

机械可调谐太赫兹等离子体波导滤波器

陈 猛¹ 范 飞^{1*} 杨 磊¹ 张震坤² 罗友阳² 常胜江¹

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071

²南开大学电子信息与光学工程学院, 天津 300071

摘要 设计并制备了两种工作在太赫兹波段的等离子体晶体波导, 利用其带隙位置随波导间空气隙变化而连续变化的特点, 实现了光开关和机械可调谐滤波器的功能。利用太赫兹时域光谱系统研究了这两种等离子体晶体波导的传输和滤波性质, 利用时域有限差分法计算了其透射率, 用有限元法计算了其带隙性质和场分布。结果表明应用这两种结构实现的可调谐滤波器都具有良好的性能, 其中一维等离子体晶体波导的调谐范围达到了 130 GHz, 消光比为 30 dB; 二维等离子体晶体波导的调谐范围达到了 110 GHz, 消光比可达 40 dB。

关键词 集成光学; 太赫兹; 等离子体晶体波导; 可调谐

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0411001

Mechanically Tunable Terahertz Plasmonic Waveguide Filter

Chen Meng¹ Fan Fei¹ Yang Lei¹ Zhang Zhenkun² Luo Youyang² Chang Shengjiang¹

¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

²*College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China*

Abstract Two kinds of plasmonic crystal waveguides at terahertz band are designed and fabricated. Based on the property that the bandgaps of the waveguides can be manipulated actively by varying the air gap between the waveguide, the functions of optical switch and mechanically tunable filter have been realized. The transmission and filtering properties of the two plasmonic crystal waveguides are investigated by terahertz time-domain system. The transmittance is calculated by finite-difference time-domain method. The band gap properties and field distributions are simulated by finite element method. The results indicate that both of the two tunable filters achieve good performance. The extinction ratio of the one-dimensional plasmonic crystal waveguide is 30 dB, the tunable band gap range is 130 GHz, while the range of the two-dimensional plasmonic crystal waveguide is 110 GHz, and the extinction ratio is 40 dB.

Key words integrated optics; terahertz; plasmonic crystal waveguide; tunable

OCIS codes 130.5296; 250.5403; 350.3950; 350.5400

1 引言

太赫兹(THz)波是指频率介于 0.1~10 THz(波长 30~3 mm)之间的电磁波, 位于电磁波谱中的微波与可见光波之间。过去由于太赫兹波的产生和探测较为困难, 人们对这一波段的特性知之甚少。近年来, 随着太赫兹源和探测技术的逐步成熟, 太赫兹技术取得了快速的发展, 在通信^[1-2]、成像^[3-4]、医药^[5-6]、生物^[7]、化学^[8-9]等领域展现出巨大的应用价值。作为太赫兹应用系统中的重要组成部分, 太赫兹调制器^[10]、隔离器^[11]、偏振控制器^[12]、传感器^[13]等功能器件必不可少。设计制备性能优良, 使用方便的太赫兹功能器件是当今太赫兹研究领域的一大热点。

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家 973 计划(2014CB339800)、国家 863 计划(2011AA010205)、国家自然科学基金(61171027, 61505088)、天津市自然科学基金(15JCQNJC02100)、天津市科技计划项目(13RCGFGX01127)

作者简介: 陈 猛(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事太赫兹方面的研究。E-mail: NK_chenmeng@163.com

导师简介: 常胜江(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹方面的研究。E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

*通信联系人。E-mail: fanfei@nankai.edu.cn

由于常见金属的等离子体频率一般位于紫外或可见波段,频率远远高于太赫兹波段,因此简单金属-介质表面不能支持强束缚的太赫兹表面等离子体波传输和局域共振。为了弥补这一不足,具有人工亚波长微结构的太赫兹等离子体晶体(PC)近年来备受关注^[14-15],这类器件由周期性的亚波长金属结构构成,通过对其周期大小以及单元结构的合理设计,可以使其在特定的波段表现出表面等离子体带隙的性质。这种类似于光子晶体带隙的性质是由布拉格散射造成的,对于具有周期 d 的等离子体晶体结构,这种散射可以提供附加的 $2m\pi/d$ ($m=0, 1, 2, \dots$)的波矢,从而补偿入射光与表面等离子体之间的波矢差,实现两种电磁波之间的相互耦合^[16]。在太赫兹波段,构成等离子体晶体的金属材料可以是常见金属,如金、银、铜、铝等。通过在两块金属板中夹入一定厚度的介质层,可以构成一个平行平板波导。将电磁波耦合到该波导介质层中传输,可以实现表面模式的局域增强,而且具有损耗低、色散小、无模式截止频率等特点^[17-19]。因此,可以将等离子体晶体放入平行平板波导中,通过平行平板波导的耦合来增强等离子体晶体与电磁波的相互作用,使得其调制效果更加显著,带隙上下沿更加陡峭^[20]。由于这种特殊的性质,等离子体晶体表现出良好的滤波性能,可以对电磁波进行有效的调控。Yuan Cai等^[21]通过数值模拟的方法,证实了通过合理地设计等离子体晶体结构,可以有效地控制太赫兹波在等离子体中传输的性质,并以此实现了滤波器的作用。Fan等^[20]在等离子体晶体结构中引入碲化铟结构,通过改变碲化铟的载流子浓度,实现了对该等离子体结构传输性质的主动调节,并由此设计了可调谐的等离子体晶体太赫兹器件。然而由于太赫兹波段等离子体晶体波导在实验测量上有困难,上述工作全都局限于理论分析和数值模拟方面。

本文分别设计了一维和二维的等离子体晶体波导,对这两种结构进行了制备,并且利用太赫兹时域光谱系统^[22]对其传输性质进行了研究。实验结果和理论分析一致表明上述结构的传输性质可以通过调节平行平板中介质层的厚度来调控,从而实现光开关和可调谐滤波器的功能。这种调控手段只需要对波导结构进行简单的机械调节,具有设计简单、操控灵活的优点。

2 器件结构和理论分析

2.1 器件结构及加工

所研究的等离子体晶体在显微镜下的照片如图1(a)和图1(b)所示。两种样品都为边长1 cm的正方形,其中图1(a)为一维等离子体晶体结构,由一个金属台阶-空气周期性结构构成。其周期 $d_1=440 \mu\text{m}$,金属台阶宽度 $w=220 \mu\text{m}$,高度 $h_1=100 \mu\text{m}$ 。二维等离子体晶体结构如图1(b)所示,由金属圆柱构成,呈正方形晶格分布,其晶格周期、圆柱半径以及圆柱高度分别为 $d_2=250 \mu\text{m}$, $r=53 \mu\text{m}$ 和 $h_2=100 \mu\text{m}$ 。

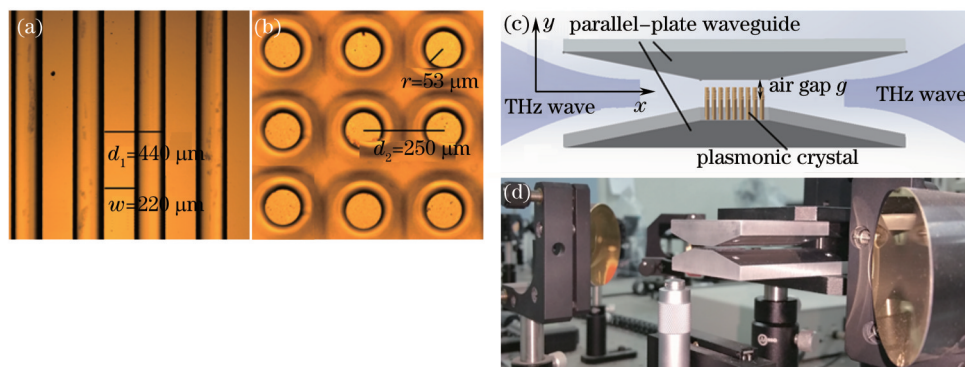


图1 样品结构和实验装置。(a)一维等离子体晶体显微照片;(b)二维等离子体晶体显微照片;
(c)等离子体晶体波导;(d)等离子体晶体波导实物图

Fig.1 Structure of the samples and experimental device. (a) Microphotograph of the one-dimensional plasmonic crystal;
(b) microphotograph of the two-dimensional plasmonic crystal; (c) plasmonic crystal waveguide;
(d) photograph of the plasmonic crystal waveguide

样品采用微机电系统(MEMS)技术中的硅深刻蚀技术和金属蒸镀技术进行加工。第一步,根据图形结构,采用电子束曝光的方法制作掩模板。第二步,在高阻硅基底上旋涂一层正光刻胶,为保证刻蚀深度又保证刻蚀精度,涂胶厚度达 $4 \mu\text{m}$ 。然后透过掩模板进行紫外曝光,并通过显影处理去除多余光刻胶。第三步,

用电感耦合等离子体刻蚀的方法进行刻蚀,刻蚀深度由刻蚀时间控制,刻蚀深度为 100 μm 。最后,通过蒸镀的方法在硅结构的表面蒸镀一层 500 nm 厚的铜,就得到了等离子体晶体样品。

等离子体晶体波导的示意图和实物图分别如图 1(c)和图 1(d)所示。在常用的太赫兹时域光谱系统中,太赫兹波焦点处的光斑直径往往大于平行平板波导的开口间隙,大部分的太赫兹能量不能耦合进入到波导中,所以采用一种楔形开口的平行平板波导,从而增大了耦合效率和透射率^[23]。太赫兹波从结构的一侧入射,沿 y 方向传播,其电场方向平行于 x 方向,在结构另一侧可以接收到被调制过的信号。等离子体晶体样品水平放置在平行平板波导中,其在 y 方向的长度为 1 cm。在等离子体晶体的上表面和平行平板波导的上板间留出一个大小为 g 的空气间隙,这个空气间隙的大小可以通过机械式地调节上板来调控,由此可以研究该波导在不同空气间隙下的传输性质。

2.2 一维等离子体晶体波导带隙分析

利用有限元法可以求出一维等离子体晶体波导的带隙图,空气间隙 $g=100 \mu\text{m}$ 和 $g=250 \mu\text{m}$ 时的结果如图 2(a)、(b)所示。图中有曲线对应的频段是导带,导带中的太赫兹波可以透过等离子体晶体波导。灰色区域为禁带,禁带中的太赫兹波将被完全反射。考虑在 0~1 THz 内的 4 个禁带和 5 个导带,对比两种情况下的带隙图可以发现,随着空气间隙的增大,禁带宽度明显减小,除第一禁带之外其他的禁带明显发生红移。以第二禁带为例,在空气间隙大小从 $g=100 \mu\text{m}$ 变化到 $g=250 \mu\text{m}$ 时,该带的频谱范围从 0.55~0.68 THz 变为 0.44~0.51 THz,带宽减小了 0.06 THz,中心频率则红移了 0.14 THz。图 2(c)为第一禁带和第二禁带随空气间隙大小变化的关系图,图中灰色部分表示禁带。由图中也可以看出随着空气间隙增大,第一禁带的带隙宽度逐渐减小;第二禁带则整体红移,频谱宽度也随之减小,可以用作带阻滤波功能。

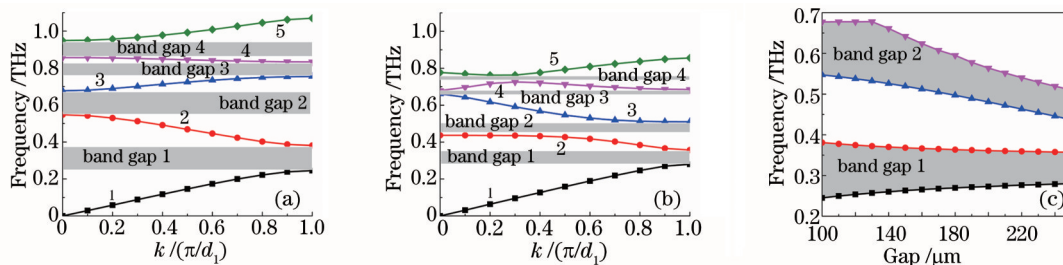


图 2 一维等离子体晶体波导的带隙图。(a) 空气间隙 $g=100 \mu\text{m}$; (b) 空气间隙 $g=250 \mu\text{m}$;
(c) 第一禁带和第二禁带随空气间隙变化关系图

Fig.2 Bandgaps of the one-dimensional plasmonic crystal waveguide. (a) Air gap $g=100 \mu\text{m}$; (b) air gap $g=250 \mu\text{m}$;
(c) variation of the first band gap and the second band gap changing with the air gap

3 实验结果与分析

利用太赫兹时域光谱系统对样品的传输性质进行了研究。太赫兹信号由低温生长的砷化镓晶体天线激发,天线发射极狭缝宽度为 50 μm 。所用到的激励源为掺钛蓝宝石飞秒激光器,波长 800 nm,脉宽 75 fs,重复频率 80 MHz。使用碲化锌晶体电光采样的方法来进行探测。太赫兹波电场方向垂直于波导金属板,经过抛物面镜聚焦后耦合到波导中,焦斑直径略小于波导楔形开口,如图 1(d)所示,所有实验均在室温下进行。

3.1 一维等离子体晶体波导的实验结果与分析

通过调节平行平板波导上板的位置,得到了不同空气间隙下一维等离子体晶体波导透射率的实验结果,为了更全面地反映器件的透射谱信息,这里同时采用振幅谱 $T(f)$ 和功率谱 $P(f)=-20 \lg[T(f)]$ 来表示图 3(a)中为空气间隙由 $g=100 \mu\text{m}$ 增大到 $g=200 \mu\text{m}$ 的振幅透射率谱,(b)为空气间隙在 $g=150 \mu\text{m}$ 到 $g=250 \mu\text{m}$ 之间变化的功率透射率谱,图 3(c)、图 3(d)分别为用时域有限差分法模拟得到的振幅透射率谱和功率透射率谱。由图 3 可以明显看出,上述结构在 0.3 THz 附近存在第一个禁带,在 0.4~0.7 THz 之间存在第二个禁带。随着空气间隙的增大,第一禁带的频谱带宽逐渐减小,从 $g=100 \mu\text{m}$ 时的 0.16 THz 减小到 $g=250 \mu\text{m}$ 时的 0.09 THz。现在讨论第二禁带,当空气间隙 $g=100 \mu\text{m}$ 时,第二禁带的中心频率在 0.6 THz 处,带宽为 0.15 THz。当空气间隙逐渐增大时,第二禁带也随之连续变化。 $g=250 \mu\text{m}$ 时,第二禁带的中心频率移动到了 0.47 THz,带宽也随之减小到 0.1 THz。

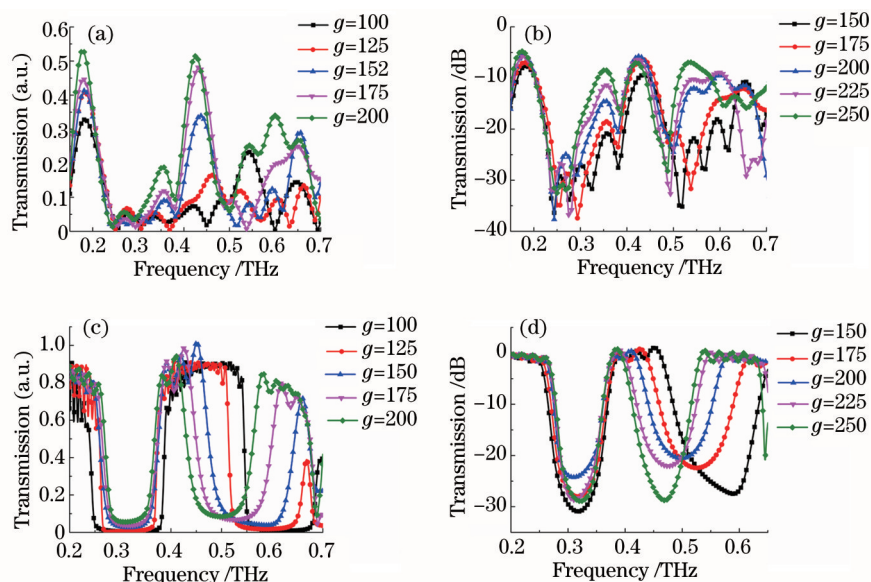


图3 一维等离子体晶体波导的传输光谱。(a) 振幅透射率谱实验结果;(b) 功率透射率谱实验结果;
(c) 振幅透射率谱模拟结果;(d) 功率透射率谱模拟结果

Fig.3 Transmission spectrum of the one-dimensional plasmonic crystal waveguide. (a) Experimental results in amplitude transmittance; (b) experimental results in power transmittance; (c) simulative results in amplitude transmittance; (d) simulative results in power transmittance

用有限元法计算了 $g=100 \mu\text{m}$, 频率 $f=0.45 \text{ THz}$ 、 $g=100 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$ 以及 $g=200 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$ 三种状态下波导中电场 y 分量 E_y 在 $x-y$ 平面内的场分布, 结果如图 4 所示。其中金属铜的介电常数^[24]设为: $\varepsilon = 1.7 \times 10^5 + 1.1 \times 10^6 i\nu^{-1}$, ν 为太赫兹波的频率, 波导外侧边界设为完美电导体边界条件, 波导口处设为端口边界条件。对比图 4(a)和图 4(b)可以得出, 当空气间隙大小不变时, 对于不同频率的太赫兹波, 波导可以起到光开关作用。图 4(b)和图 4(c)说明, 对于特定频率的太赫兹波, 调节空气间隙的大小, 可以有效实现开关状态的转换。以上分析说明, 第二禁带具备光开关和可调谐带阻滤波器的功能, 其阻带中心频率位于 $0.47 \sim 0.6 \text{ THz}$ 之间, 调谐范围可达 130 GHz , 消光比达到了 30 dB 。

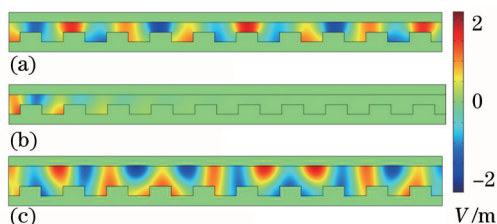


图4 一维等离子体晶体波导 $x-y$ 剖面的电场 E_y 分布。(a) $g=100 \mu\text{m}$, $f=0.45 \text{ THz}$; (b) $g=100 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$; (c) $g=200 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$
Fig.4 E_y distribution in the $x-y$ profile of one-dimensional plasmonic crystal waveguide. (a) $g=100 \mu\text{m}$, $f=0.45 \text{ THz}$;
(b) $g=100 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$; (c) $g=200 \mu\text{m}$, $f=0.6 \text{ THz}$

3.2 二维等离子体晶体结果与分析

以同样的方法研究了二维等离子体晶体在平行平板波导中传输时的透射率特性如图 5 所示。图 5(a)、(b)分别为实验和模拟得到的功率透射率谱。由图中可以看出, 等离子体晶体的禁带特性非常明显, 位于 0.4 THz 附近, 并且随着平行平板波导中空气间隙 g 的变化而变化。 $g=200 \mu\text{m}$ 时, 禁带中心频率位于 0.45 THz 处, 强度可达到 50 dB , 带宽为 0.3 THz 。随着空气间隙变宽, 谐振峰发生了红移, 同时其强度和谱宽也不断减小。最终, 在 $g=600 \mu\text{m}$ 时, 谐振峰强度只有 23 dB , 谱宽为 0.12 THz , 中心频率移动到了 0.34 THz 附近。以上分析表明, 通过调节平行平板波导的空气间隙, 可以对该二维等离子体晶体的带隙进行有效的调控, 从而实现光开关和可调谐带阻滤波器的功能。其阻带的中心频率位于 $0.34 \sim 0.45 \text{ THz}$ 之间, 调谐范围达到了 110 GHz , 消光比达 40 dB 。

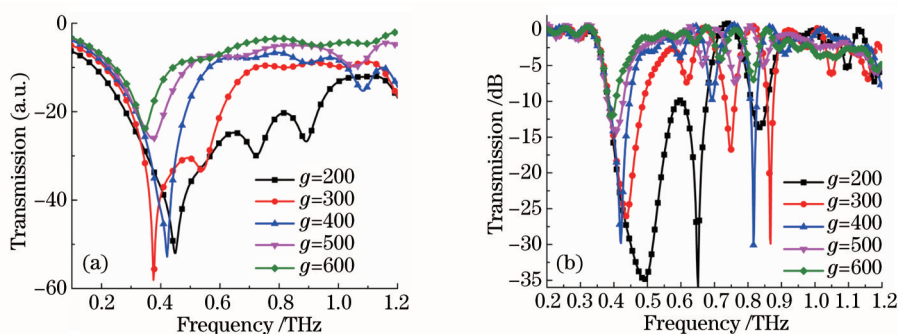


图5 二维等离子体晶体波导的传输光谱。(a) 功率透射率谱实验结果; (b) 功率透射率谱模拟结果

Fig.5 Transmission spectrum of the two-dimensional plasmonic crystal waveguide. (a) Experimental results in power transmittance; (b) simulative results in power transmittance

4 结 论

研究了两种等离子体晶体波导的传输性质,得出以下结论:通过调节等离子体晶体波导中空气间隙的大小,可以使得波导带隙发生连续移动,从而有效地调节该波导的传输性质,实现光开关和连续可调谐滤波器的功能。对于设计的一维等离子体晶体波导滤波器,其阻带宽度可达 90 GHz 以上,当空气间隙在 100~250 μm 之间变化时,可以实现阻带中心频率在 0.47~0.6 THz 之间的主动调谐,消光比达到了 30 dB。当空气间隙在 200~600 μm 之间变化时,所设计的二维等离子体晶体波导滤波器可以实现阻带中心频率在 0.34~0.45 THz 之间的主动调谐,消光比可达 40 dB。这种主动调控的方法为太赫兹功能器件的设计提供了一种新的思路,并且该操控方法灵活易实现,在太赫兹波段的功能器件设计中具有广泛的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei, *et al.*. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2213-2233.
姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213-2233.
- 2 Jian Yangtian, Wang Zhi, Lin Qing, *et al.*. All optical frequency multiplication technology based on terahertz optical asymmetric demultiplexer[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205002.
简阳天, 王智, 林青, 等. 基于太赫兹光非对称解复用器的全光倍频技术[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205002.
- 3 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen, *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2853-2858.
杨昆, 赵国忠, 梁承森, 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2853-2858.
- 4 Wang Dayong, Huang Haochong, Zhou Xun, *et al.*. Phase-contrast imaging by the continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0809003.
王大勇, 黄昊翀, 周逊, 等. 连续太赫兹波同轴数字全息相衬成像[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0809003.
- 5 Du S, Li H, Xie L, *et al.*. Vibrational frequencies of anti-diabetic drug studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(14): 143702.
- 6 Kou Kuan, Zhao Guozhong, Liu Ying, *et al.*. Simultaneously determinations of sample thickness and refractive index by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0815001.
寇宽, 赵国忠, 刘英, 等. 利用太赫兹时域光谱同时确定样品厚度和折射率[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0815001.
- 7 Nagel M, Bolivar P, Brucherseifer M, *et al.*. Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(1): 154-156.
- 8 Jia Yan, Chen Sijia, Li Ning, *et al.*. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using back propagation neural networks[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 719-722.
贾燕, 陈思嘉, 李宁, 等. 利用误差逆传播神经网络法识别几种毒品的太赫兹光谱[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 719-722.
- 9 Dong Jie, Li Yanfeng, Shu Li, *et al.*. Study of photo-induced phase transition of VO_2 films with high modulation by time-domain spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0111001.

- 董 杰, 栗岩峰, 束 李, 等. 高调制度光致相变特性氧化钒薄膜太赫兹时域频谱研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0111001.
- 10 Hou Yu, Fan Fei, Wang Xianghui, *et al.*. Broadband tuning multifunctional photonic crystal fiber for terahertz device[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s111004.
- 侯 宇, 范 飞, 王湘辉, 等. 宽带调谐光子晶体光纤多功能太赫兹器件[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s111004.
- 11 Fan F, Chen S, Wang X H, *et al.*. Tunable nonreciprocal terahertz transmission and enhancement based on metal/magneto-optic plasmonic lens[J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8614–8621.
- 12 Fan F, Guo Z, Bai J J, *et al.*. Magnetic photonic crystals for terahertz tunable filter and multifunctional polarization controller[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(4): 697–702.
- 13 Fan F, Gu W H, Wang X H, *et al.*. Real-time quantitative terahertz microfluidic sensing based on photonic crystal pillar array[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(12): 121113.
- 14 Lee E S, So J K, Park G S, *et al.*. Terahertz band gaps induced by metal grooves inside parallel-plate waveguides[J]. Opt Express, 2012, 20(6): 6116–6123.
- 15 Liang Lanlu, Jin Biaobing, Zhang Qiuyi, *et al.*. Extraordinary transmission through fractal-featured metallic and superconducting films at terahertz frequency[J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(11): 114101.
- 16 Sobnack M, Tan W, Wanstall N, *et al.*. Stationary surface plasmons on a zero-order metal grating[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(25): 5667–5670.
- 17 Mendis R, Grischkowsky D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses[J]. Opt Lett, 2001, 26(11): 846–848.
- 18 Mendis R. Nature of subpicosecond terahertz pulse propagation in practical dielectric-filled parallel-plate waveguides[J]. Opt Lett, 2006, 31(17): 2643–2645.
- 19 Mendis R, Mittleman D. Comparison of the lowest-order transverse-electric (TE₁) and transverse-magnetic (TEM) modes of the parallel-plate waveguide for terahertz pulse applications[J]. Opt Express, 2009, 17(17): 14839–14850.
- 20 Fan F, Li W, Gu W H, *et al.*. Cross-shaped metal-semiconductor-metal plasmonic crystal for terahertz modulator[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2013, 11(1): 48–54.
- 21 Yuan Cai, Xu Shilin, Yao Jianquan, *et al.*. Tunable ultra-wideband terahertz filter based on three-dimensional arrays of H-shaped plasmonic crystals[J]. Chin Phys B, 2014, 23(1): 018102.
- 22 Ulbricht R, Hendry E, Shan J, *et al.*. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy[J]. Rev Mod Phys, 2011, 83(2): 543.
- 23 Gerhard M, Theuer M, Beigang R. Coupling into tapered metal parallel plate waveguides using a focused terahertz beam[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(4): 041109.
- 24 Lee Y S. Principles of terahertz science and technology[M]. New York: Springer, 2009.

栏目编辑: 张浩佳