

# 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片

陈燕青<sup>\*\*</sup>, 高炳攀, 林炎章, 居学尉, 王杰, 王向峰<sup>\*</sup>

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 基于时域有限差分(FDTD)法,对金属线栅结构的太赫兹(THz)偏振特性进行了仿真分析,研究了占空比和金属层厚度对偏振特性的影响,发现随着厚度的增加,0.1~10 THz 范围内出现了周期性高透射现象。基于飞秒激光微加工技术制备了周期性金属线栅太赫兹偏振片,利用时域太赫兹光谱系统进行了实验测试,实验结果与仿真结果相吻合,偏振片的消光比在 40 dB~45 dB 范围内,偏振度为 1,显示了良好的偏振特性。

**关键词** 激光技术; 太赫兹(THz); 偏振片; 飞秒激光微加工; 时域有限差分(FDTD)法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0802005

## Metal Wire Grid Terahertz Polarizer Fabricated by Femtosecond Laser Micro-Machining

Chen Yanqing<sup>\*\*</sup>, Gao Bingpan, Lin Yanzhang, Ju Xuewei, Wang Jie, Wang Xiangfeng<sup>\*</sup>

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

**Abstract** Based on the finite-difference time-domain (FDTD) method, the terahertz (THz) polarization characteristics of a metal wire grid structure are simulated and analyzed. The influences of duty ratio and metal layer thickness on the polarization characteristics are investigated. It is found that the periodic high transmission phenomenon in the range of 0.1-10 THz occurs with the increase of the metal layer thickness. The metal wire grid THz polarizer is fabricated by the femtosecond laser micro-machining technique, which is tested by the time-domain terahertz spectroscopy system. The experimental results are consistent with the simulation ones. The extinction ratio of the polarizer is in the range of 40 dB-45 dB and the polarization degree is 1, which indicates that the polarizer possesses a good polarization characteristic.

**Key words** laser technique; terahertz; polarizer; femtosecond laser micro-machining; finite-difference time-domain (FDTD) method

**OCIS codes** 140.3390; 260.5430; 300.6495; 350.3390

## 1 引 言

太赫兹(THz)波一般是指频率为 0.1~10 THz 的电磁波,在生物传感、卫星通信、军用雷达、物体成像、环境监测、医疗诊断等方面具有重要的研究价值<sup>[1-6]</sup>。有效控制 and 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具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

目前应用于太赫兹波段的偏振片主要有三种:液晶偏振片、金属线栅型偏振片和碳纳米管偏振片。

液晶偏振片主要是指在外电场作用下向列相结构分子有序排列的偏振片<sup>[9-10]</sup>,这种偏振片的插入损耗通常比较大。金属线栅型偏振片主要可以通过精密的机械加工、激光直写技术、光刻等加工方式获得<sup>[11-14]</sup>,是目前应用最为广泛的太赫兹偏振片。金属线栅型偏振片具有高透射率、高消光比及高偏振度等优点<sup>[15]</sup>,但机械加工制备的偏振片没有衬底支持,偏振片容易被损坏,且机械加工过程长,价格昂贵。激光直写技术<sup>[16]</sup>和光刻工艺<sup>[17-18]</sup>的加工步骤繁琐,且会引入插入损耗和法布里-珀罗多重反射。Ren 等<sup>[19-20]</sup>研制出碳纳米管偏振片,但存在质量不

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-03-20; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 福建省自然科学基金(2015J01245)、国家自然科学基金(51675103)

\* E-mail: xfwang@fzu.edu.cn; \*\* E-mail: 376076739@qq.com

稳定以及低消光比等问题。Zubair 等<sup>[21]</sup> 基于多壁碳纳米管纤维,通过手工缠绕制成多壁碳纳米管太赫兹偏振片。Kyoung 等<sup>[22]</sup> 用催化化学气相沉积法制成多层碳纳米管墙太赫兹偏振片,但目前该方法仍处于研究阶段。因此,寻求一种流程简洁、成本较低、产品性能稳定的太赫兹偏振片制备方案对高性能太赫兹偏振片的研究具有重要的意义。

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突破衍射极限,实现复杂结构的加工,是一种无接触、高精度的微纳器件的加工方法,符合太赫兹器件精密加工的要求。王文涛等<sup>[16]</sup> 利用飞秒激光诱导和化学镀铜方法制备了太赫兹偏振器和滤波器。Komlenok 等<sup>[23]</sup> 利用飞秒激光烧蚀制备了太赫兹波段的菲涅耳透镜。林炎章等<sup>[24]</sup> 利用飞秒激光制备了太赫兹双层带通滤波器等。与其他加工方法相比,飞秒激光微加工具有开发周期短、精度高、成本低等特点。

本文采用时域有限差分(FDTD)法仿真设计了线栅型太赫兹偏振片,利用飞秒激光微加工技术在以特氟龙(Teflon)为基底的金属铝箔上加工了周期性的金属线栅型偏振片,并利用时域太赫兹光谱对样品进行了表征,实验结果与模拟结果相吻合。在 0.2~1.6 THz 范围内,偏振片的偏振度达到 1,消光比为 40 dB~45 dB,制备的偏振片性能参数达到商用太赫兹偏振片的水准。

## 2 仿真分析

图 1(a)、(b)所示分别为 FDTD 仿真模型和太赫兹偏振片结构示意图,其中  $d$  为金属线宽度,  $T$  为周期,  $\theta$  为金属线栅轴线与太赫兹偏振方向的夹角(简称偏振片旋转角度)。由于铝箔成本低廉,且

导电性良好,太赫兹偏振片的模拟和制备均使用铝箔。基于 Maxwell 方程组,在时间域和空间域上进行离散差分,计算出各个时刻空间电磁场的分布。仿真时,截取其中一个单元,如图 1(a)所示,在 FDTD 仿真中  $X$ 、 $Y$  方向上的边界条件选择周期性边界条件(PBC),  $Z$  方向的边界条件选择完美匹配层(PML),太赫兹波垂直入射到金属铝箔表面,波源如图 1(a)中波端口所示,监视器在铝箔另一面探测透射信号,通过改变光源偏振角度,可以对偏振片的偏振特性进行模拟。在太赫兹波长远大于金属线栅周期的前提下,偏振片的偏振特性主要受到金属占空比  $K(K=d/T)$  和金属厚度  $H$  这两个参数的影响。偏振方向平行于线栅时( $\theta=0^\circ$ )透射率几乎为 0,改变金属占空比  $K$ ,当偏振方向垂直于线栅( $\theta=90^\circ$ )时不同占空比下偏振片的透射率如图 1(c)所示。可以看出,对于金属线栅偏振片,在同一周期内,其金属占空比越小,损耗则越低。基于实验中飞秒激光微加工系统的加工精度,太赫兹偏振片选用的结构参数如下:金属线宽为 20  $\mu\text{m}$ ,周期为 30  $\mu\text{m}$ ,占空比为 0.667。为了研究铝箔厚度  $H$  对太赫兹偏振片偏振特性的影响,对金属铝箔的厚度进行参数化扫描分析,研究不同金属层厚度的太赫兹偏振片在 0.1~10 THz 范围内的透射率情况,其结果如图 2(a)所示,其中太赫兹波偏振方向与金属线栅的夹角  $\theta=90^\circ$ 。可以看到,当  $H$  小于 3  $\mu\text{m}$  时,偏振片在低频(小于 4 THz)展现良好的透射特性(透射率大于 0.6),随着频率的升高,透射率逐渐变小。随着铝箔厚度的增加,低频高透射区逐渐减小,高频区出现越来越多的条纹状高透射区域(红色)。图 2(b)所示为  $H=40 \mu\text{m}$  时偏振片的透射率曲线,可以看出 0.1~10 THz 频率范围内透射率曲线出现明显的周期性震荡峰,对应图 2(a)中出现的条纹。

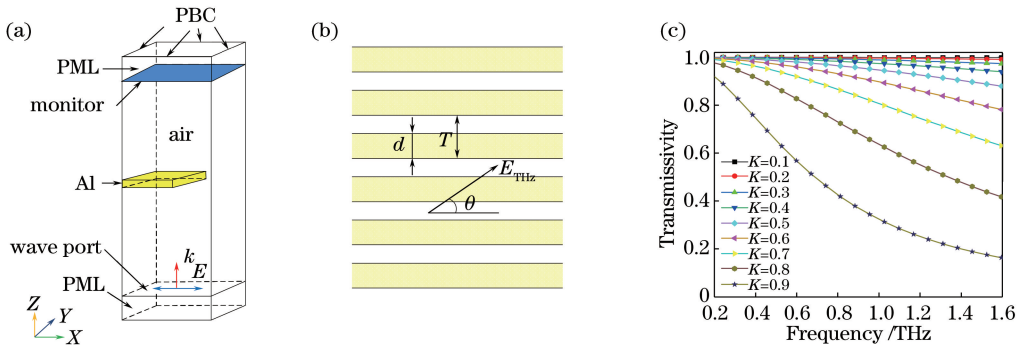


图 1 示意图和结果。(a) FDTD 仿真模型;(b)太赫兹偏振片结构;(c)占空比( $K=d/T$ )对太赫兹偏振片透射率的影响  
Fig. 1 Schematic and results. (a) FDTD simulation model; (b) structure of terahertz polarizer; (c) influence of duty ratio ( $K=d/T$ ) on transmissivity of terahertz polarizer

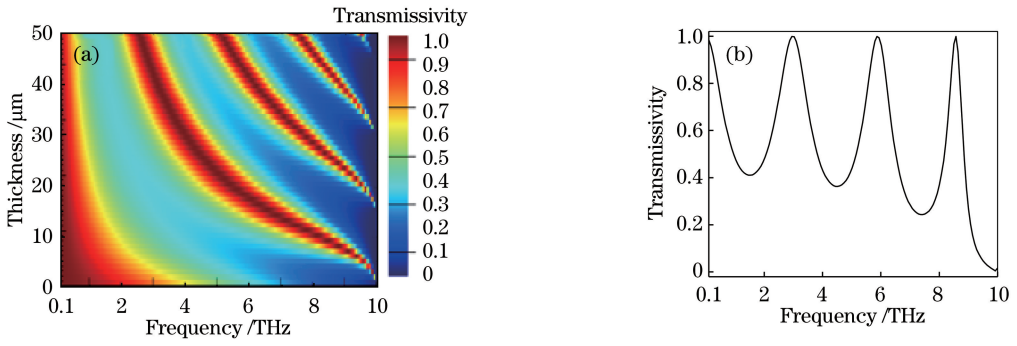


图 2 太赫兹偏振片的透射率。(a)铝箔厚度对太赫兹偏振片透射率的影响;(b)  $H=40\ \mu\text{m}$  时偏振片的透射率

Fig. 2 Transmissivity of terahertz polarizer. (a) Influence of aluminum foil thickness on transmissivity of terahertz polarizer; (b) transmissivity of polarizer when  $H=40\ \mu\text{m}$

为了进一步研究厚度对偏振片性能的影响,当频率为 7 THz,金属层厚度  $H$  分别为 10, 20, 30, 40, 50  $\mu\text{m}$  时,线栅狭缝内的电场强度分布如图 3 所示。可以看出,随着厚度的增加,线栅狭缝中出现了周期性高电场横条纹,且厚度越大,条纹越多,这是

由于金属铝箔上下表面的表面等离子体激元(SPPs)在狭缝内发生了共振耦合<sup>[25-27]</sup>。铝箔厚度越大,相干长度越长,形成的强电场相干条纹越多。为了避免这种条纹状结构,选用厚度为 10  $\mu\text{m}$  的金属铝箔进行太赫兹偏振片的制备。

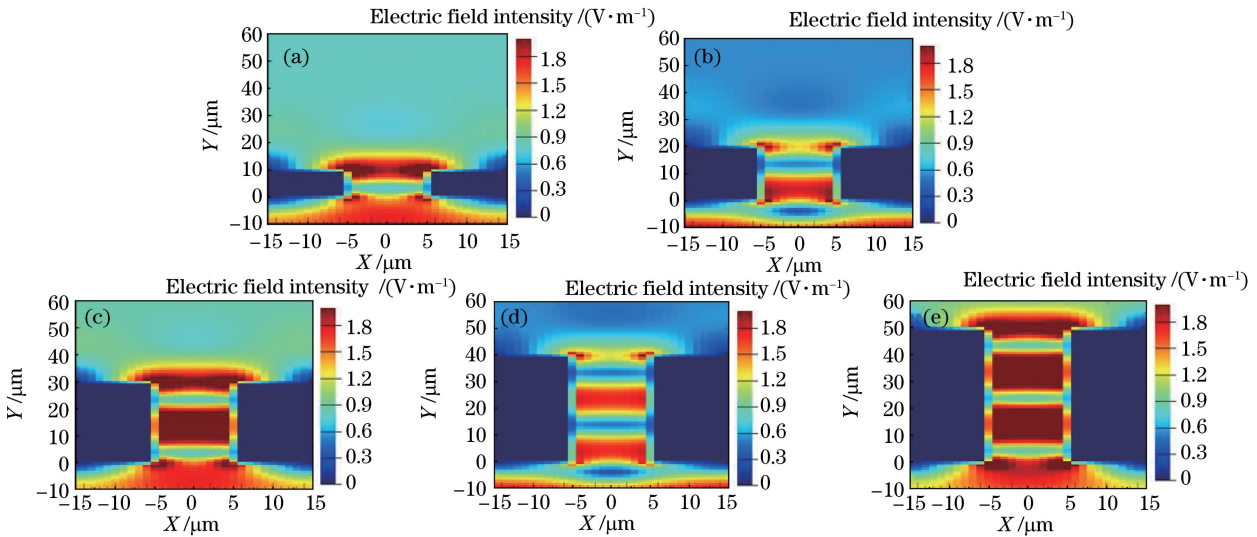


图 3 不同铝箔厚度下太赫兹偏振片线栅内的电场强度分布图。(a) 10  $\mu\text{m}$ ; (b) 20  $\mu\text{m}$ ; (c) 30  $\mu\text{m}$ ; (d) 40  $\mu\text{m}$ ; (e) 50  $\mu\text{m}$

Fig. 3 Electric field distributions in wire grids of terahertz polarizer under different aluminum foil thicknesses.

(a) 10  $\mu\text{m}$ ; (b) 20  $\mu\text{m}$ ; (c) 30  $\mu\text{m}$ ; (d) 40  $\mu\text{m}$ ; (e) 50  $\mu\text{m}$

### 3 样品制备

将厚度为 10  $\mu\text{m}$  的铝箔平整贴敷在 Teflon(厚度为 3 mm)衬底表面,然后将样品固定在移动平台上。所采用的飞秒激光微加工系统由飞秒激光器(脉宽为 45 fs,波长为 800 nm,重复频率为 1 kHz)、光阑、二分之一波片、格兰棱镜、快门、电荷耦合器件(CCD)相机、移动平台等组成<sup>[28]</sup>。移动平台和电子快门的联动控制通过 LabVIEW 程序实现,CCD 相

机用于样品表面形貌的特征观察和自动对焦。加工过程中选择数值孔径(NA)为 0.4、放大倍数为 20、焦距为 20 mm 的聚焦物镜;激光功率为 50 mW;样品移动速度为 500  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。加工过程中采用氮气清洁残渣并冷却材料。加工系统及方法参见文献[28],在此不再赘述。加工的太赫兹偏振片如图 4(a)所示,可以看到平行排列的金属线栅;图 4(b)所示为线栅局部结构显微图片,加工得到的线栅宽度为 20  $\mu\text{m}$ ,周期为 30  $\mu\text{m}$ ,厚度为 10  $\mu\text{m}$ 。

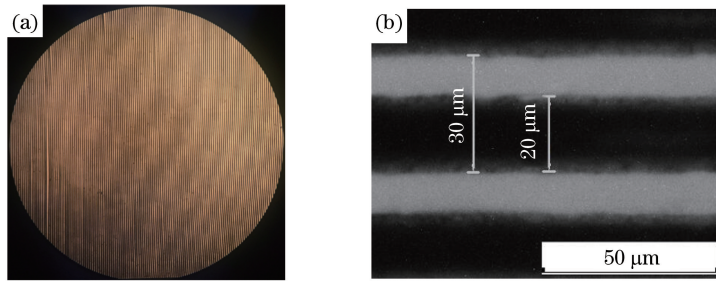


图 4 以 Teflon 为基底的太赫兹偏振片。(a)实物图;(b)光学显微镜

Fig. 4 Terahertz polarizer on Teflon substrate. (a) Physical picture; (b) optical micrograph

## 4 实验结果及讨论

将加工好的样品放置在自主搭建的太赫兹时域系统中进行测量,参考信号是没有贴敷铝箔的 Teflon 基底的太赫兹透射信号。对测量得到的时域信号进行快速傅里叶变换,获得其频谱图。实验数据与仿真结果如图 5 所示,图 5(a)所示是实验测得的偏振片在不同旋转角度下的时域波形图,图 5(b)所示是时域信号经快速傅里叶变换后的频域图。由样品信号  $E_s(f)$  与参考信号  $E_R(f)$  的电场强度的比值可以计算出功率透射率  $T_p(f) = \left[ \frac{E_s(f)}{E_R(f)} \right]^2$ , 其中  $f$  为太赫兹频率,其结果如图 5(c)

所示,图 5(d)所示是 FDTD 透射率仿真结果。从图 5(c)、(d)可以看出,实验测得的透射率略低于仿真结果,这是由于仿真模拟结果都是在完全理想的环境下得到的,而实际上激光烧蚀的金属铝箔残留以及线栅加工质量都会影响偏振片透射率。然而,随着金属线栅与太赫兹波偏振方向夹角的变小,整个频域内的透射率也相应变小,这个结果与图 5(b)所示的理论仿真结果基本相符,显示了显著的随旋转角度调节的偏振片特性。由于激光重复加工多条线栅时,移动平台的定位误差会导致线栅宽度存在一定的波动范围,根据模拟结果[如图 1(c)所示],这将导致高频段的实验和理论透射率不一致。在低频段,实验透射率低于模拟透射率,这可能是由于样

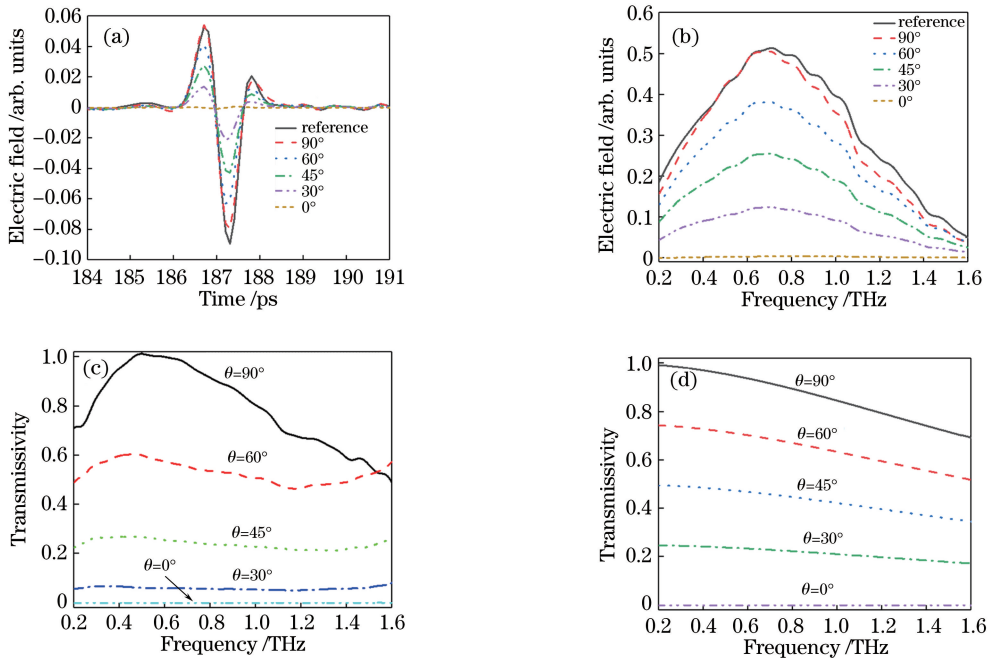
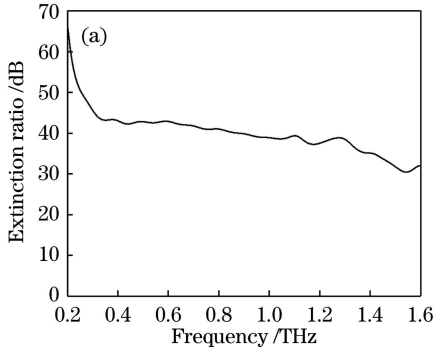


图 5 结果。(a)以 Teflon 为基底的太赫兹偏振片在不同旋转角度下的太赫兹时域信号;(b)时域信号经快速傅里叶变换后的频域波谱;(c)实验得到的太赫兹偏振片透射率;(d) FDTD 仿真得到的透射率

Fig. 5 Results. (a) Terahertz time-domain signals of terahertz polarizer on Teflon substrate under different rotation angles; (b) frequency domain spectra after fast Fourier transformation of time-domain signals; (c) transmissivity of terahertz polarizer obtained in experiment; (d) transmissivity obtained by FDTD simulation

品通光面积为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 测量过程中部分低频信号被阻挡。

根据消光比计算公式  $R_{\text{er}} = 10\lg\left(\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}}\right)$  和偏振度计算公式  $R_{\text{Dop}} = \frac{T_{\perp} - T_{\parallel}}{T_{\perp} + T_{\parallel}}$ , 计算得出该样品的消



光比和偏振度, 如图 6 所示, 其中  $T_{\perp}$ 、 $T_{\parallel}$  分别为太赫兹偏振方向与偏振片金属线栅垂直、平行时的透射率, 可以看出, 偏振片的消光比在 40 dB ~ 45 dB 范围内, 偏振度为 1, 即达到了完全线偏振, 在频率测量范围内, 效果与商业化偏振片相当。

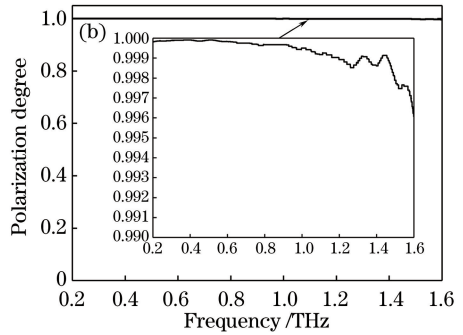


图 6 太赫兹偏振片的性能。(a)偏振片的消光比;(b)偏振片的偏振度

Fig. 6 Characteristics of terahertz polarizer. (a) Extinction ratio; (b) polarization degree

## 5 结 论

通过飞秒激光微加工技术, 在铝箔表面加工出性能优异的太赫兹偏振片, 利用时域太赫兹光谱系统测量了其频率响应特性, 结果显示, 太赫兹偏振片的性能与 FDTD 理论仿真结果基本一致, 显示了良好的偏振特性。探讨了占空比和金属层厚度对太赫兹偏振片透射信号的影响, 发现随着厚度的增加,  $0.1 \sim 10\text{ THz}$  范围内出现了周期性高透射现象, 这主要是由铝箔上下表面的表面等离子体激元在金属线栅狭缝内的共振耦合引起的, 这一现象或许可以用于制备可调多通太赫兹滤波器。

## 参 考 文 献

[1] Fischer B M, Helm H, Jepsen P U. Chemical recognition with broadband THz spectroscopy [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1592-1604.  
 [2] Liu H B, Plopper G, Earley S, *et al.* Sensing minute changes in biological cell monolayers with THz differential time-domain spectroscopy [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2007, 22(6): 1075-1080.  
 [3] Mandehgar M, Grischkowsky D. Dispersion compensation of the THz communication channels in the atmosphere [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2387-2390.  
 [4] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, *et al.* Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1016001.

王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1016001.  
 [5] Shang H Y, Huo L, Wu Y P, *et al.* Scanning frequency coherent imaging system for single polarization semiconductor optical amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1102002. 尚怀赢, 霍力, 吴远鹏, 等. 单偏振半导体光放大器扫频光相干成像系统 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102002.  
 [6] Liu Y, Zhao G Z, Shen Y C. Polarization imaging detection based on the continuous terahertz wave [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0111001. 刘影, 赵国忠, 申彦春. 连续太赫兹波偏振成像检测 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0111001.  
 [7] Piesiewicz R, Jacob M, Koch M, *et al.* Performance analysis of future multigigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(2): 421-430.  
 [8] Moallem M, Sarabandi K. Miniaturized-element frequency selective surfaces for millimeter wave to terahertz applications [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(3): 333-339.  
 [9] Lin X W. Research on liquid crystal photonic devices based on grating structure [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. 林晓雯. 结合光栅结构的液晶光子学器件研究 [D]. 南京: 南京大学, 2013.  
 [10] Zhang J, Fang Y, Wu L Y, *et al.* Liquid crystal

- beam deflection technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 325-334.
- 张健, 方运, 吴丽莹, 等. 液晶光束偏转技术 [J]. 中国激光, 2010, 37(2): 325-334.
- [11] Mao H Y, Xia L P, Rao X H, *et al.* A terahertz polarizer based on multilayer metal grating filled in polyimide film [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 8(1): 1-6.
- [12] Li F F, Li D, Shu S W, *et al.* Polarization terahertz wave transmission through wire gratings [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(6): 452-456.
- 栗芳芳, 李栋, 舒时伟, 等. 金属线栅结构中太赫兹波偏振特性的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 452-456.
- [13] Sun L, Lü Z H, Wu W, *et al.* Double-grating polarizer for terahertz radiation with high extinction ratio [J]. Applied Optics, 2010, 49(11): 2066.
- [14] Lu B, Wang H T, Shen J, *et al.* A high extinction ratio THz polarizer fabricated by double bilayer wire grid structure [J]. AIP Advances, 2016, 6(2): 1127.
- [15] Costley A E, Hursey K H, Neill G F, *et al.* Free-standing fine-wire grids: Their manufacture, performance, and use at millimeter and submillimeter wavelengths [J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(7): 979-981.
- [16] Wang W T, Liu J J, Li X J, *et al.* Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser inducing 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偏振器和滤波器 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1231002.
- [17] Chen M, Fan F, Yang L, *et al.* Mechanically tunable terahertz plasmonic waveguide filter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0411001.
- 陈猛, 范飞, 杨磊, 等. 机械可调谐太赫兹等离子体波导滤波器 [J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0411001.
- [18] Mao H Y, Xu H M, Xia L P, *et al.* A large area and low loss thin-film terahertz polarizer [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 118-122.
- 毛洪艳, 许红梅, 夏良平, 等. 大面积低损耗薄膜衬底太赫兹偏振片 [J]. 光子学报, 2015, 44(9): 118-122.
- [19] Ren L, Pint C L, Booshehri L G, *et al.* Carbon nanotube terahertz polarizer [J]. Nano Letters, 2009, 9(7): 2610-2613.
- [20] Ren L, Pint C L, Arikawa T, *et al.* Broadband terahertz polarizers with ideal performance based on aligned carbon nanotube stacks [J]. Nano Letters, 2012, 12(2): 787-790.
- [21] Zubair A, Tsentelovich D E, Young C C, *et al.* Carbon nanotube fiber terahertz polarizer [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(14): 141107.
- [22] Kyoung J, Jang E Y, Lima M D, *et al.* A reel-wound carbon nanotube polarizer for terahertz frequencies [J]. Nano Letters, 2011, 11(10): 4227-4231.
- [23] Komlenok M S, Volodkin B O, Knyazev B A, *et al.* Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation [J]. Quantum Electronics, 2015, 45(10): 933-936.
- [24] Lin Y Z, Yao H Z, Ju X W, *et al.* Free-standing double-layer terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25125-25134.
- [25] Xing Q R, Li S X, Tian Z, *et al.* Enhanced zero-order transmission of terahertz radiation pulses through very deep metallic gratings with subwavelength slits [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(4): 041107.
- [26] Babil M A, Sun X D, Huang F. Classifying the transmission resonances of a subwavelength aperture within a thin metallic film by breaking the symmetry [J]. Physics of Condensed Matter, 2012, 407(14): 2768-2772.
- [27] Popov E, Enoch S, Tayeb G, *et al.* Enhanced transmission due to nonplasmon resonances in one- and two-dimensional gratings [J]. Applied Optics, 2004, 43(5): 999-1008.
- [28] Gao B P, Lin Y Z, Chen Y, *et al.* Preparation of non-substrate THz bandpass filter by femtosecond laser micromachining [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021415.
- 高炳攀, 林炎章, 陈盈, 等. 飞秒激光微加工制备无衬底太赫兹带通滤波器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021415.