

# 表面等离子体共振耦合导致的太赫兹滤波器多带通效应

陈燕青, 王杰, 陈星辰, 钟舜聪, 王向峰\*

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 在十字型太赫兹带通滤波器的时域有限差分法仿真中,随着铝箔厚度增大,主峰变窄,且高频处出现多个异常透射峰。利用飞秒激光微加工技术制备出铝箔厚度为 150  $\mu\text{m}$  的太赫兹滤波器,并利用时域太赫兹光谱系统进行性能测试。结果表明:实验结果与时域有限差分法模拟结果基本吻合;异常透射峰源于十字结构狭缝侧壁上的表面等离子体波的法布里-珀罗共振耦合,这种耦合效应可用于控制表面等离子体波,制造新型太赫兹器件。

**关键词** 表面光学; 滤波器; 太赫兹; 表面等离子体; 飞秒激光微加工

中图分类号 TN629.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202418

## Multi-Bandpass Effect of Terahertz Filter Caused by Surface Plasmon Polariton Resonant Coupling

Chen Yanqing, Wang Jie, Chen Xingchen, Zhong Shuncong, Wang Xiangfeng\*

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

**Abstract** In the simulation of cross-type terahertz bandpass filter by using the finite-difference time-domain method, the main peaks narrow as the thickness of the Al foil increases, and several abnormal transmission peaks appear at high frequencies. A terahertz filter with Al foil thickness of 150  $\mu\text{m}$  is fabricated by femtosecond laser micro-machining; it is tested using a time-domain terahertz spectroscopy system. The results show that the experimental results are consistent with the finite-difference time-domain method simulation results. The anomalous transmission peaks result from the Fabry-Perot resonant coupling of the surface plasmon polariton waves on the sidewalls of the slits of the cross structure. This coupling effect may be useful in controlling surface plasmon polariton waves and fabricating new terahertz devices.

**Key words** optics at surfaces; filter; terahertz; surface plasmon polariton; femtosecond laser machining

**OCIS codes** 240.6680; 300.6495; 350.2450; 250.5403; 140.3390

## 1 引言

太赫兹 (THz) 一般指波段位于 0.1 THz 的毫米波与 10 THz 的远红外线之间的电磁波。太赫兹波在生物传感、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广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。太赫兹技术是未来第六代移动通信技术 (6G) 中的关键,有效地控制和调控太赫兹波是太赫兹技术实现

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)进行研究显得尤为重要<sup>[5-15]</sup>。

目前,太赫兹滤波器的制备大多采用光刻技术,这种方法需要气相成膜、旋转涂胶、前烘等多个步骤<sup>[16]</sup>,而且还要制备掩模板,从而导致样品制备周期较长,且制备成本较高。因此,寻求流程简洁、成本低且高效的方法来制备太赫兹滤波器显

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51675103)、CAD/CAM 福建省高校工程研究中心课题项目(K201708)、福州科技局项目(2018-G-35)

\* E-mail: xfwang@fzu.edu.cn

得十分有意义。随着激光技术的发展,利用超快飞秒激光直写技术在金属膜上直接加工太赫兹微结构逐渐成为可能<sup>[7-9]</sup>。相比于传统的机械加工、光刻法和化学气相沉积等微加工技术,这种无掩模的激光直写技术具有系统简单、工序少、成本低等优点,通过单一的烧蚀操作即可以完成不同微结构的高精度加工,在太赫兹器件制备中有巨大的应用潜力。

笔者课题组成员采用飞秒激光微加工技术在厚度为  $10\ \mu\text{m}$  的铝箔上加工了十字型太赫兹带通滤波器<sup>[7]</sup>,在此工作的基础上,笔者通过时域有限差分法(FDTD)仿真发现,如果改变铝箔厚度,在高频区就会出现多个异常透射峰。鉴于此,本文利用飞秒激光微加工技术在厚度为  $150\ \mu\text{m}$  的铝箔上加工样品,并利用太赫兹时域光谱系统对加工的样品进行测试验证,考察实验结果与仿真结果的吻合性;同时,还探讨了异常透射峰出现的物理机制。

## 2 基本原理

### 2.1 仿真结果

金属铝箔十字型太赫兹滤波器的单元结构示意图如图 1 所示,单元的几何参数包括结构周期  $P$ 、十字臂宽  $W$ 、十字臂长  $L$ 、铝箔厚度  $H$ 。该十字结构滤波器的中心波长  $\lambda_c$ 。可以通过经验公式  $\lambda_c = 1.8L - 1.35W + 0.2P$ <sup>[17]</sup> 来大致确定。增大臂长  $L$ ,会减小中心频率;增大臂宽  $W$ ,会增大中心频率和带宽;增大周期  $P$ ,会减小中心频率和带宽<sup>[18]</sup>;在 FDTD 模拟中, $X$ 、 $Y$  方向设置为周期性边界条件, $Z$  方向设置为完美匹配层。铝材料参数采用 Drude 模型,等离子体频率为  $2.24 \times 10^{18}\ \text{rad/s}$ ,阻尼系数为  $1.12 \times 10^{14}\ \text{rad/s}$ <sup>[19]</sup>。太赫兹波的偏振沿  $X$  方向,太赫兹波垂直入射到金属铝箔表面,在金属铝箔

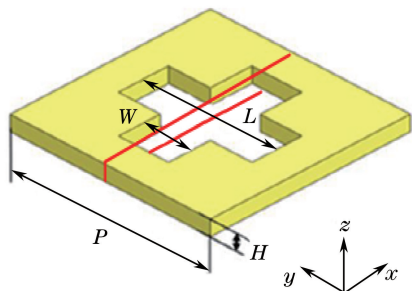


图 1 十字型太赫兹滤波器的单元结构示意图

Fig. 1 Schematic of unit structure of cross-type terahertz filter

另一面探测透射信号,通过快速傅里叶变换获取频谱图。设定十字单元结构的周期  $P = 275\ \mu\text{m}$ ,臂长  $L = 250\ \mu\text{m}$ ,臂宽  $W = 40\ \mu\text{m}$ ,入射角  $\alpha = 0^\circ$ ,极化角  $\gamma = 0^\circ$ ,对金属铝箔的厚度进行参数化扫描(厚度  $H$  为  $1 \sim 1000\ \mu\text{m}$ ,步长为  $1\ \mu\text{m}$ ),研究不同金属层厚度的太赫兹滤波器在  $0.1 \sim 2\ \text{THz}$  范围内的太赫兹透射率。

仿真结果如图 2(a)所示。从图 2(a)可以看出:带通滤波器的中心频率为  $0.57\ \text{THz}$ ;随着厚度增大,透射峰的带宽逐渐变窄,当厚度超过  $60\ \mu\text{m}$  后,在高频区出现了周期性的高透射条纹。分别截取  $H = 10\ \mu\text{m}$  和  $150\ \mu\text{m}$  这 2 个厚度时的太赫兹透射率频谱,如图 2(b)所示,可以看出:当  $H = 10\ \mu\text{m}$  时,滤波器只有 1 个主透射峰;当  $H = 150\ \mu\text{m}$  时,主透射峰变窄且峰值稍有降低,此外,在  $0.85\ \text{THz}$  处出现 1 个新的透射峰,滤波器从单通变为双通;而且,随着厚度增大,透射峰的个数增多,例如在  $H = 600\ \mu\text{m}$  处截取频谱,可以得到 4 个透射峰,滤波器转变为多带通滤波器。

### 2.2 分析与讨论

为了研究异常透射峰出现的原因,截取十字结构内的电场分布。当金属厚度  $H = 150\ \mu\text{m}$  时,沿  $XZ$  平面(如图 1 中红线框所示截面)截取的十字狭缝内频率的低频( $f = 0.57\ \text{THz}$ )峰和低频( $f = 0.85\ \text{THz}$ )峰的电场分布如图 3(a)~(b)所示。利用周期性十字孔隙结构可以实现带通滤波器特性,这是由金属表面等离子体(SPP)与周期性十字结构耦合导致的<sup>[20]</sup>。从图 3(a)中可以看出,低频( $f = 0.57\ \text{THz}$ )峰的强电场填充了整个交叉狭缝,表现为 SPP 波通过狭缝传播。从图 3(b)中可以看出,高频( $f = 0.85\ \text{THz}$ )峰的强电场区位于 Al 膜的上表面和底面。图 3(c)为  $H = 300\ \mu\text{m}$  和  $f = 0.85\ \text{THz}$  时的电场分布,图 3(d)所示为  $H = 750\ \mu\text{m}$  和  $f = 0.85\ \text{THz}$  时的电场分布,在狭缝中可观察到等间距的强电场区域。当  $f = 0.57\ \text{THz}$  时,所有厚度对应的电场分布几乎相同。从图 2(a)可以看出, $H = 300\ \mu\text{m}$  时频谱有 3 个透射峰,而  $H = 750\ \mu\text{m}$  时有 5 个透射峰,峰的数量等于狭缝中强电场区域的数量,随着厚度继续增大,出现了更多的峰和强电场区域。当 SPP 波在空气和金属界面传播时,可以利用隧穿效应通过十字狭缝,然后继续在金属下表面传播<sup>[21-22]</sup>。因此,低频峰的强电场区域填充了整个十字狭缝,如图 3(a)所示,表现为 SPP 波沿狭缝向下传播,而高频峰的强电场区域则分别位于金属层

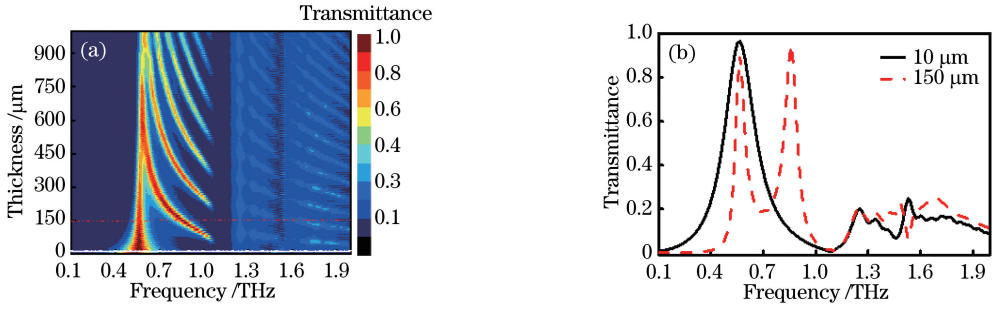


图2 十字型太赫兹滤波器的透射率。(a)  $H$  为  $1\sim 1000\ \mu\text{m}$  时太赫兹滤波器透射率的等高线；  
(b)  $H=10\ \mu\text{m}, 150\ \mu\text{m}$  时的太赫兹频谱曲线

Fig. 2 Transmittance of cross-type terahertz filter. (a) Transmittance contour map of terahertz filter with  $H$  changing from  $1\ \mu\text{m}$  to  $1000\ \mu\text{m}$ ; (b) transmittance curves of terahertz filters when  $H=10\ \mu\text{m}$  and  $150\ \mu\text{m}$

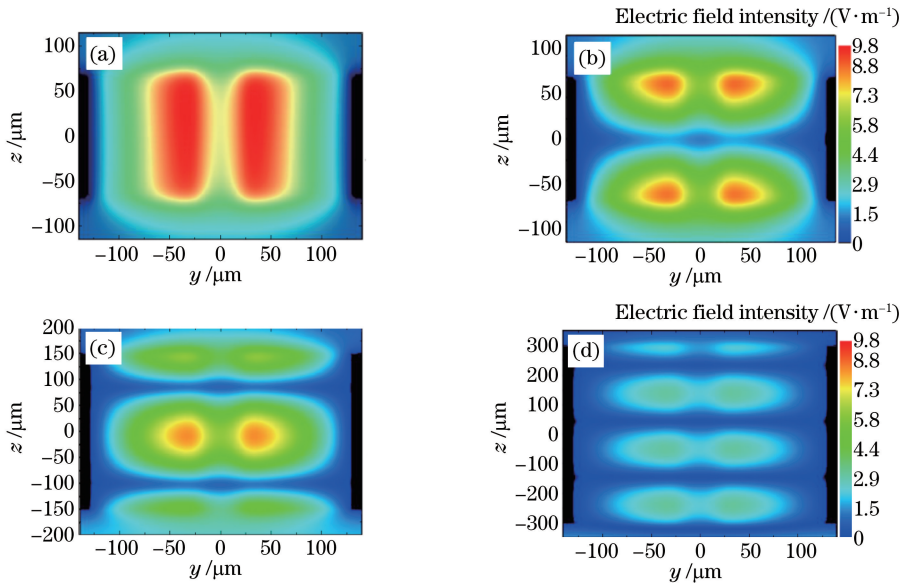


图3 十字结构狭缝内的电场强度分布。(a)  $H=150\ \mu\text{m}, f=0.57\ \text{THz}$ ; (b)  $H=150\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$ ;  
(c)  $H=300\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$ ; (d)  $H=750\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$

Fig. 3 Electric field distributions in slit of cross unit. (a)  $H=150\ \mu\text{m}, f=0.57\ \text{THz}$ ; (b)  $H=150\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$ ; (c)  $H=300\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$ ; (d)  $H=750\ \mu\text{m}, f=0.85\ \text{THz}$

的上下表面[如图3(b)所示]和狭缝内,原因是沿金属侧壁传播的SPP波在狭缝内的法布里-珀罗(F-P)共振耦合<sup>[20]</sup>。

经典的F-P共振频率为

$$f_{\text{F-P}} = \frac{mc}{2H}, \quad (1)$$

式中: $m$ 为正整数; $c$ 为光速。从(1)式中可以看出,在频率固定时(如 $0.7\ \text{THz}$ ),F-P共振产生的透射增强具有相同的频率间隔 $\Delta f = c/(2H)$ ;同时,在厚度固定时(如 $600\ \mu\text{m}$ ),F-P共振产生的透射增强具有相同的厚度间隔 $\Delta H = c/(2f) = \lambda/2$ ,表现为图3中狭缝内的强电场周期性条纹。

为了验证上述分析得到的F-P共振特性,在图2(a)中 $0.9\ \text{THz}$ 位置截取一条垂直线,然后读出每个峰处对应的厚度,厚度与峰数的关系如图4(a)所示。同理,在厚度为 $1000\ \mu\text{m}$ 处截取一条水平线,然后读出每个峰对应的频率,频率与峰数的关系如图4(b)所示。从图4(a)、(b)中可以看出,拟合度很高。固定频率时,狭缝中高透射峰数随厚度的增大而增多,并呈线性关系;固定厚度时,高透射峰数随频率的增大而增多,并呈线性关系。表明图2(a)中高透射率条纹随厚度或频率的变化是等间距的,分析结果与理论相同,证明了高透射率条纹是由F-P共振引起的。

对图4(a)、(b)进行分析可以发现,相同频率

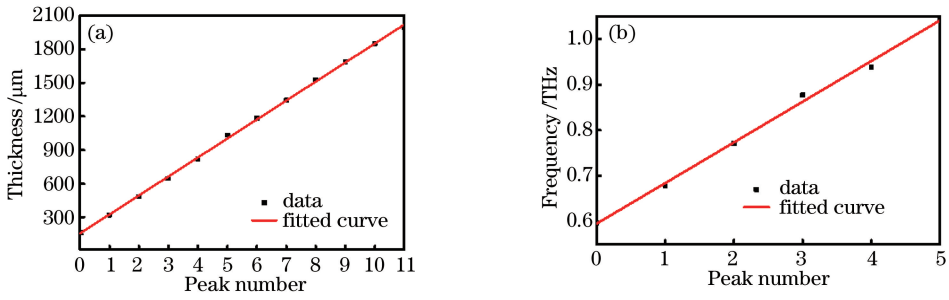


图 4 线性拟合结果。(a)  $f=0.9$  THz 时厚度与峰数的关系;(b)  $H=1000 \mu\text{m}$  时频率与峰数的关系

Fig. 4 Linear fitting results. (a) Relationship between thickness and number of peaks at  $f=0.9$  THz; (b) relationship between frequency and number of peaks at  $H=1000 \mu\text{m}$

透射峰的厚度差  $\Delta H$  小于理论值,同时,同一厚度时的频率间隔  $\Delta f$  也小于理论值。原因是在狭缝内入射波的能量主要以 SPP 波的形式进行传输。SPP 波的波长为

$$\lambda_{\text{SPP}} = \lambda \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}, \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为入射波长; $\epsilon_m$  为狭缝边界金属的介电常数实部; $\epsilon_d$  为狭缝内介质的介电常数。从(2)式中可以得出,SPP 波长始终小于入射波长,在狭缝内部,由于电磁波以 SPP 波的形式传输,因此,此时 F-P 共振效应的波长应为 SPP 波的波长。由于 SPP 波长较小,因此根据(1)式计算得到的厚度差  $\Delta H$  和频率间隔  $\Delta f$  均小于理论值。综上可以得出,实验和仿真得到的周期性透射增强源于 SPP 波在狭缝内的 F-P 共振<sup>[20]</sup>。

### 3 实验验证

为了验证金属厚度引起的异常透射现象,利用

飞秒激光微加工<sup>[7]</sup>技术在厚度为  $150 \mu\text{m}$  的铝箔上制备与 FDTD 模拟结构参数相同的太赫兹滤波器样品,如图 5 所示,并利用太赫兹时域光谱系统对其进行性能测试。关于飞秒激光加工系统和太赫兹时域光谱系统测量的实验细节可以参考文献<sup>[7]</sup>。太赫兹时域光谱系统中充满干燥的氮气,将没有样品时的太赫兹信号作为参考信号(air),将通过太赫兹滤波器的太赫兹信号为样品信号,它们的时域波形如图 6(a)所示。经过快速傅里叶变换后获得频谱图,并计算透射率,结果如图 6(b)中的虚线所示,图 6(b)中的实线是通过 FDTD 仿真得到的透射率。从图 6 中可以看出,在实验中可以观察到 2 个透射峰,透射峰的峰值低于模拟结果,中心频率、频谱形状与理论基本相符。峰值低于预期可能是由缝宽的不均匀<sup>[如图 5(c)所示]</sup>、铝箔厚度不均匀,以及厚铝箔样品狭缝的侧壁加工倾角引起的。

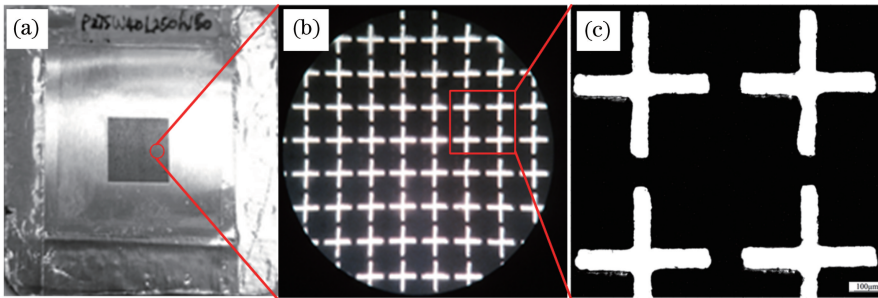


图 5 样品实物图。(a)在厚度为  $150 \mu\text{m}$  的铝箔上加工的样品;(b)局部放大图;(c)光学显微镜图像

Fig. 5 Pictures of sample. (a) Sample on Al foil when thickness is  $150 \mu\text{m}$ ; (b) partially enlarged image; (c) optical microscopic image

### 4 结 论

通过 FDTD 仿真研究了基于厚铝箔的太赫兹十字滤波结构,发现了由狭缝侧壁上的 SPP 波共振耦合引起的异常透射现象。利用飞秒激光微加工技术

制备了与仿真结构参数一致的太赫兹滤波器,利用太赫兹时域光谱系统进行测试,实验结果与 FDTD 模拟结果基本一致。无衬底周期性金属结构为研究金属表面上的 SPP 波及其在孔隙中的传播和耦合提供了良好的平台,有望研发出新的太赫兹器件。



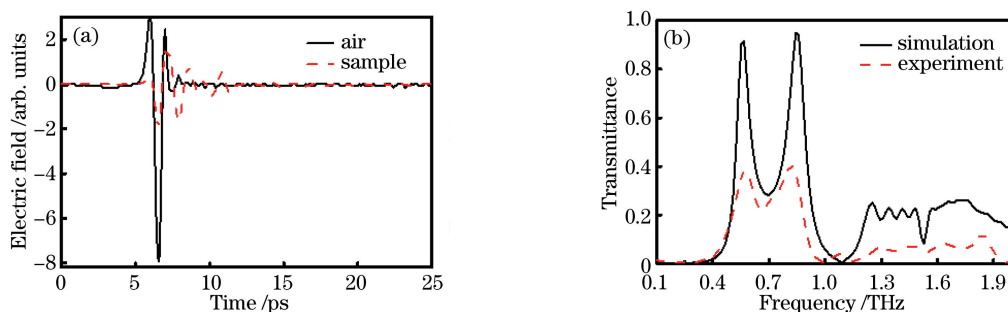


图6 太赫兹滤波器时域信号及透射率曲线。(a)太赫兹参考信号与滤波器样品信号的时域波形；  
(b) FDTD仿真和实验获得的太赫兹透射率曲线

Fig. 6 Terahertz time-domain waveforms and transmittance curves. (a) Time-domain waveforms of terahertz reference signal and filter sample signal; (b) terahertz transmittance curves obtained by FDTD simulation and experiment

## 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] 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.
- [8] Chen Y Q, Gao B P, Lin Y Z, *et al.* Metal wire grid terahertz polarizer fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0802005.  
陈燕青, 高炳攀, 林炎章, 等. 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0802005.
- [9] Gao B P, Lin Y Z, Chen Y, *et al.* Substrateless terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining [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.
- [10] 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.
- [11] Ulrich R. Interference filters for the far infrared[J]. *Applied Optics*, 1968, 7(10): 1987-1996.
- [12] 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.
- [13] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, *et al.* Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (5): 0513002.  
梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0513002.
- [14] Cao J G, Zhou Y X. Polarization modulation of terahertz wave by graphene metamaterial with grating structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092501.  
曹建国, 周译玄. 栅状结构石墨烯超材料的太赫兹波偏振调制[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9):

- 092501.
- [15] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, *et al.* Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603.  
孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603.
- [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] Nolte D D, Lange A E, Richards P L. Far-infrared dichroic bandpass filters [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(10): 1541-1545.
- [18] Ortuño R, García-Meca C, Rodríguez-Fortuño F J, *et al.* Role of surface plasmon polaritons on optical transmission through double layer metallic hole arrays [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(7): 075425.
- [19] Ordal M A, Long L L, Bell R J, *et al.* Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(7): 1099-1119.
- [20] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [21] Miyamaru F, Hangyo M. Anomalous terahertz transmission through double-layer metal hole arrays by coupling of surface plasmon polaritons [J]. *Physical Review B*, 2005, 71(16): 165408.
- [22] Sidorenko S, Martin O J F. Resonant tunneling of surface plasmon-polaritons [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 6380-6388.