

# 飞秒激光微加工制备无衬底太赫兹带通滤波器

高炳攀, 林炎章, 陈盈, 陈燕青, 王向峰

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 利用时域有限差分法, 仿真设计了三组具有不同中心频率的十字形太赫兹带通滤波器, 并搭建了飞秒激光微加工系统, 在单层铝箔上实现了无衬底太赫兹滤波器的加工。利用时域太赫兹光谱系统, 对所加工的器件进行了透射率测试, 实验和仿真结果高度吻合, 所加工的太赫兹滤波器中心频率处的透射率为 85% 以上, 达到商业化太赫兹滤波器水平。

**关键词** 激光技术; 飞秒激光微加工; 带通滤波器; 太赫兹; 时域有限差分法

中图分类号 TN629.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021415

## Substrateless Terahertz Band-Pass Filters Fabricated by Femtosecond Laser Micro-Machining

Gao Bingpan, Lin Yanzhang, Chen Ying, Chen Yanqing, Wang Xiangfeng

School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** Three groups of cross-shaped terahertz band-pass filters with different central frequencies are designed by using the finite difference time domain method. A femtosecond laser micro-machining system is built and the substrateless terahertz filter on a single-layered aluminum foil is fabricated. The transmissivities of these band-pass filters are tested by using the time-domain terahertz spectroscopy system. The experimental results are in a good agreement with the simulated results. All the transmissivities at central frequencies of these filters are over 85%, which reaches the commercial level of terahertz filters.

**Key words** laser technique; femtosecond laser micro-machining; band-pass filter; terahertz; finite difference time domain method

**OCIS codes** 140.3390; 230.4000; 220.4000; 220.4830

## 1 引言

太赫兹 (THz) 辐射通常指的是频率为 0.1 ~ 10.0 THz 电磁波辐射, 其具有不同于微波、红外和 X 射线等电磁波的特点, 如高透射性、低能量、高分辨率等。太赫兹波在生物传感<sup>[1]</sup>、物体成像<sup>[2]</sup>、卫星通信<sup>[3]</sup>、雷达探测<sup>[4]</sup> 等领域具有重要的研究价值。有效地调控太赫兹波是实现太赫兹技术广泛应用的前提, 因此, 对太赫兹系统中的功能器件如太赫兹波导、偏振器、调制器、天线、开关、带阻带通滤波器等的研究显得尤为重要<sup>[5-6]</sup>。具有优良性能的太赫兹

带通滤波器在太赫兹雷达和通信应用中有着重要的作用, 一直是研究热点之一<sup>[7]</sup>。

频率选择表面 (FSS) 是由介质表面上呈周期排布的金属贴片单元或孔单元组成的二维周期性结构<sup>[8]</sup>。这种结构可根据排列方式、单元结构的不同, 对电磁波表现出带通、带阻、高通或低通的特性。2011 年, Bergmair 等<sup>[9]</sup> 采用纳米压印光刻技术制备了矩形、十字等单元结构的超材料, 该材料对特定频段的 THz 信号具有频率选择特性。2012 年, Das 等<sup>[10]</sup> 通过在铝膜上加工环形槽结构, 制备了一种基于圆环型 FSS, 可应用于太赫兹通信系统的滤波器。

收稿日期: 2017-09-01; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 福建省自然科学基金 (2015J01246)

作者简介: 高炳攀 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光微加工方面的研究。E-mail: bpgao@qq.com

导师简介: 王向峰 (1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学及太赫兹方面的研究。

E-mail: xfwang@fzu.edu.cn (通信联系人)

2013年, Li等<sup>[11]</sup>运用柔性电子制造技术和标准光刻技术制备了可调谐超材料。王文涛等<sup>[12]</sup>利用时域有限差分(FDTD)法,设计并制备了基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器,并进行了透射性能测试,实验与仿真结果基本符合。2017年, Ebrahimi等<sup>[13]</sup>采用多层均胶单次紫外曝光工艺,设计制备了太赫兹波段的矩形波导滤波器。Zhang等<sup>[14]</sup>设计了太赫兹波段的金属矩形孔高通滤波器。目前,太赫兹波段的滤波器制备通常基于半导体光刻工艺<sup>[15]</sup>。这种方法工艺复杂,需要制备相应的掩模板和介质基底,制备周期较长,对准精度要求高,成本高昂,不利于多样化快速制备滤波器,因此寻求一种流程简洁、制备快速、成本相对较低的微加工方法具有重要意义<sup>[16]</sup>。

飞秒激光加工具有脉冲宽度小、峰值功率高、热影响区小的特点,属于冷加工,可以在各种材料表面或内部实现突破衍射极限和复杂结构的加工,符合太赫兹滤波器件精密加工的要求<sup>[17]</sup>。

本文基于飞秒激光微加工系统和FDTD法仿真,在铝箔上设计并制备了基于FSS的太赫兹滤波器,利用时域太赫兹光谱(TDTS)系统对滤波器频率响应进行测量。三组不同结构参数的十字型太赫兹滤波器的中心频率处的透射率均达到了85%以上,显示了良好的滤波性能。采用无衬底设计的滤

波器能够避免衬底引起的吸收损耗以及两表面之间产生的谐振对滤波器性能的影响。

## 2 基本原理

### 2.1 飞秒激光微加工系统

图1所示为飞秒激光微加工系统示意图,加工系统采用飞秒激光器,波长为800 nm,重复频率为1 kHz,脉冲宽度为45 fs。系统通过光阑调节激光光斑大小,使用半波片和格兰棱镜组合实现对激光能量的调节,激光的通断由计算机控制的电子快门实现。光束通过快门后经过若干反射镜垂直入射到聚焦透镜上,通过调整透镜与样品的距离,使激光的焦点位于待加工样品表面。待加工样品放置在一个二维移动平台上,加工控制软件用LabVIEW软件编写,移动平台由运动控制卡、驱动器、步进电机和线性滑台组成。为了避免快门动作延时造成加工路径与非加工路径衔接的位置出现曝光不足或过度的情况,在软件中设计了快门延时调节。同时,为了保证激光焦点对准加工位置,引入电荷耦合器件(CCD)成像模块,当加工表面位于焦点位置时,通过二向色镜的同轴自然光源被样品表面反射后在CCD上成像,可以清晰地观测到加工表面的形貌特征。加工系统能够导出、导入加工数据,方便对加工参数进行记录和分析。

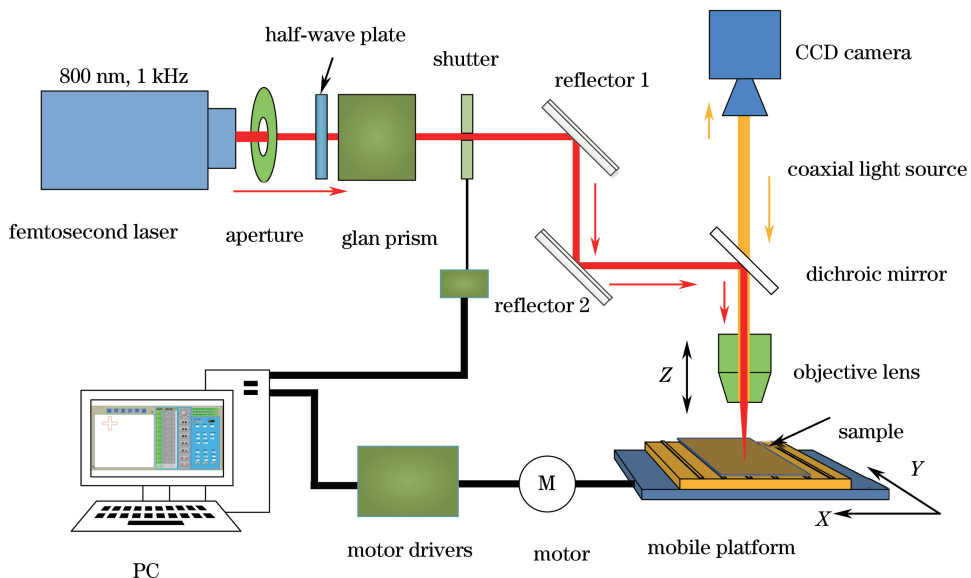


图1 飞秒激光微加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser micro-machining system

### 2.2 样品制备

将裁剪好的铝箔用乙醇、乙醇去离子水擦拭并

晾干,然后将铝箔平整地粘贴在样品保持架上,如图2所示。

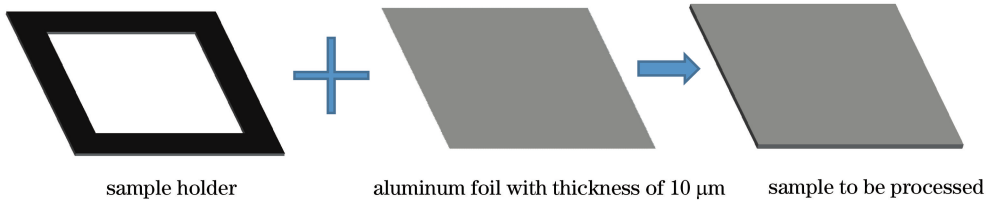


图2 样品准备

Fig. 2 Sample preparation

将准备好的铝箔样品固定在移动平台上,利用 CCD 相机调整样品位置,然后在软件前面板进行轨迹规划和快门状态设定,设置好具体加工参数(移动平台扫描速度、加速度、快门延时、阵列数目及单元周期等)。采用厚度为  $10\ \mu\text{m}$  的铝箔作为加工对象,加工过程中用压缩氮气清洁残渣并冷却材料。对于加工系统而言,可调节的加工参数主要为激光脉冲能量、平台扫描速度以及快门操作延时补偿。经过大量加工实验,最终选用的优化加工参数为:激光波长  $800\ \text{nm}$ ,脉宽  $45\ \text{fs}$ ,重复频率  $1\ \text{kHz}$ ,脉冲能量  $10\ \mu\text{J}$ ,平台扫描速度  $0.5\ \text{mm/s}$ ,快门操作补偿时间  $20\ \text{ms}$ 。影响 FSS 性能的因素主要有单元结构的类型、单元的结构参数、单元周期排布形式、材料参数等,需要考虑各参数的影响进行综合设计<sup>[7]</sup>。选取常用的十字型单元结构,利用 FDTD 设计了三组 FSS 滤波器,其结构及排布形式如图 3 所示,其中  $W$  为臂宽, $L$  为臂长, $P$  为周期。经过参数优化,三组十字型 FSS 滤波器样品的主要结构参数分别为:样品 1,  $W=45\ \mu\text{m}$ ,  $L=285\ \mu\text{m}$ ,  $P=400\ \mu\text{m}$ ; 样品 2,  $W=60\ \mu\text{m}$ ,  $L=400\ \mu\text{m}$ ,  $P=550\ \mu\text{m}$ ; 样品 3,  $W=90\ \mu\text{m}$ ,  $L=450\ \mu\text{m}$ ,  $P=700\ \mu\text{m}$ 。样品的厚度都为  $10\ \mu\text{m}$ 。加工完成的滤波器样品 3 的实物图如图 4(a) 所示,图 4(b) 为局部显微图像,可以看出,加工出来的滤波器单元结构边缘平直,单元重复性好,加工质量好且稳定。

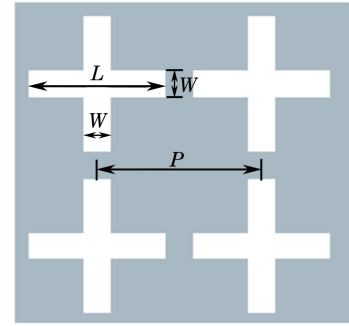


图3 单元结构示意图

Fig. 3 Schematic of unit structure

### 3 透射式太赫兹时域光谱系统

利用自主搭建的 TDTs 系统测量了上述太赫兹滤波器样品。为了降低实验环境相对湿度,向实验所用太赫兹系统与样品腔中充满氮气,以降低水分子对太赫兹辐射的吸收,环境温度为  $25\ ^\circ\text{C}$ 。实验所用的 TDTs 系统如图 5 所示。飞秒激光发射后经分光镜分为抽运光和探测光,抽运光经过透镜后聚焦在非线性晶体  $\text{ZnTe}$  上,由于光整流效应,辐射出太赫兹脉冲信号。焦点后面的硅片用于遮挡透过晶体的激光。太赫兹信号自由穿过硅片,经过两个离轴抛物面镜(OAP1 和 OAP2)传输并会聚到样品上,然后再经由两个离轴抛物面镜(OAP3 和 OAP4)被收集。同时,探测光经过移动平台的时间延迟以连续改变与抽运光之间的光程差,其中半波片用于改变探测光的偏振状态。探测光经薄膜反射

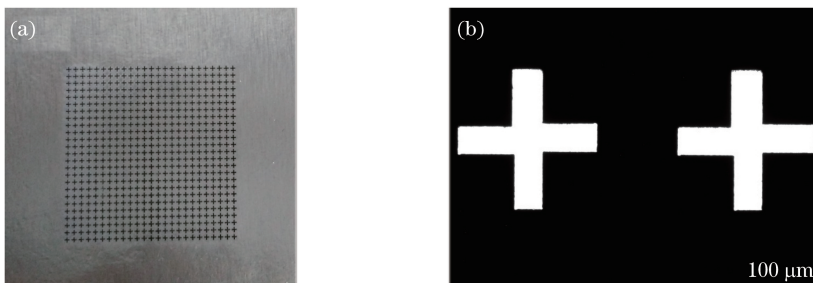


图4 FSS 滤波器样品 3。(a) 样品实物照片;(b) 样品局部显微照片

Fig. 4 Photographs of sample 3. (a) Sample picture; (b) local microscopic image of sample

镜反射后,与携带样品信息的太赫兹信号共同会聚到探测晶体 ZnTe 上。从晶体中经过的探测光被太赫兹信号调制,经过 1/4 波片(QWP)后被转换成近似圆偏振的椭圆偏振光,然后经过沃拉斯顿棱镜(WP)后形成两束偏振状态相互垂直的线偏振光,被差分探测器(BD)探测,从而获得 TDS。利用一块与样品加工区域形状、大小相同的铝箔产生的信号作为参考信号,利用 TDS 测量获得的时域参考信号和样品信号,经过快速傅里叶变换获得其频谱图,从而测得太赫兹透射率。

## 4 实验结果和讨论

采用上述 TDS 系统对制备的三组样品进行透射率测量,如图 6 所示,其中图 6(a)~(c)是参考信号(黑实线)与样品信号(红虚线)经过傅里叶变换后的电场强度图,两者的比值  $T = |E_{\text{sample}}| / |E_{\text{reference}}|$  代表电场强度透射率,功率透射率  $T_P = T^2$ ;图 6(d)~(f)为功率透射率的仿真结果(黑实线)和实验结果(红虚线)的对比。三组样品的实验结果与理论仿真结果基本符合,但中心频率处的透射率略小于理论仿真结果。可能的原因为:1) 实验误差;2) 样品表面的氧化层导致损耗增加;3) 样品表面粗糙度大,散射损失大;4) 测试环境的噪音干扰。仿真分析结果在高频部分出现次级异常透射现象,主要是由于金属中体积电子密度有纵向波动,推

测可能是 wood 异常和长程表面等离子体共同导致的结果<sup>[18]</sup>,而在实验结果中,该现象并不明显,可能是由于样品质量和实验环境导致损耗加大。总体而言,该部分的异常透射率都低于 20%,与谐振频率位置的峰值透射率相比,处于可接受范围内,从而测得太赫兹透射率。

三组滤波器样品的结构参数和滤波性能的对比如表 1 所示,其中  $F_c$  为实验测得的滤波器的中心频率, $F_c^*$  为 FDTD 理论仿真得到的中心频率, $T_P$  为实验测得的峰值功率透射率, $T_P^*$  为 FDTD 理论仿真得到的峰值功率透射率。由表 1 可知,三组滤波器的实验结果与仿真结果基本吻合,功率透射率峰值的实验结果略小于仿真结果,中心频率处的透射率高达 85%以上,带内信号的损耗较小,达到了商业化太赫兹滤波器水平。通过进一步提高加工精度和完善样品制备的流程有望获得更好的滤波效果。

表 1 三个滤波器的结构参数与主要性能参数

Table 1 Structural parameters and major performance parameters of three filters

Filter	$W / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$	$P / \mu\text{m}$	$F_c / \text{GHz}$	$F_c^* / \text{GHz}$	$T_P / \%$	$T_P^* / \%$
Sample 1	45	285	400	497	495	88	98
Sample 2	60	400	550	376	375	88	98
Sample 3	90	450	700	323	319	87	99

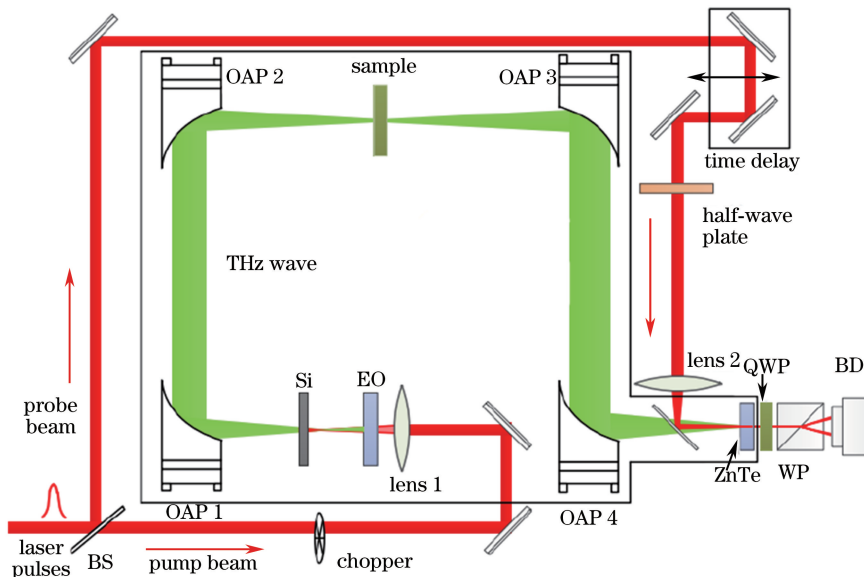


图 5 TDS 系统

Fig. 5 Time-domain terahertz spectroscopy system

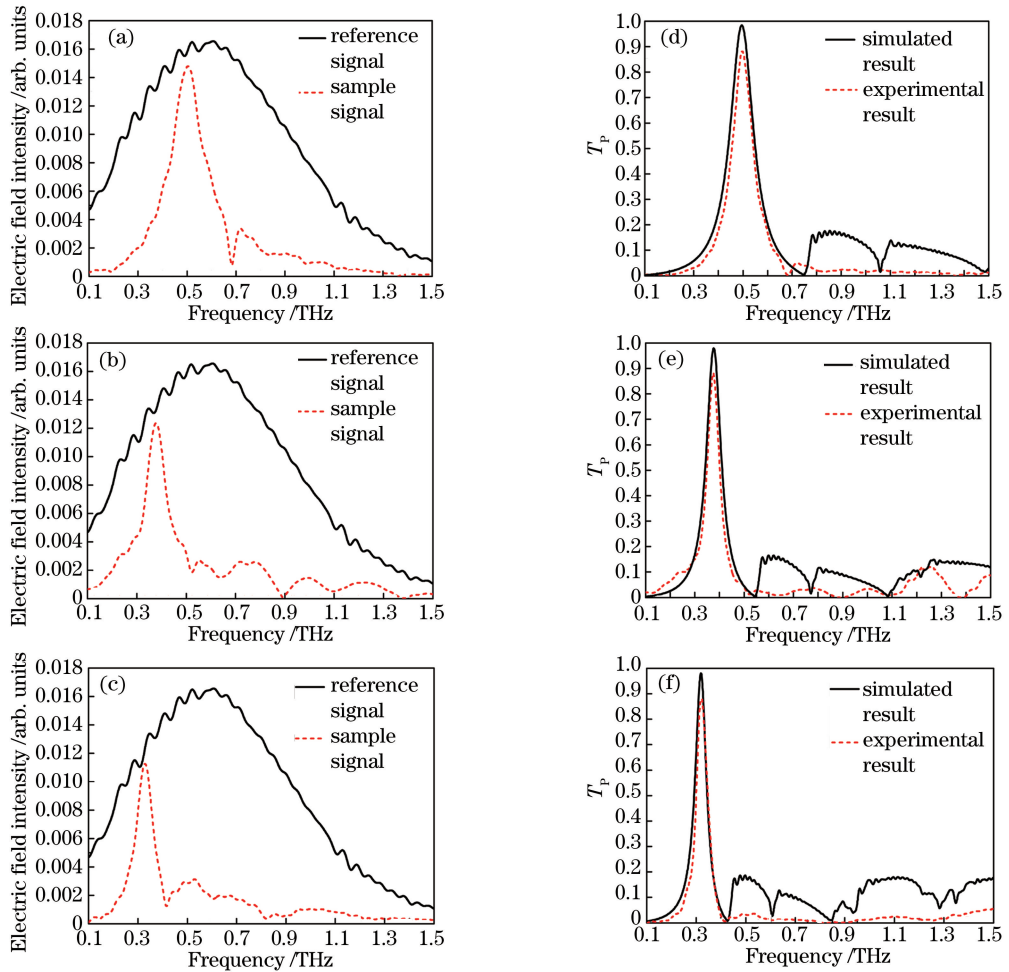


图6 三组样品的实验与仿真结果。(a)(d)样品1;(b)(e)样品2;(c)(f)样品3

Fig. 6 Experimental and simulated results from three groups of samples. (a)(d) Sample 1; (b)(e) sample 2; (c)(f) sample 3

## 5 结 论

利用飞秒激光微加工系统,在铝箔上加工了基于FSS的无衬底太赫兹滤波器。利用TDTD系统研究了太赫兹滤波器的频率响应特性。实验结果表明,滤波器中心频率处的透射率达到85%以上,与FDTD理论仿真结果高度吻合,达到商用太赫兹滤波器水平。相比于传统光刻工艺,飞秒激光微加工具有工艺简单、制备成本低的优势,在太赫兹器件制备领域具有很大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] You B, Lu J Y. Remote and *in situ* sensing products in chemical reaction using a flexible terahertz pipe waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (16): 18013-18023.
  - [2] Oh S J, Kim S H, Jeong K, *et al.* Measurement depth enhancement in terahertz imaging of biological tissues [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21299-21305.
  - [3] Jia S, Yu X B, Hu H, *et al.* THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (21): 23777-23783.
  - [4] Yang Q, Deng B, Wang H Q, *et al.* Experimental research on imaging of precession targets with THz radar [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(25): 2059-2061.
  - [5] Li W, Kuang D F, Fan F, *et al.* Subwavelength B-shaped metallic hole array terahertz filter with InSb bar as thermally tunable structure [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7098-7102.
  - [6] Kim S H, Lee E S, Ji Y B, *et al.* Improvement of THz coupling using a tapered parallel-plate waveguide [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1289-1295.
  - [7] Xue C M, Liu J S, Zheng Z, *et al.* Terahertz filters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 43-49.
- 薛超敏, 刘建胜, 郑铮, 等. 太赫兹滤波器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 43-49.

- [8] Munk B A. Frequency selective surfaces: Theory and design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000: 1-2.
- [9] Bergmair I, Dastmalchi B, Bergmair M, *et al.* Single and multilayer metamaterials fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(32): 325301.
- [10] Das S, Reza K M, Habib M A. Frequency selective surface based bandpass filter for THz communication system [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(11): 1163-1169.
- [11] Li J, Shah C M, Withayachumnankul W, *et al.* Mechanically tunable terahertz metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12): 121101.
- [12] Wang W T, Liu J J, Hong Z. 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.
- [13] Ebrahimi A, Nirantar S, Withayachumnankul W, *et al.* Second-order terahertz bandpass frequency selective surface with miniaturized elements [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(5): 761-769.
- [14] Zhang X Q, Zhao G Z, Wang J. High pass filter based on metallic rectangular holes in terahertz frequency range [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 082302.  
张新群, 赵国忠, 王佳. 太赫兹波段金属矩形孔高通滤波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 082302.
- [15] Nan X L, Zhang B Z, Cui J L, *et al.* Facile design and rapid fabrication of a nearly-square ridge filter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(1): 30-34.  
南雪莉, 张斌珍, 崔建利, 等. 一种近方脊滤波器的设计与快速制造[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(1): 30-34.
- [16] Walia S, Shah C M, Gutruf P, *et al.* Flexible metasurfaces and metamaterials: A review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(1): 011303.
- [17] Cao X W, Zhang L, Yu Y S, *et al.* Application of micro-optical components fabricated with femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102004.  
曹小文, 张雷, 于永森, 等. 飞秒激光制备微光学元件及其应用[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102004.
- [18] Kuznetsov S A, Navarro-Cía M, Kubarev V V, *et al.* Regular and anomalous extraordinary optical transmission at the THz-gap [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11730-11738.