

doi:10.3788/gzxb20154403.0323003

一种双面周期开槽型可调太赫兹带通滤波器

袁明辉, 赵堤

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室,
教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

摘要:为实现低成本高效率的可调太赫兹带通滤波器,采用太赫兹时域波谱系统实验研究了一种在薄铝片上制作的中心开通槽两边双面对称周期性开浅槽的结构.实验结果表明由于双面耦合伪表面等离子体激元的增强透射效应,该滤波器垂直入射时在 0.33 THz 处获得超过 95% 的高透射率,其透射波的发散角在 5° 左右.并且当滤波器侧向斜入射时透射峰一分为二,低频透射峰红移而高频透射峰蓝移;当滤波器俯仰方向斜入射时透射峰蓝移.

关键词:物理电子学;太赫兹;滤波器;可调;伪表面等离子体激元

中图分类号:TN713

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0323003-5

A Tunable Terahertz Bandpass Filter with a Slit Aperture Flanked by Symmetrically Distributed Parallel Grooves on Both Sides

YUAN Ming-hui, ZHAO Di

(Shanghai Key Lab of Modern Optical System and Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A low-cost and high efficient tunable terahertz (THz) bandpass filter on aluminum slab with a center slit flanked by symmetrically distributed parallel grooves on both sides was experimentally analyzed by the terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). Experimental results show that a high centre transmittance ($>95\%$) can be obtained at 0.33 THz because of the enhanced transmission effect induced by symmetrically coupled spoof surface plasmon polaritons (SSPPs). And the transmitted THz wave radiated from the slit aperture has a small divergence angle (approximately 5°). Moreover, the transmission peak splits into two peaks; the low-frequency peak shows redshift and the high-frequency peak shows blueshift when the incident tilting angle increases, and the transmission peak blue shifts when the incident pitching angle increases.

Key words: Physical electronics; Teahertz; Filter; Tunable; Spoof surface plasmon polaritons (SSPPs)

OCIS Codes: 120.2440; 240.6680; 160.3900; 190.4360

0 引言

近年来,基于伪表面等离子体激元(Spoof Surface Plasmon Polaritons, SSPPs)的太赫兹滤波器设计得到众多研究者的关注^[1],这种滤波器具有结构简单、透射率极高等优点.牛眼结构^[2-3]、金属孔阵列结构^[4-8]以及各种形状的金属条阵列结构^[9]等采用一维和二维结构

设计,主要用来提供 SSPPs 耦合所必需的动量匹配条件^[10],但是这些结构的滤波特性不能调节.目前可调的太赫兹滤波器主要有机械或者热调节^[11-15]、光调节^[16-18]、电或者磁调节^[19-21]等.但是这些可调的太赫兹滤波器都存在着诸如结构复杂、成本高昂、调节不便以及调节范围小等缺点.

本文理论分析并实验研究了一种低成本、高效率

基金项目:上海市自然科学基金(No. 11ZR1424900)、上海市重点学科项目第三期项目(No. S30502)和上海市教育委员会重点学科建设项目(No. J50505)资助

第一作者:袁明辉(1976-),男,讲师,博士,主要研究方向为太赫兹器件技术. Email: yuanminghui@usst.edu.cn

收稿日期:2014-08-20; **录用日期:**2014-10-25

<http://www.photon.ac.cn>

的双面周期开槽型太赫兹带通滤波器. 采用双面耦合的表面波 SSPPs 传输, 中心透射率高($>95\%$), 发散角小(5° 左右); 并且通过改变空间入射方向还可以大范围调节其中心频率.

1 滤波器结构原理及实验方案

双面周期开槽型太赫兹带通滤波器结构如图 1, 它是在穿透薄铝片(厚度 $t=300\ \mu\text{m}$)的细小狭缝(宽度 $d=220\ \mu\text{m}$)两侧在上下两面周期性对称刻蚀宽度 $w=440\ \mu\text{m}$, 深度 $s=60\ \mu\text{m}$ 的凹槽(狭缝和槽的长度 $L=4400\ \mu\text{m}$, 周期间隔 $p=880\ \mu\text{m}$, 一共 $2\times 10\times 2$ 个周期), 利用凹槽的周期性结构动量实现一定频率的入射波与 SSPPs 匹配耦合, 具有极低的传输损耗^[22]. 同时, 由于上下两面 SSPPs 的对称耦合, 相当于在空间上对出射波的功率做了一个平方的重新分布, 也就是说, 其 $-3\ \text{dB}$ 发散角仅相当于单面结构的 $-1.5\ \text{dB}$ 发散角, 从而从狭缝处出射的太赫兹波具有很小的发散角. 而且由于动量匹配条件的改变, 使得该滤波器的滤波特性可以很容易地通过改变空间入射角度来调节.

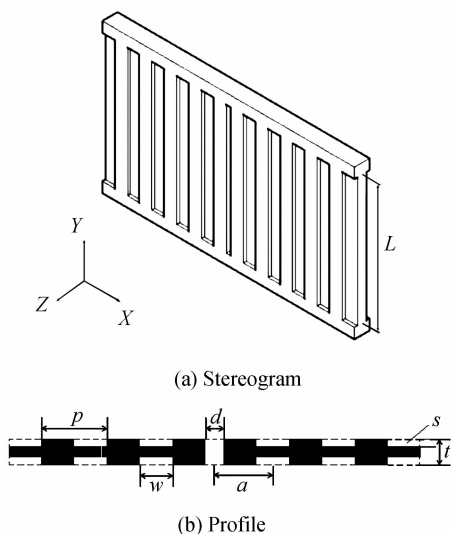
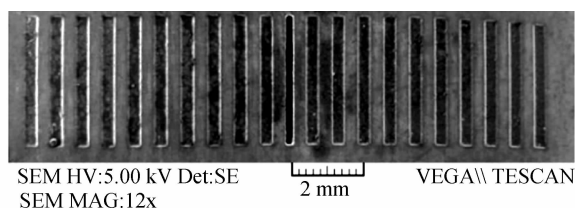


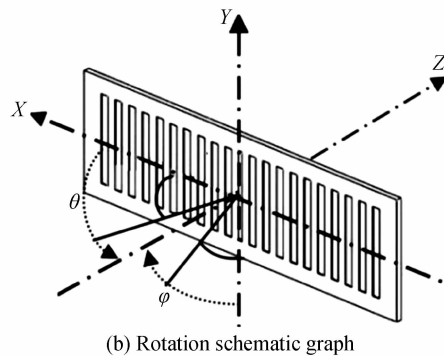
图 1 滤波器结构图
Fig. 1 Filter structure

实验样品是在 $0.3\ \text{mm}$ 厚硬铝薄板上采用电火花工艺机械加工而成, 其扫描电子显微镜(SEM)图如图 2(a)所示. SEM 测量到的槽宽(X 轴方向)最大加工误差 $22.4\ \mu\text{m}$, 用台阶仪测量到的槽深(Z 轴方向)最大加工误差 $9.8\ \mu\text{m}$. 测试系统为 THz 时域波谱系统(Terahertz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS), 其旋转角度示意图如图 2(b)所示, θ 为侧向旋转角, φ 为俯仰旋转角. 入射的太赫兹波均为 TM 偏振(即电场沿 X 轴方向, 与周期性结构所提供的动量 G 在同一座标轴上). 这些周期结构像天线一样收集入射的太赫兹波并根据动量匹配条件将某些频率转换为 SSPPs^[23], 两面的 SSPPs 对称耦合以极低的损耗在表面的周期结构

中传输并在中心狭缝处以很小的发散角出射.



(a) Scanning electronic microscopy (SEM) image



(b) Rotation schematic graph

图 2 滤波器 SEM 图以及旋转示意图
Fig. 2 Scanning electronic microscopy (SEM) image and rotation schematic graph of the filter

2 实验结果及其分析

垂直入射时输入参考信号和出射太赫兹波的时域脉冲信号、对应的频谱以及滤波器的滤波谱分别如图 3(a)、(b)和(c)所示. 可以看出滤波器在 $0.33\ \text{THz}$ 处有一个超过 95% 的透射峰, 其 $3\ \text{dB}$ 带宽约为 $55\ \text{GHz}$, 并且可以通过增加结构周期数进一步减小. 从中心狭缝处出射的太赫兹波发散角测量值约为 5° , 这一点对于长距离传输很重要, 而且通过增加结构周期数发散角还可以继续减小^[24].

根据 SSPPs 的动量匹配条件^[4], 有

$$k_{//} + k_{\text{spp}} = G^{(i)} \quad (1)$$

式中 $k_{//}$ 是入射太赫兹波平行于铝片表面分量的波矢,

$k_{\text{spp}} = k_{\text{air}} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Al}} \epsilon_{\text{air}}}{\epsilon_{\text{Al}} + \epsilon_{\text{air}}}}$ 是铝板表面 SSPPs 的波矢 ($k_{\text{air}} =$

$\frac{2\pi f}{c}$ 是入射太赫兹波的波矢, ϵ_{Al} 和 ϵ_{air} 分别为铝和空气的介电常数; 由于金属的介电常数非常大^[25], 所以

$\sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Al}} \epsilon_{\text{air}}}{\epsilon_{\text{Al}} + \epsilon_{\text{air}}}} \approx 1$, $G^{(i)} = \frac{2\pi i}{p}$ ($i \in N$) 是铝片上周期结构所提供的动量(p 是周期间隔).

可以求出垂直入射时(即 $k_{//} = 0$) SSPPs 的一阶(主)谐振频率 $f_0 \approx c/p = 0.34\ \text{THz}$, 考虑到加工误差, 与测量值 $0.33\ \text{THz}$ 基本吻合.

当太赫兹波斜入射时, 由于 $k_{//} \neq 0$, 因此其谐振频率将发生改变. 对侧向(θ 角度)旋转和俯仰(φ 角度)旋转两种情况分别加以分析.

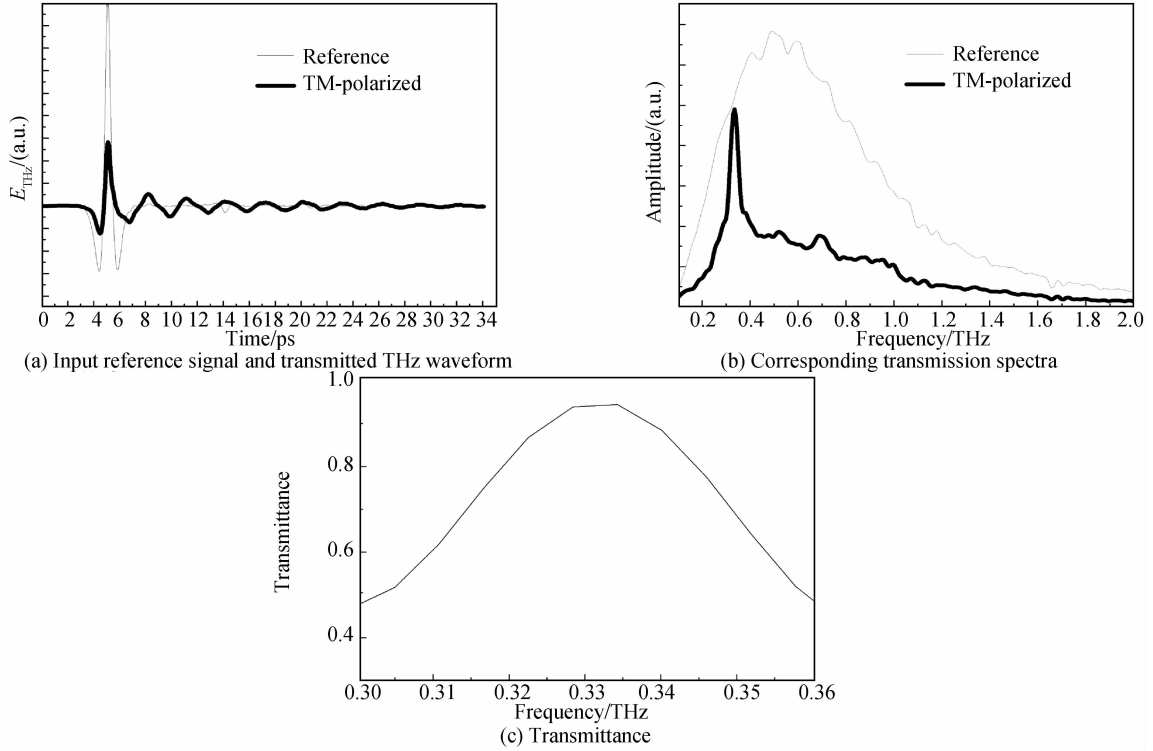


图3 垂直入射时的输入参考信号和出射太赫兹波形、对应的传输谱以及透射率谱

Fig. 3 Input reference signal and transmitted THz waveform, corresponding transmission spectra and transmittance at normal incidence

2.1 侧向旋转

侧向(θ 角度)旋转时的输入参考信号和出射太赫兹波的时域脉冲信号、对应的频谱以及滤波谱峰的移

动分别如图4所示.可以看出,侧向旋转时,滤波峰一分为二:低频峰(即左峰)红移而高频峰(即右峰)蓝移.这是因为侧向旋转时 $k_{//}$ 与狭缝左右两侧的周期结构

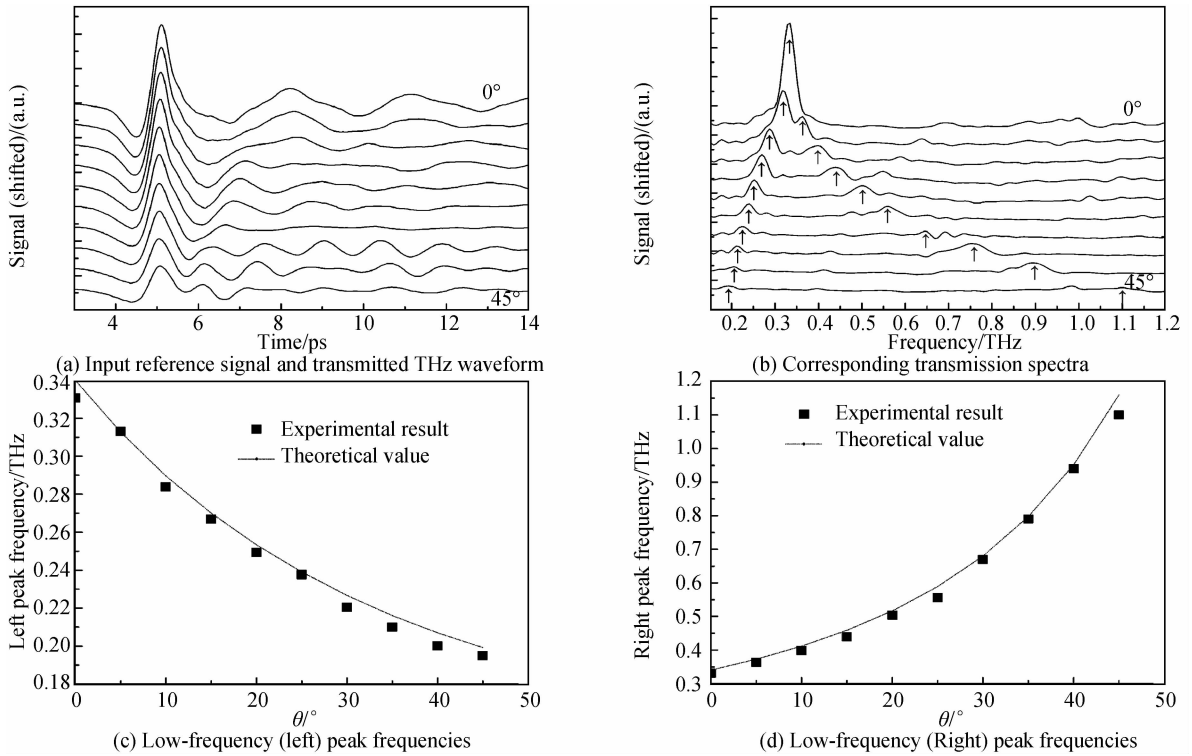


图4 侧向旋转时不同 θ 角度的输入参考信号和出射太赫兹波时域脉冲,对应的传输谱(均间隔 5° ,每条曲线纵向平移 20%)以及滤波谱的低频峰(左峰)频率和高频峰(右峰)频率

Fig. 4 Input reference signal and transmitted THz waveforms, corresponding transmission spectra and low-frequency (left) peak frequencies and high-frequency (right) peak frequencies as a function of incident tilting angle θ with a step of 5° , each curve was arbitrarily shifted vertically by 20%

动量 G 分别同向和反向 (k_{\parallel} 与 G 同在 X 轴上, 但是狭缝两侧的 G 方向相反). 根据动量匹配条件, 有

$$\pm \frac{2\pi f_{\theta}}{c} \sin \theta + \frac{2\pi f_{\theta}}{c} \approx \frac{2\pi}{p} \quad (2)$$

因此侧向旋转时的一阶(主)谐振频率变为

$$f_{\theta, \pm} \approx f_0 \frac{1}{1 \pm \sin \theta} \quad (3)$$

式中同向(低频峰)为正(红移)反向(高频峰)为负(蓝移). 理论上, 通过侧向旋转可以实现从 f_0 到 $f_0/2$ 以及 f_0 到 ∞ 范围内的同时调节. 从图 4(c) 和 (d) 可以看出实验测量值与理论值基本吻合.

同时要说明的是, 侧向(θ 角度)旋转时总输出功率基本不变, 只不过是两个透射峰之间做了一个重新分配.

2.2 俯仰旋转

俯仰(φ 角度)旋转时的输入参考信号和出射太赫兹波的时域脉冲信号、对应的频谱以及滤波谱峰的移动如图 5 所示. 可以看出, 俯仰旋转时滤波峰蓝移并展宽. 根据动量匹配条件, 有

$$\frac{2\pi f_{\varphi}}{c} \cos \varphi + \frac{2\pi f_{\varphi}}{c} \approx \frac{2\pi}{p} \quad (4)$$

因此俯仰旋转时的一阶(主)谐振频率 f_{φ} 变为

$$f_{\varphi} \approx f_0 \frac{1}{\cos \varphi} \quad (5)$$

从图 5(c) 可以看出实验测量值与理论值基本吻合. 理论上, 通过俯仰旋转可以实现从 f_0 到 ∞ 范围内的调节. 其中, 当 $\varphi = 30^\circ$ 时中心频率为 0.38 THz ($1.15 f_0$), 此时的中心透射率为 0.5 .

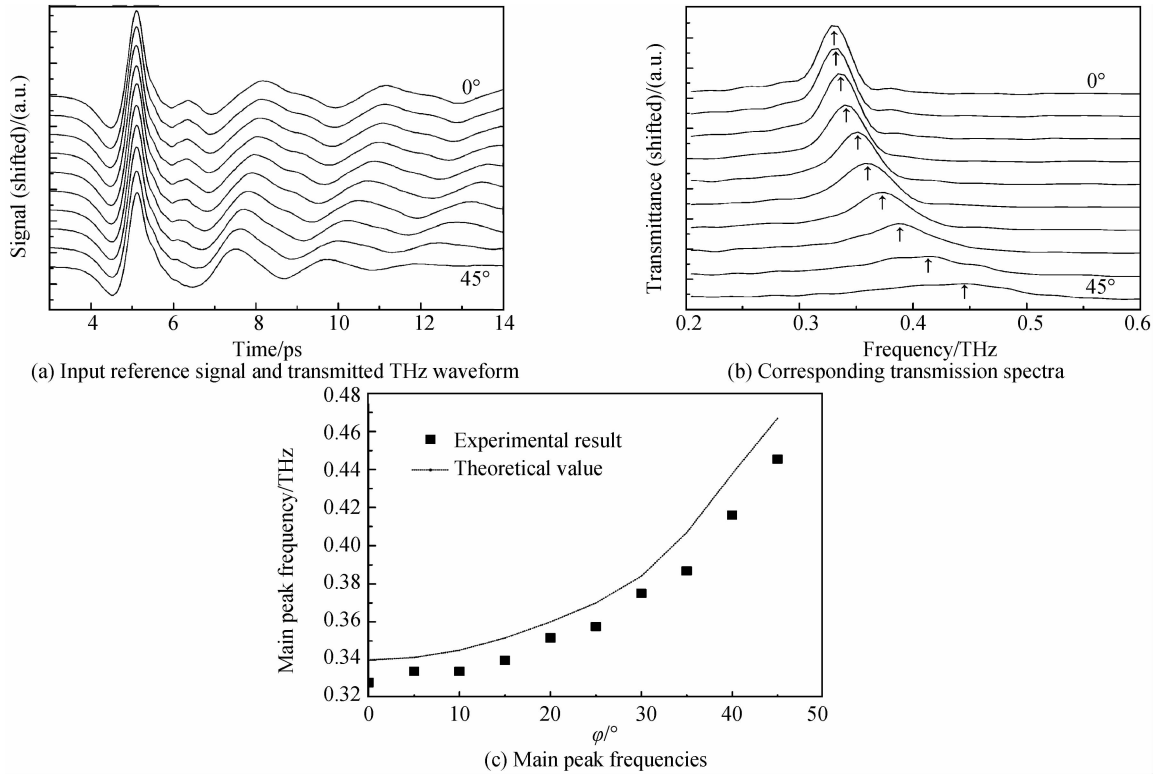


图 5 俯仰旋转时不同 φ 角度的输入参考信号和出射太赫兹波形, 对应的传输谱(均间隔 5° , 每条曲线纵向平移 20%)以及主峰值频率

Fig. 5 Input reference signal and transmitted THz waveforms, corresponding transmission spectra and main peak frequencies as a function of incident pitching angle φ with a step of 5° , each curve was arbitrarily shifted vertically by 20%

同时, 俯仰(φ 角度)旋转时总输出功率也基本不变, 只不过是导致中心透射率下降和 3 dB 带宽展宽.

整体而言, 俯仰旋转时滤波器一阶(主)谐振频率上透射率的下降速度远低于侧向旋转时的下降速度, 这主要是因为, 俯仰旋转时谱峰没有分裂功率集中在一个峰内的原因. 因此, 通过俯仰旋转时的蓝移来调节其中心频率在实践中更为可取.

3 结论

测试实验表明垂直(正)入射时双面开槽型可调太

赫兹滤波器的中心透射率超过 95% , 透射波的发散角约为 5° ; 并且其滤波中心频率可以通过改变空间入射方向大范围在红移和蓝移两个方向调节.

参考文献

- [1] GARCIA-VIDAL F J, MARTIN-MORENO L, EBBESEN T W, *et al.* Light passing through subwavelength apertures[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, **82**(1): 729-787.
- [2] AGRAWAL A, CAO H, NAHATA A. Time-domain analysis of enhanced transmission through a single subwavelength aperture[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(9): 3535-3542.
- [3] MAHBOUB O, CARRETERO PALACIOS S, GENET C, *et al.* Optimization of bull's eye structures for transmission

- enhancement[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11):11292-11299.
- [4] TATSUNOSUKE M, AGRAWAL A, NAHATA A, *et al.* Transmission resonances through aperiodic arrays of subwavelength apertures[J]. *Nature*, 2007, **446**:517-521.
- [5] INOUE D, MIURA A, NOMURA T, *et al.* Polarization independent visible color filter comprising an aluminum film with surface-plasmon enhanced transmission through a subwavelength array of holes[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(9):093113.
- [6] THO DUC NGUYEN, LIU SHUCHANG, VALY VARDENY Z, *et al.* Engineering the properties of terahertz filters using multilayer aperture arrays[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(19): 18678-18686.
- [7] JIMBA Y, TAKANO K, HANGYO M, *et al.* Extraordinary optical transmission through incommensurate metal hole arrays in the terahertz region[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(9):2476-2482.
- [8] CHEN L, ZHU Y M, ZANG X F, *et al.* Mode splitting transmission effect of surface wave excitation through a metal hole array[J]. *Light-Science & Applications*, 2013, **2**(3):e60.
- [9] LEE J W, SEO M A, PARK D J, *et al.* Shape resonance omnidirectional terahertz filters with near-unity transmittance[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(3):1253-1259.
- [10] TINEKE THIO, LEZEC H J, EBBESEN T W, *et al.* Giant optical transmission of sub-wavelength apertures: physics and applications[J]. *Nanotechnology*, 2002, **13**(3):429-432.
- [11] HU Jian-rong, Li Jiu-sheng, CHENG Wei. Research on a thermally tunable terahertz wave band-stop filter based on thermo-sensitive media [J]. *Electronic Components & Materials*, 2014, **33**(5):57-60.
- [12] HO Chong-pei, PITCHAPPA P, LIN Yu-sheng, *et al.* Electrothermally actuated micro electro mechanical systems based omega-ring terahertz metamaterial with polarization dependent characteristics[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(16):161104.
- [13] LIU Li-ming, SHADRIVOV I V, POWELL D A, *et al.* Temperature control of terahertz metamaterials with liquid crystals[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(6):827-831.
- [14] TAO Jin, HU Bin, HE Xiao-yong, *et al.* Tunable subwavelength Terahertz plasmonic stub waveguide filters [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2013, **12**(6): 1191-1197.
- [15] LI Quan, ZHANG Xue-qian, CAO WEI, *et al.* An approach for mechanically tunable, dynamic terahertz bandstop filters [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2012, **107**(2):285-91.
- [16] BUSCH S F, SCHUMANN S, JANSEN C, *et al.* Optically gated tunable terahertz filters[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(26):261109.
- [17] LI Jiu-sheng. Fast-tunable terahertz wave filter based on Kerr medium[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, **56**:263-268.
- [18] RIZZA C, CIATTONI A, SPINOZZI E, *et al.* Terahertz active spatial filtering through optically tunable hyperbolic metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(16):3345-3347.
- [19] VIEWEG N, BORN N, AL-NAIB I, *et al.* Electrically tunable Terahertz notch filters[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2012, **33**(3):327-332.
- [20] LI Kang-wen, MA Xun-peng, ZHANG Zu-yin, *et al.* Highly tunable Terahertz filter with magneto-optical Bragg grating formed in semiconductor-insulator-semiconductor waveguides [J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(6):062130.
- [21] FAN Fei, GUO Zhan, BAI Jin-jun, *et al.* Magnetic photonic crystals for terahertz tunable filter and multifunctional polarization controller[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2011, **28**(4):697-702.
- [22] PENDRY J B, MARTI'N-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, **305**(5685):847-848.
- [23] MARTI'N-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, *et al.* Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(16):167401.
- [24] YU Zai-he, GAO Zhen, SONG Zheng-yong, *et al.* Terahertz spoof plasmonic coaxial microcavity [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(6):1118-1123.
- [25] 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.