3(a)所示，当周期  $P < 120\ \mu\text{m}$  时，随周期减小，因临近结构单元相互作用引起共振频率发生红移； $P > 120\ \mu\text{m}$  时，随周期增加，因临近结构单元相互作用减弱，共振频率无明显频移，但因超构单元有效占空比的降低，导致调制深度下降。如图 3(b)所示，

铜薄膜厚度增加，并不影响共振频率，但可增加带阻滤波器调制深度；但当厚度  $h > 300$  nm，调制深度增加并不明显，从器件加工和成本角度考虑， $h = 300$  nm 是优化的参数选择。

为了进一步分析透过率带阻特性的起源，本文对  $L = 80$   $\mu\text{m}$  的超材料结构进行了共振频率  $f = 0.79$  THz 处的近场电磁场分析。如图 4 所示，其中图 4(a) 为近场电场分布，电场主要分布于与入射电场偏振垂直的谐振环“边臂”中，该特性具有电偶极共振特性；图 4(b) 为谐振环的表面电流分布，表面电流主要集中在与入射电场偏振平行的谐振环“边臂”中，且电流方向相同，进一步证明，透过率带阻共振源于电偶极共振<sup>[18-20]</sup>。

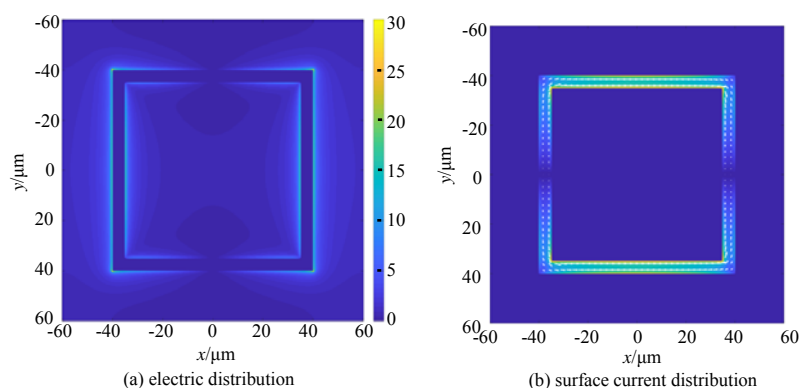


Fig.4 Near-field electric field distribution and surface current distribution at resonance frequency  $f = 0.79$  THz

图 4 共振频率  $f = 0.79$  THz 时近场电场分布和表面电流分布

滤波器的偏振敏感与否关系到器件应用的普适性与操作的难易程度，为此，本文以  $L = 80$   $\mu\text{m}$ 、 $g = 5$   $\mu\text{m}$  的太赫兹超材料带阻结构为例进行不同入射电场偏振方向下的透过率分析，如图 5 所示。在从  $0^\circ \sim 45^\circ$  不同入射电场作用下，结构单元有效共振长度增加，透过率带阻中心频率发生细微红移，频率移动小于  $0.003$  THz，从实用角度而言器件具有偏振不敏感特性。

### 3 结论

本文设计一种由二氧化硅衬底上的单层金属方形谐振环结构构成的太赫兹带阻人工超材料，共振频率随谐振环长度增加而红移，随单元结构宽度增加而蓝移。其中  $L = 80$   $\mu\text{m}$ 、 $g = 5$   $\mu\text{m}$  时，其带阻深度达到  $-31.5$  dB，带宽为  $0.07$  THz，而插入损耗为  $-0.50$  dB，有良好的窄带阻滤波器特性。通过近场电场分布和表面电流分析，共振带阻特性源于谐振环结构的电偶极共振，且该结构透过率带阻特性不随偏振角度变化，具有简易性、普适性，在太赫兹调制器件、太赫兹成像、太赫兹通信等领域有应用参考价值。

#### 参考文献：

- [1] 武帅,屈浩,涂昊,等. 太赫兹技术应用进展[J]. 电子技术应用, 2019,45(7):3-7,18. (WU Shuai,QU Hao,TU Hao,et al. Application progress of terahertz technology[J]. Application of Electronic Technology, 2019,45(7):3-7,18.)
- [2] 梁达川,关松. 太赫兹波无损检测技术及其应用[J]. 光电技术应用, 2018,33(6):1-8. (LIANG Dachuan,GUAN Song. Terahertz wave nondestructive testing technology and its application[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2018, 33(6):1-8.)
- [3] 安德越,马艳霞,张华坤,等. 中国被动式太赫兹安检行业发展现状[J]. 电子世界, 2019(21):51-52. (AN Deyue,MA Yanxia,ZHANG Huakun,et al. Development status of China's passive terahertz security inspection industry[J]. Electronic World, 2019(21):51-52.)
- [4] ANONYMOUS. 太赫兹技术[J]. 中国无线电, 2018(3):46. (ANONYMOUS. Terahertz technology[J]. China Radio, 2018(3):46.)
- [5] 刘灏,时家明,程立,等. 远距离爆炸物探测技术[J]. 激光与红外, 2015,45(7):733-739. (LIU Hao,SHI Jiaming,CHENG Li,et al. Long-range explosive detection technology[J]. Laser and Infrared, 2015,45(7):733-739.)
- [6] 郑晓雨,赵彦彪,杨虹贤,等. 太赫兹技术在毒品检验中的研究进展[J]. 刑事技术, 2017,42(6):496-500. (ZHENG Xiaoyu, ZHAO Yanbiao,YANG Hongxian,et al. Research progress of terahertz technology in drug testing[J]. Criminal Technology, 2017,42(6):496-500.)

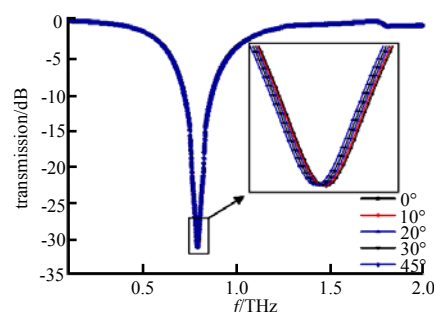


Fig.5 Transmission of terahertz band-stop filter under different polarization angles

图 5 不同偏振角度下太赫兹带阻滤波器透过率曲线

- [ 7 ] 蒋林华,王尉苏,童慧鑫,等. 太赫兹成像技术在人体安检领域的研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2019,41(1):46-51. (JIANG Linhua,WANG Weisu,TONG Huixin,et al. Research progress of terahertz imaging technology in the field of human security[J]. Journal of Shanghai University of Technology, 2019,41(1):46-51.)
- [ 8 ] SHI Q,TIAN K,ZHU H,et al. Flexible and giant terahertz modulation based on ultra strain sensitive conductive polymer composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020,12(8):9790-9796.
- [ 9 ] VALMORRA F,SCALARI G,MAISSEN C. Low-bias active control of terahertz waves by coupling large-area CVD graphene to a terahertz metamaterial[J]. Nano Letters, 2013,13(7):3193-3198.
- [10] 史珂,全文浩,邹蕊娇,等. 太赫兹全息成像技术在太阳电池中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):572-576. (SHI Ke,TONG Wenhao,ZOU Ruijiao,et al. Application of terahertz holographic imaging technology in solar cells[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):572-576.)
- [11] 张彩虹,吴敬波,金彪兵. 太赫兹超人工电磁超材料的研究进展[J]. 中国激光, 2019,46(6):50-57. (ZHANG Caihong, WU Jingbo,JIN Biaobing. Research progress of terahertz superconducting artificial electromagnetic metamaterials[J]. China Laser, 2019,46(6):50-57.)
- [12] 郝梦真,延凤平,王伟,等. 基于超材料的太赫兹偏振不敏感宽带吸波器[J]. 中国激光, 2019,46(12):297-305. (HAO Mengzhen,YAN Fengping,WANG Wei,et al. Terahertz polarization insensitive broadband absorber based on metamaterials[J]. China Laser, 2019,46(12):297-305.)
- [13] 杜永好,曹曙桦,王琦,等. 超材料完美吸波器研究进展[J]. 光学仪器, 2019,41(2):80-88. (DU Yonghao,CAO Shuhua, WANG Qi,et al. Research progress of metamaterial perfect absorber[J]. Optical Instruments, 2019,41(2):80-88.)
- [14] LI P. Design of tunable terahertz bandstop filter based on electrostatically actuated reconfigurable metamaterials[J]. Optics Communications, 2017(392):263-267.
- [15] WANG J L,WANG X,HAN D. Terahertz wide stop-band metamaterials filter based on metal-dielectric-metal structure[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019,38(6):722-727.
- [16] CHEN X,FAN W. Ultra-flexible polarization-insensitive multiband terahertz metamaterial absorber[J]. Applied Optics, 2015,54(9):2376-2382.
- [17] EDWARD D Dalik. Handbook of optical constants of solids[M]. Florida,USA:Academic Press Inc,Orlando, 1985.
- [18] FU X,ZENG X,CUI T J,et al. Mode jumping of split-ring resonator metamaterials controlled by high-permittivity BST and incident electric fields[J]. Scientific Reports, 2016,6(1):31274.
- [19] WANG Junlin,ZHANG Binzhen,WANG Xin,et al. Flexible dual-band band-stop metamaterials filter for the terahertz region[J]. Optical Materials Express, 2017,7(5):1656-1665.
- [20] ZHONG M. Localized surface plasmon resonance induced terahertz broad absorption band[J]. Optics Communications, 2015(356):607-611.