

柔性双阻带太赫兹超材料滤波器

王俊林^{1,2}, 张斌珍^{1*}, 段俊萍¹, 王 鑫^{1,2}

¹中北大学仪器与电子学院仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

²鄂尔多斯应用技术学院信息工程系, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要 提出并设计了一种极化不敏感的柔性双阻带太赫兹超材料滤波器, 并采用 CST 2015 仿真软件对该滤波器的结构进行仿真; 为深入研究超材料滤波器的传输特性, 分别对该超材料滤波器在 2 个谐振吸收峰处的电场强度和表面电流分布进行仿真; 为验证仿真结果的正确性, 采用微加工工艺制备了超材料滤波器样品, 使用太赫兹时域光谱系统对其传输特性进行测试。仿真结果表明: 该滤波器在 0.131 THz 和 0.182 THz 处获得了 3 dB 带宽分别为 15 GHz 和 10 GHz 的 2 个阻带, 并且在这 2 个谐振频率点的传输系数 S_{21} 可以达到 -43.56 dB 和 -48.76 dB, 表现出了良好的阻带特性; 测试结果与仿真结果比较吻合。

关键词 材料; 超材料滤波器; 太赫兹光学; 微机电系统; 谐振; 极化

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1016001

Flexible Dual-Stopband Terahertz Metamaterial Filter

Wang Junlin^{1,2}, Zhang Binzhen¹, Duan Junping¹, Wang Xin^{1,2}

¹Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Department of Information Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos, Nei Monggol 017000, China

Abstract A flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter with polarization insensitivity is proposed and designed. CST 2015 simulation software is used to simulate the structure of the designed metamaterial filter. To further study transmission characteristics of the metamaterial filter, we simulate the electric field intensities and surface current distributions of the metamaterial filter, respectively. To verify the validity of simulation results, we prepare a metamaterial filter sample by using the micro-manufacturing technology, and measure the transmission performance of the filter by using the terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. The results show that the filter has two stopbands with 3 dB bandwidth of 15 GHz and 10 GHz at resonance points when the resonance frequencies are 0.131 THz and 0.182 THz, respectively. The transmission coefficient S_{21} at the two resonance points can reach -43.56 dB and -48.76 dB, and the filter shows good stopband characteristics. The measured results accord with the simulated ones.

Key words materials; metamaterial filter; terahertz optics; micro electro mechanical system; resonance; polarization

OCIS codes 160.3918; 120.2440; 260.5740; 260.5430

1 引 言

太赫兹 (THz) 波指频率介于 0.1~10.0 THz 的电磁波, 它是 21 世纪科学研究最前沿的领域之一^[1]。近几十年, 关于太赫兹的研究日新月异, 太赫兹被广泛应用于物体成像、安检、传感、医疗诊断和宽带移动通信等领域^[2-5]。对太赫兹波传输特性和传输器件的广泛关注推动了太赫兹系统的搭建和应用。自然界的固有

收稿日期: 2017-05-23; **收到修改稿日期:** 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51475438, 61401405, U1637212)、山西省自然科学基金(2014011021-4)、山西省留学人员科技活动项目(20150603ZX)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16378)

作者简介: 王俊林(1982—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事超材料功能器件和微机电系统(MEMS)射频微波器件方面的研究。

E-mail: mems_wang@163.com

* **通信联系人.** E-mail: zhangbinzhen@nuc.edu.cn

材料对太赫兹波的电磁响应很弱,不能有效产生太赫兹波的电磁辐射,且无法对太赫兹波进行有效探测,从而极大地限制了太赫兹技术的发展。超材料的出现为太赫兹波的应用打开了一扇大门,使太赫兹波的高效产生和探测成为现实。

电磁超材料指具有超常物理性质的人工复合结构或复合材料,而这些超常物理性质是常规天然材料所不具备的。电磁超材料具有一系列的奇异特性,如负折射率、完美透镜、隐身斗篷和逆多普勒效应等^[6-9],这使得其具有非常重要的科学意义和实际应用价值,从而得到了研究人员的广泛关注。目前,基于超材料的各种功能器件被大量设计和研制,如完美吸波体、完美透镜、天线和滤波器等^[9-14]。由于滤波器在成像、生物技术、通信和测试系统中均有着广泛的应用^[15-17],因此,具有宽带宽、高效传输以及良好阻带(或通带)上升沿、下降沿陡降度的太赫兹滤波器是太赫兹器件研发的重点。超材料具有高度的设计灵活性和相对简单的制备过程,因此被广泛应用于滤波器设计,基于超材料的太赫兹滤波器研究为太赫兹滤波器的发展和应用带来了新的机遇。超材料存在较强的电磁谐振,导致超材料滤波器的带宽一般较窄,所以目前主要采用多层超材料来实现多频带或宽频带的传输,每层单元结构采用不同的尺寸来吸收不同频率的电磁波,从而实现宽频带的滤波器^[18-20]。多层结构会直接导致滤波器的整体厚度和制作难度增加,这在很大程度上限制了多频带或宽频带滤波器的实际应用。因此,基于单层超材料结构实现多频带或宽频带传输成为目前的一个研究热点。柔性器件可以很好地满足器件在便捷性、超薄性、可弯曲性等方面的需求,是未来器件的发展趋势之一^[21-24]。在滤波器的设计和制备过程中,通常选用聚酰亚胺(PI)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)等柔性基底制备与非平面结构可以充分共形的柔性超材料滤波器。

本文提出了一种基于单层超材料结构的柔性双阻带太赫兹滤波器,该滤波器由顶层的周期性对称金属谐振结构阵列和底层的柔性 PDMS 基底组成。基于 CST 2015 仿真软件对该超材料滤波器进行仿真。为了深入研究电磁波的传输机制,详细分析了该滤波器结构在谐振频率处的电场和表面电流分布。采用微加工工艺制备了滤波器样品,使用太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统测试滤波器的太赫兹传输响应。

2 滤波器设计和仿真

双阻带超材料滤波器的单元结构如图 1 所示,该单元结构由介质基底及其顶层的对称金属谐振结构组成。金属谐振结构的材料选择电导率 σ 为 $4.09 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 的金,介质基底采用相对介电常数 ϵ_r 为 2.8 的柔性 PDMS 材料。采用基于有限积分法的 CST 2015 仿真软件对超材料滤波器结构进行仿真。在仿真过程中,波矢量 \mathbf{k} 始终垂直于结构平面,电场 E 和磁场 H 与结构平面平行。为了模拟无限大的周期性单元结构,在仿真过程中,横向 xoy 平面设置为周期性边界条件, z 轴方向设置为开放性边界条件。单层超材料双阻带滤波器单元结构的最终优化参数为 $L_1 = 400 \text{ } \mu\text{m}$, $L_2 = 320 \text{ } \mu\text{m}$, $W_1 = 80 \text{ } \mu\text{m}$, 阵列周期 $P = 1800 \text{ } \mu\text{m}$, 介质层厚度 $H_d = 60 \text{ } \mu\text{m}$, 顶层金属结构的厚度 $H_m = 18 \text{ } \mu\text{m}$ 。

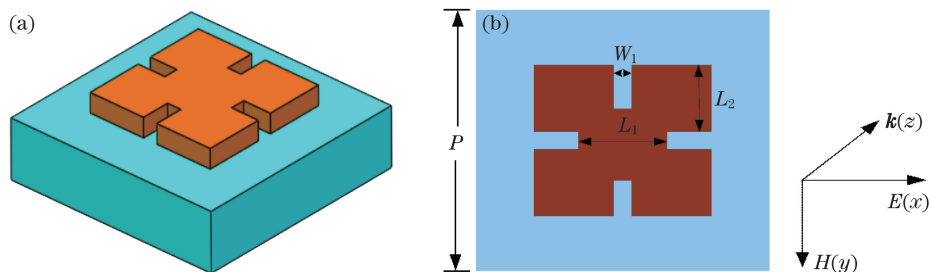
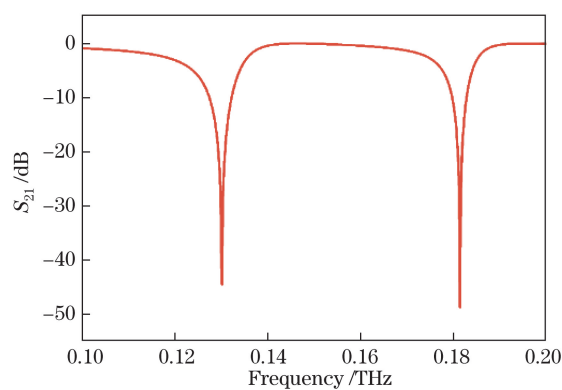


图 1 双阻带超材料滤波器单元结构图。(a)三维图;(b)俯视图

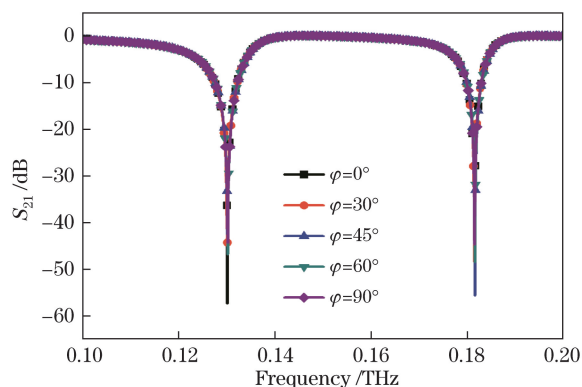
Fig. 1 Schematics of unit cell of dual-stopband metamaterial filter. (a) Three dimensional model; (b) top view

图 2 所示为双阻带超材料滤波器的 S 参数仿真曲线。为了研究双阻带滤波器的特性,主要关注滤波器传输系数 S_{21} 的仿真曲线。由图 2 可知,当电磁波垂直入射到结构表面时,滤波器在谐振频率为 0.131 THz 和 0.182 THz 处产生了 3 dB 带宽分别为 15 GHz 和 10 GHz 的 2 个阻带。在相应的谐振频率处,传输系数 S_{21} 可以分别达到 -43.56 dB 和 -48.76 dB , 表现出了良好的阻带特性。

图 2 双阻带超材料滤波器的 S 参数仿真曲线Fig. 2 Simulated S -parameter curve of dual-stopband metamaterial filter

3 分析与讨论

为了进一步研究该超材料滤波器的传输特性和极化行为,分别对具有不同极化角度 φ 的垂直入射电磁波的传输特性进行仿真,结果如图 3 所示。由图 3 可知,由于该滤波器的谐振结构单元具有良好的对称性,因此对入射电磁波的极化不敏感。仿真曲线显示该滤波器的谐振频率不变,只是在相应谐振频率处的传输系数略有改变。

图 3 具有不同极化角度的垂直入射电磁波的 S 参数仿真曲线Fig. 3 Simulated S -parameter curves of vertical incident electromagnetic wave with different polarization angles

为了深入理解该超材料滤波器的传输机理,对该超材料滤波器在 0.131 THz 和 0.182 THz 谐振频率处的电场和表面电流分布进行研究。由图 4 可知,在 0.131 THz 谐振频率处,强电场主要分布在谐振结构的边缘;在 0.182 THz 谐振频率处,强电场对称分布在谐振结构的左右两边,谐振结构拐角处的电场分布更强。强电场分布对应于强的电谐振,主要反映了相邻谐振单元之间的强耦合,对于不同的谐振频率,谐振单元之间的强耦合出现在谐振结构的不同位置。图 5 所示为双阻带超材料滤波器的金属谐振单元在谐振频率为

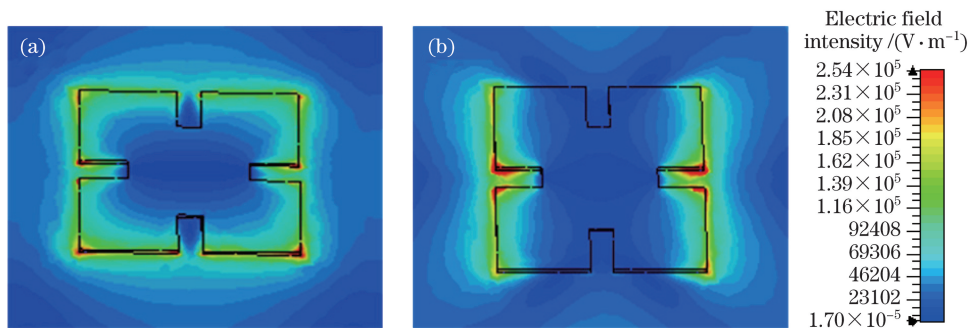


图 4 谐振单元在 (a) 0.131 THz 和 (b) 0.182 THz 谐振频率处的电场强度分布

Fig. 4 Electric field intensity distributions of resonance units at resonant frequencies of (a) 0.131 THz and (b) 0.182 THz

0.131 THz 和 0.182 THz 这 2 个谐振点处的表面电流分布(实际上表征的是磁场强度)。对于这 2 种谐振频率来说,大电流主要沿着谐振结构的左右两侧对称分布,从而形成强的电谐振。与 0.131 THz 处的电流分布相比,在 0.182 THz 处的电流分布更强,因此电谐振更强。强电谐振的存在使得当入射电磁波的频率与谐振频率相等时,几乎所有入射电磁波的能量都被用来维持结构内部电子的振荡,因此透过超材料滤波器的电磁波能量为零。相反,当入射电磁波的频率与谐振频率不相等时,几乎所有入射电磁波的能量都可以穿过滤波器。

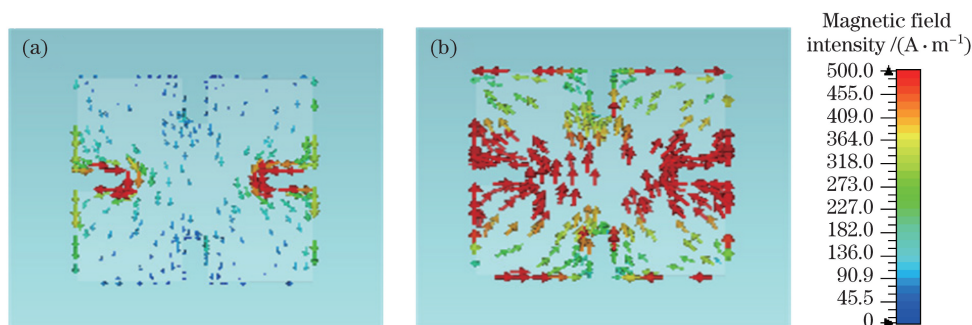


图 5 谐振单元在(a) 0.131 THz 和(b) 0.182 THz 谐振频率处的表面电流分布

Fig. 5 Surface current distributions of resonance units at resonant frequencies of (a) 0.131 THz and (b) 0.182 THz

4 样品制作和测试

为了验证所设计超材料滤波器的仿真传输特性,根据优化的物理尺寸,采用微机电系统(MEMS)微加工工艺制备超材料滤波器样品。具体制备流程如图 6 所示。

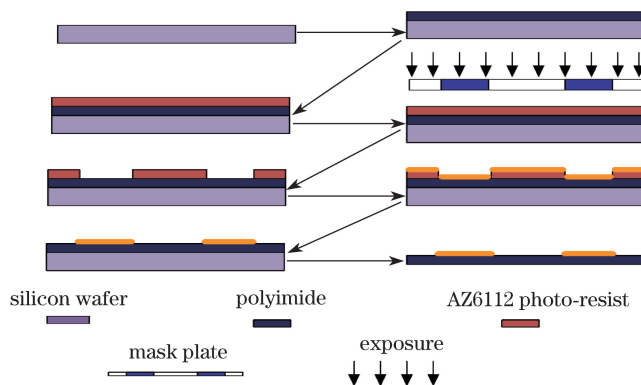


图 6 表面微加工工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of surface micro-manufacturing technology

首先,对准备好的硅基片(直径为 50.8 mm)进行表面预处理,去除硅基片表面的各种污物及水蒸气,保证硅基片表面洁净和干燥。甩胶机以 $1700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速旋转,将液态 PDMS 均匀地旋涂在硅基片表面,形成厚度为 $60 \mu\text{m}$ 的 PDMS 介质基底;然后将样品置于石英坩埚中,分别在 $80, 120, 180, 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤 2 h,待样品自然冷却至室温后就可实现 PDMS 薄膜的固化。光刻是整个样品制备的核心环节,待涂胶机以 $1200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速旋转 30 s 后,将光刻胶 AZ6112 旋涂在 PDMS 基底上,得到厚度为 $18 \mu\text{m}$ 的均匀光刻胶。由于光刻胶中含有大量的水分,可通过前烘处理去除光刻胶中的水分,增加光刻胶与基片间的黏附性。因此,将匀好胶的样品放置在水平烘台上,逐渐升温至 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,在 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘烤 2 h 后自然冷却到室温。然后使用制好的掩模板,采用接触式曝光的方式,调整曝光剂量对光刻胶进行曝光。将曝光后的样品置于水平烘台上,逐渐升温至 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,在该温度下烘烤 1 h。为了得到滤波器的主体结构,将样品放置在光刻胶显影液中显影 30 s,然后在去离子水中浸泡一段时间,以去除残留的显影液,然后将样品吹干。光刻后,样品表面的光刻胶显示出所需要的结构图形,再采用纯度为 99% 的金靶在氩气环境中进行溅射,通过控制溅射功率、氩气

分压、溅射时间可以准确控制金薄膜的厚度。然后将样品放置在丙酮溶液中浸泡 1 min, 超声清洗后再用酒精和去离子水去除样品上残余的丙酮溶液, 防止其腐蚀金属图形。最后, 将制备的样品在氢氟酸溶液中浸泡 30 min, 将超材料滤波器结构从硅基片上小心地剥离下来, 至此, 双阻带超材料滤波器制备完成。制得的滤波器样品如图 7 所示。

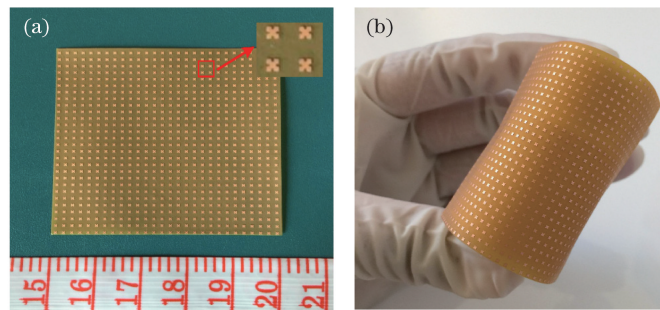


图 7 双阻带太赫兹超材料滤波器样品。(a)展平实物图;(b)柔性弯曲实物图

Fig. 7 Dual-stopband terahertz metamaterial filter sample. (a) Practical flattening picture;
(b) practical flexible bending picture

为了验证仿真结果的正确性及滤波器结构制备的准确性, 采用 THz-TDS 系统对制得的超材料滤波器样品的传输特性进行测试。在测试过程中, 一部分入射电磁波能量穿过滤器后继续传输, 另一部分能量则用来维持内部的电子运动进而被吸收。电磁波垂直入射到超材料滤波器表面时, 仿真和测试得到的传输特性的比较如图 8 所示。由图 8 可知: 制备的超材料滤波器样品是一个典型的双阻带滤波器, 2 个阻带的 3 dB 带宽分别为 18 GHz 和 11 GHz, 中心频率为 0.124 THz 和 0.174 THz; 在 0.124 THz 和 0.174 THz 处, 测量得到的传输系数 S_{21} 只能达到 -23.12 dB 和 -17.34 dB。仿真结果(谐振频率、带宽和传输系数)与测试结果之间存在较明显的差异, 这些差别主要由以下原因引起: 1) 磁控溅射的金薄膜长期暴露在空气中导致部分被氧化; 2) 磁控溅射时溅射的薄膜厚度与仿真的薄膜厚度之间存在误差; 3) 制作过程中的操作精确性导致样品尺寸不准确; 4) 测量设备本身存在误差。

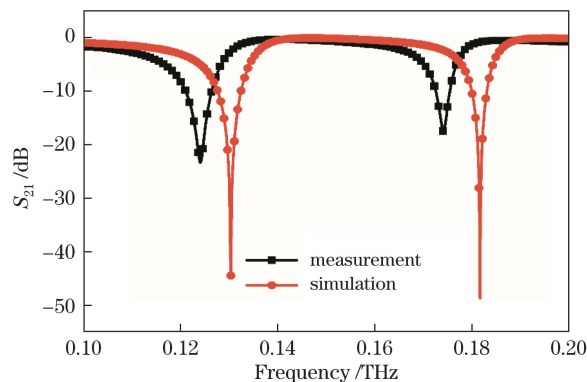


图 8 仿真与测试得到的双阻带太赫兹超材料滤波器的传输特性

Fig. 8 Simulated and measured transmission performance of dual-stopband terahertz metamaterial filter

5 结 论

基于单层超材料结构提出了一种双阻带太赫兹滤波器, 该滤波器由柔性的 PDMS 介质基底和位于顶层的对称金属谐振结构阵列构成。仿真结果显示, 该滤波器是一个典型的双阻带滤波器, 具有 2 个 3 dB 带宽分别为 15 GHz 和 10 GHz 的阻带, 中心频率为 0.131 THz 和 0.182 THz。在 2 个谐振点处, 其传输系数 S_{21} 可以达到 -43.56 dB 和 -48.76 dB, 表现出了良好的阻带特性。谐振结构的对称性使得滤波器的传输特性对入射电磁波的极化角度不敏感。对于不同的谐振频率, 该滤波器的电场强度分布和表面电流分布不同。当入射电磁波的频率与谐振频率相等时, 几乎所有的入射电磁波的能量都被用来维持结构内部电子的振荡,

因此透过超材料滤波器的电磁波能量为零;当入射电磁波的频率与谐振频率不相等时,几乎所有入射电磁波的能量都可以穿过滤波器。为了进一步验证仿真结果,采用 MEMS 微加工工艺制备了超材料滤波器样品,并采用 THz-TDS 系统对该滤波器的电磁波传输特性进行测试。在考虑了样品制备和测试过程中存在的不确定因素和误差后,认为测试特性与仿真特性比较符合。基于单层超材料结构和对称的简单金属谐振单元阵列实现了太赫兹双阻带滤波器,其仿真和制作都比较容易。此外,该超材料滤波器采用的 PDMS 柔性基底具有良好的柔韧性,可以充分地圆柱、圆锥和球面等非平面结构实现共形,极大地扩展了该超材料滤波器的应用范围。

参 考 文 献

- [1] Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.
刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.
- [2] Shur M. Terahertz technology: devices and applications[C]. Solid-State Device Research Conference, 2005: 13-21.
- [3] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D, 2006, 39(17): R301-R310.
- [4] Lange A. Cosmic background and space science at THz frequencies[C]. 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Pasadena, 2008: 10384168.
- [5] Fitzgerald A J, Wallace V P, Jimenezlinan M, *et al.* Terahertz pulsed imaging of human breast tumors[J]. Radiology, 2006, 239(2): 533-540.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [7] Ramm A G. Does negative refraction make a perfect lens?[J]. Physics Letters A, 2008, 372(43): 6518-6520.
- [8] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect[J]. Science, 2003, 302(5650): 1537-1539.
- [9] Aydin K, Bulu I, Ozbay E. Subwavelength resolution with a negative-index metamaterial superlens[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(25): 254102.
- [10] Wang J L, Zhang B Z, Wang X, *et al.* Flexible dual-band band-stop metamaterials filter for the terahertz region[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(5): 1656-1665.
- [11] Xing Wei, Yan Fengping, Tan Siyu, *et al.* Simulation analysis on the designing of high-Q terahertz metamaterials[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0106005.
邢维, 延凤平, 谭思宇, 等. 高品质因数太赫兹超材料设计的仿真分析[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0106005.
- [12] Peng L, Chen P W, Wu A T, *et al.* Efficient radiation by electrically small antennas made of coupled split-ring resonators[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33501.
- [13] Wang X, Zhang B Z, Wang W J, *et al.* Design and characterization of an ultrabroad band metamaterial microwave absorber[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-13.
- [14] Zhang Jianna, Zhang Bo, Shen Jingling. Absorption modulation method of terahertz metamaterial[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110002.
张建娜, 张波, 沈京玲. 太赫兹超材料的吸收调制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110002.
- [15] Lee J W, Seo M A, Kang D H, *et al.* Terahertz electromagnetic wave transmission through random arrays of single rectangular holes and slits in thin metallic sheets[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(13): 137401.
- [16] Dickie R, Cahill R, Fusco V, *et al.* THz frequency selective surface filters for earth observation remote sensing instruments[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(2): 450-461.
- [17] Wang L, Geng Z X, He X J, *et al.* Realization of band-pass and low-pass filters on a single chip in terahertz regime[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(1): 33-35.
- [18] Li Z Y, Ding Y J. Terahertz broadband-stop filters[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(1): 8500705.
- [19] Zhang X Q, Gu J Q, Cao W, *et al.* Bilayer-fish-scale ultrabroad terahertz bandpass filter[J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 906-908.
- [20] Chen S Q, Cheng H, Yang H F, *et al.* Polarization insensitive and omnidirectional broadband near perfect planar metamaterial absorber in the near infrared regime[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(25): 253104.

- [21] Ahn J H, Je J H. Stretchable electronics: materials, architectures and integrations[J]. Journal of Physics D, 2012, 45(10): 103001.
- [22] Ahn B D, Jeon H J, Sheng J, *et al.* A review on the recent developments of solution processes for oxide thin film transistors[J]. Semiconductor Science and Technology, 2015, 30(6): 064001.
- [23] Feng Xue, Lu Bingwei, Wu Jian, *et al.* Review on stretchable and flexible inorganic electronics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014201.
冯雪, 陆炳卫, 吴坚, 等. 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014201.
- [24] Liu Xu, Lü Yanjun, Wang Longfei, *et al.* Research progress of stretchable and flexible electronic technology[J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(3): 161-166.
刘旭, 吕延军, 王龙飞, 等. 可延展柔性电子技术研究进展[J]. 半导体技术, 2015, 40(3): 161-166.