

# 飞秒激光微加工制备大尺寸无衬底太赫兹线栅偏振器

陈盈, 王杰, 高焘, 朱伟林, 王向峰, 黄峰\*

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 基于有限差分域方法(FDTD),设计了两种具有增强线结构的太赫兹线栅偏振器,用于消除重力和空气扰动对偏振器性能的影响;利用飞秒激光微加工制备了偏振器,通过时域太赫兹光谱测试偏振器的性能,并将其与商用线栅偏振器进行了比较,发现偏振器的透射率与 FDTD 结果吻合,具有不连续增强线的偏振器的偏振度和消光比优于商用线栅偏振器。

**关键词** 激光光学; 偏振器; 太赫兹; 飞秒激光微加工; 有限差分域方法

中图分类号 TN629.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111424

## Fabrication of Large-Scale Free-Standing Terahertz Wire Grid Polarizer by Femtosecond Laser Micro-Machining

Chen Ying, Wang Jie, Gao Tao, Zhu Weilin, Wang Xiangfeng, Huang Feng\*

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

**Abstract** Based on the finite-difference time-domain (FDTD) method, two kinds of terahertz line grid polarizers with enhanced line structures are designed to eliminate the influences of gravity and air disturbance on the performance of polarizers. The polarizers are fabricated by femtosecond laser micro-machining. The performance of polarizers is measured by time-domain terahertz spectroscopy and is compared with that of a commercial line grid polarizer. It is found that the transmittance of the polarizers is consistent with FDTD results. The degree of polarization and extinction ratio of the polarizer with discontinuous enhancement lines are better than that of commercial line grid polarizers.

**Key words** laser optics; polarizer; terahertz; femtosecond laser micro-machining; finite-difference time-domain method

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

## 1 引言

线栅偏振器(WGPs)已经被广泛使用在红外波段<sup>[1]</sup>。WGPs 主要由周期性排列的平行金属线组成,具有高透射率、较宽的工作带宽等特征,因此通常用作光学偏振器或分束器<sup>[2]</sup>。关于 WGPs 的工作原理,最常见的解释是基于垂直于金属线的电子的受限运动<sup>[1]</sup>。如果入射波是线偏振且与线栅平行,则传导电子将沿线长方向不受限制地运动。在 Ewald-Oseen 的图像中<sup>[3]</sup>,相干激发的电子会产生

正向及反向的传播波,由此可知,偏振方向与线栅平行的入射波将没有能量向前传播,而偏振方向与线栅垂直的入射波几乎无损耗地透过,从而实现偏振传输。

目前,研究人员使用不同的方法开发出了各种各样的太赫兹 (THz) 偏振器,如液晶偏振器(LCPs)<sup>[4-6]</sup>、布儒斯特角偏振器(BAPs)、WGPs<sup>[7-11]</sup>和碳纳米管偏振器(CNPs)<sup>[12-15]</sup>。从总体上看,LCPs 具有较好的性能,但是插入损耗较高且工作频带狭窄,而 BAPs 的使用受到指定入射角的限制。

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-03-29; 录用日期: 2020-04-04

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(K201708)、福州科技局项目(2018-G-35)

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

WGP 是使用最为广泛的偏振器,它可以通过精密加工<sup>[7]</sup>、光刻<sup>[8-10]</sup>或者机械加工方法制备<sup>[11]</sup>。商业无衬底 WGP 是通过将钨丝缠绕在框架结构上制成的,具有高透射率和高消光比的特性<sup>[7]</sup>。但是,这种偏振器制造昂贵且易损坏。光刻方法需要经历几个步骤,如涂胶、掩模、曝光等,因此通常需要使用基底,由此引起了插入损耗和 Fabry-Pérot 干涉。CNP 由 Ren 等<sup>[12]</sup>提出,采用高度一致的纳米管阵列并将几层样品堆叠起来可以提高极化度和消光比<sup>[13]</sup>。此外,通过选取碳纳米管纤维并利用卷绕法也可以制造 CNPs<sup>[14-15]</sup>。然而 CNPs 的性能并没有优于其他方法制造出的太赫兹偏振器,其成本比较昂贵。最近,基于超表面和狄拉克半金属的器件在操控太赫兹方面展现了一些独特的优势,引起了人们的极大关注<sup>[16-21]</sup>。

随着超快激光放大器的发展,飞秒激光微加工 (FLM) 技术为制备 THz 器件提供了另一种选择。FLM 已用于制造 THz 带通滤波器<sup>[22-23]</sup>、THz 谐振器<sup>[24]</sup>、THz 菲涅耳透镜<sup>[25]</sup>、光子带隙结构<sup>[26]</sup>和极化结构<sup>[27]</sup>等。原则上,FLM 也可用于制造无衬底 WGP。但是,线栅及其周期性容易受到重力和空气干扰的影响,这可能会导致长金属线之间的缠绕和周期不均匀现象,因此大尺寸偏振器的制造受到限制。

本文利用 FLM 在 10  $\mu\text{m}$  厚的铝箔上制造大面

积线栅结构,提出并制造了两种增强结构,以扩大 WGP 的尺寸,通过有限差分时间域 (FDTD) 方法模拟了 WGP 的性能,结合 THz 时域光谱系统进行了实验测试,并与商用 WGP 进行了比较,实验结果与 FDTD 仿真结果吻合。

## 2 样品制备

详细的样品制备过程和 FLM 系统参见参考文献<sup>[22]</sup>。铝箔厚度为 10  $\mu\text{m}$ ,飞秒激光的波长为 800 nm,脉冲宽度为 45 fs,重复频率为 1 kHz。将铝箔放在计算机控制的二维精密平移台上,该平移台的移动速度为 500  $\mu\text{m}/\text{s}$ ,加速度为 500  $\mu\text{m}/\text{s}^2$ ,使用的激光功率为 10 mW。为了确保高质量的大面积加工,按照以下步骤制备样品(图 1):1) 将一些弱挥发性的溶液(如液体肥皂或食用油)滴到特氟龙基材的表面,然后将铝箔贴到基板上以抑制重力和气流的影响,从而确保加工表面足够平坦;2) 使用 FLM 制备周期性线栅结构,使线之间保持短连接,从而使 WGP 的线栅间距固定,避免长线之间的缠绕;3) 将样品框架粘到铝箔上,然后将包括特氟龙基材、铝箔和样品框架在内的整个组件放入溶剂中,并浸入水中 20 min,直到除去特氟龙基底为止。最终获得了 THz 波段的 WGP,整个样品的加工面积为 3 cm  $\times$  3 cm。

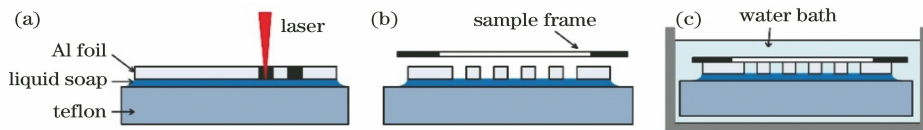


图 1 样品制备过程

Fig. 1 Procedure of sample preparation

制造了两种具有不同增强线结构的样品。图 2 显示了具有不连续增强线的样品 1[图 2(a)]、具有连续增强线的样品 2[图 2(b)]和商用 WGP 的样品

3[图 2(c)]的显微图像。图 2(a)和(b)中的插图为 WGP 设计方案,黑色代表剩余的金属,白色代表通过激光烧蚀去除的区域。对于样品 1 和 2,线栅的周

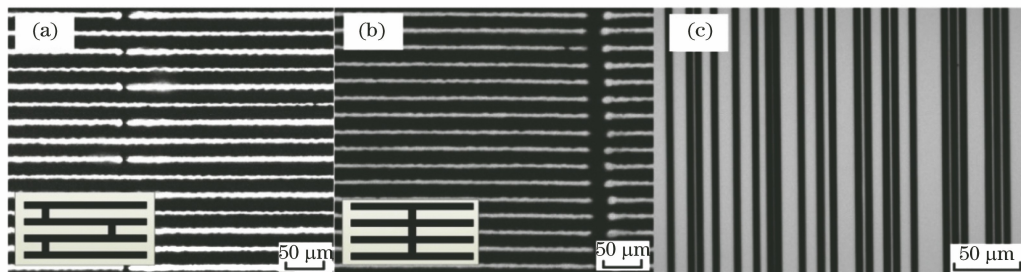


图 2 样品显微图。(a)具有不连续增强线的样品 1 显微图像;(b)具有连续增强线的样品 2 显微图像;(c)商用 WGP 的显微图像。图 2(a)和 2(b)中插图为 WGP 设计图

Fig. 2 Micrographs of samples. (a) Micrograph of sample 1 with discontinuous reinforced lines; (b) micrograph of sample 2 with continuous reinforced lines; (c) micrograph of commercial WGP. Insets in Figs. 2(a) and 2(b) show WGP designs

期和宽度分别为  $35\ \mu\text{m}$  和  $20\ \mu\text{m}$ 。增强线的间距为  $1000\ \mu\text{m}$ 。样品 3 是通过将钨丝缠绕在 2 inch ( $1\ \text{inch}=2.54\ \text{cm}$ ) 圆形框架结构上的商业化 WGP, 钨丝直径为  $10\ \mu\text{m}$  且周期为  $25\ \mu\text{m}$ 。可以看出, 商用 WGP 具有不均匀的周期性, 而带有 FLM 的增强线的 WGP 的周期则相对均匀。

### 3 仿真及测试结果

在 FDTD 仿真中, 设置偏振所在平面的边界为周期性边界条件, 并且垂直方向为完美匹配层。采用的材料是铝 (Al), 等离子体频率为  $2.24 \times 10^{16}\ \text{rad/s}$ , 阻尼系数为  $1.12 \times 10^{14}\ \text{rad/s}^{[22]}$ 。基于采用光学显微镜测量的几何参数进行 FDTD 模

拟, 入射太赫兹波垂直于线栅平面。图 3 显示了 WGP 在不带增强线[图 3(a)]、带有不连续增强线[图 3(b)]和带有连续增强线[图 3(c)]且在 THz 极化与线栅方向之间角度 ( $\theta$ ) 变化时的透射率谱线。可以看到, 通过使用不连续的增强线可将带有连续增强线的 WGP 的透射率曲线显示出的波浪型谱线特征基本消除。带有不连续增强线的 WGP 的传输特性与不带有增强结构的 WGP 相似。图 3(c) 中传输曲线上的波浪是由从线栅结构转换到周期性长矩形而增加的允许传输的波导模式所导致的<sup>[28-29]</sup>。因此, 重点研究具有不连续增强线的 WGP (样品 1), 并将其性能与商用 WGP (样品 3) 的性能进行比较。

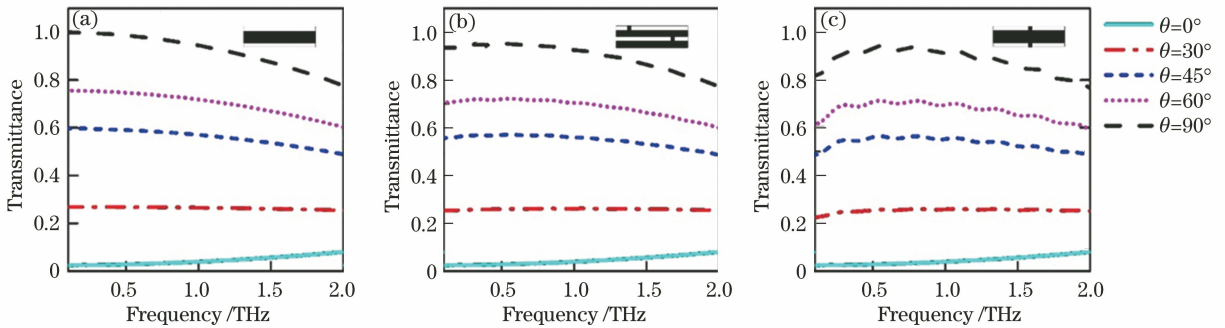


图 3 FDTD 仿真得到的不同样品在入射 THz 波偏振方向与线栅夹角 ( $\theta$ ) 变化时的透射率谱线。(a) 不带任何增强线结构; (b) 带有不连续增强线结构; (c) 带有连续增强线结构

Fig. 3 Transmittance for different samples varying with angle  $\theta$  between polarization direction of incident THz wave and line grating simulated by FDTD. (a) Without reinforced lines; (b) with discontinuous reinforced lines; (c) with continuous reinforced lines

利用自主搭建的时域太赫兹系统对偏振器样品进行性能表征<sup>[28]</sup>。飞秒激光光束由分光镜分为泵浦光和探测光, 泵浦光经过透镜后聚焦在非线性晶体 ZnTe 上, 在光整流效应下得到太赫兹时域脉冲信号。太赫兹信号为线偏振, 经过两个离轴抛物面镜传输并聚集后垂直入射到样品上, 后经另外两个离轴抛物面镜与探测光同时会聚在探测晶体 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后形成两束偏振状态相互垂直的线偏振光, 最后被差分探测器探测。通过调节泵浦光和探测光的光程差, 可以扫描出太赫兹脉冲的时域波形。为了消除水蒸气吸收对频谱的影响, 太赫兹系统全面密封并冲入干燥氮气。将样品安装在旋转平台上, 以改变 THz 偏振方向和线栅径向之间的夹角 ( $\theta$ )。在另外一块铝箔上切一个空孔, 该孔的大小与样品图案化区域的大小相同, 将其作为参考样品。分别测量 WGP 样品和参考样品的 THz

时域信号, 然后利用快速傅里叶变换 (FFT) 获得其 THz 电场强度频谱 (图 4)。图 5 为计算得到的功率透射率  $T_p(f)$ , 其计算式为

$$T_p(f) = [ |E_{\text{sample}}(f)| / |E_{\text{ref}}(f)| ]^2, \quad (1)$$

式中:  $f$  是太赫兹频率;  $E_{\text{sample}}(f)$  和  $E_{\text{ref}}(f)$  分别是样品信号和参考信号的电场强度。

为了进一步说明偏振器的性能, 计算了样品 1 和样品 3 的消光比 (ER) 以及偏振度 (DOP), 其计算式分别为

$$R_{\text{er}} = 10 \log(T_{\perp} / T_{\parallel}), \quad (2)$$

$$R_{\text{Dop}} = [(T_{\perp} - T_{\parallel}) / (T_{\perp} + T_{\parallel})], \quad (3)$$

式中:  $T_{\parallel}$  是平行情况下的透射率 ( $\theta = 0^\circ$ );  $T_{\perp}$  是垂直情况下的透射率 ( $\theta = 90^\circ$ )。图 6(a) 和 (b) 分别显示了样品 1 和样品 3 的消光比和偏振度, 以及样品 1 的 FDTD 模拟结果。可以看出, 样品 1 的消光比和偏振度与 FDTD 仿真结果一致, 而且在测量频率范围内其消光比比商业偏振片的消光比高 20 dB 左右, 而其偏振度接近 1, 高于商业偏振片。

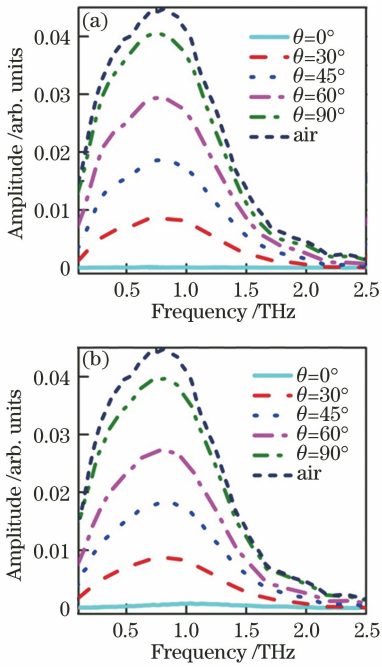


图 4 测量得到的样品在不同  $\theta$  下的太赫兹频谱。

(a) 样品 1; (b) 样品 3

Fig. 4 Measured THz spectra of samples at different  $\theta$ .

(a) Sample 1; (b) sample 3

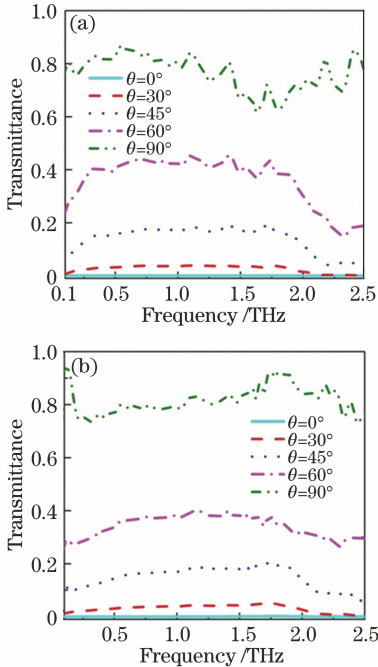


图 5 计算得到的样品在不同  $\theta$  下的透射率谱线。

(a) 样品 1; (b) 样品 3

Fig. 5 Simulated transmittance of samples at different  $\theta$ .

(a) Sample 1; (b) sample 3

## 4 结 论

将增强线用于太赫兹线栅偏振器设计中,通过

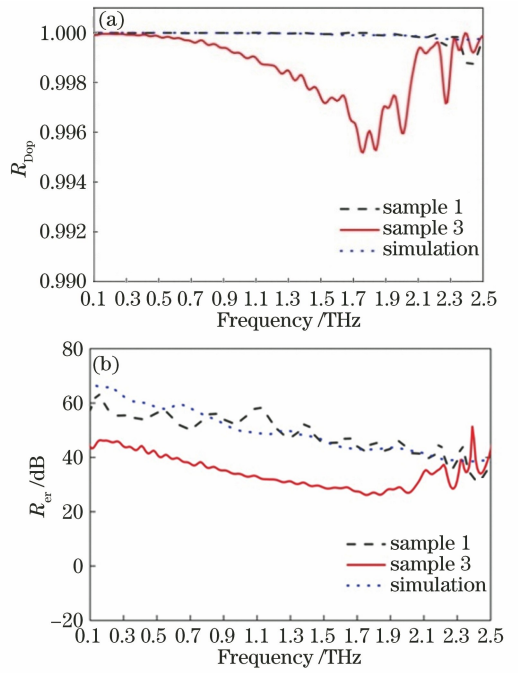


图 6 样品 1 和样品 3 的消光比( $R_{er}$ )和偏振度( $R_{Dop}$ )。

(a) 偏振度; (b) 消光比

Fig. 6 Degree of polarization ( $R_{Dop}$ ) and extinction ratio ( $R_{er}$ ) of samples 1 and 3. (a) Degree of polarization; (b) extinction ratio

FLM 在  $10 \mu\text{m}$  铝箔上制造了两种大面积 WGP, 通过 FDTD 对 WGP 进行了仿真, 并利用时域太赫兹光谱系统对其进行表征。实验结果表明, 在测量的频率范围内, 具有不连续增强线的 WGP 的消光比比商业偏振片高 20 dB, 偏振度接近 1, 其性能优于商业偏振片。

## 参 考 文 献

- [1] Hecht, E. Optics[M]. 3rd ed. New York: Addison-Wesley Longman, 1998: 327-328.
- [2] Yu X J, Kwok H S. Optical wire-grid polarizers at oblique angles of incidence [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(8): 4407-4412.
- [3] Mansuripur M. The Ewald: oseen extinction theorem [J]. Optics and Photonics News, 1998, 9(8): 50-55.
- [4] Hsieh C F, Lai Y C, Pan R P, et al. Polarizing terahertz waves with nematic liquid crystals [J]. Optics Letters, 2008, 33(11): 1174-1176.
- [5] Ho I C, Pan C L, Hsieh C F, et al. Liquid-crystal-based terahertz tunable Solc filter [J]. Optics Letters, 2008, 33(13): 1401-1403.
- [6] Wojdyla A, Gallot G. Brewster's angle silicon wafer terahertz linear polarizer [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14099-14107.



- [7] 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.
- [8] 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*, 2016, 8(1): 1-6.
- [9] Ferraro A, Zografopoulos D C, Missori M, et al. Flexible terahertz wire grid polarizer with high extinction ratio and low loss [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2009-2012.
- [10] Deng L Y, Teng J H, Zhang L, et al. Extremely high extinction ratio terahertz broadband polarizer using bilayer subwavelength metal wire-grid structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(1): 011101.
- [11] Yamada I, Takano K, Hangyo M, et al. Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 274-276.
- [12] Ren L, Pint C L, Booshehri L G, et al. Carbon nanotube terahertz polarizer [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(7): 2610-2613.
- [13] 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.
- [14] Zubair A, Tsentelovich D E, Young C C, et al. Carbon nanotube fiber terahertz polarizer [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 141107.
- [15] 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.
- [16] Dai L L, Zhang Y P, Guo X H, et al. Dynamically tunable broadband linear-to-circular polarization converter based on Dirac semimetals [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(10): 3238-3249.
- [17] Dai L L, Zhang Y P, Zhang H Y, et al. Broadband tunable terahertz cross-polarization converter based on Dirac semimetals [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(7): 075003.
- [18] Dai L L, Zhang Y P, O'Hara J F, et al. Controllable broadband asymmetric transmission of terahertz wave based on Dirac semimetals [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35784-35796.
- [19] Tian Y S, Guo X H, Dai L L, et al. Broadband tunable terahertz polarizers based on Dirac semimetal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614033.
- [20] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614016.  
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614016.
- [21] Li Y H, Zhou L, Zhao G Z. Terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0314001.  
李永花, 周璐, 赵国忠. 基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0314001.
- [22] 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.
- [23] Lee J, Seo M, Park D, et al. Shape resonance omnidirectional terahertz filters with near-unity transmittance [J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1253-1259.
- [24] Ward D W, Beers J D, Feurer T, et al. Coherent control of phonon-polaritons in a terahertz resonator fabricated with femtosecond laser machining [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2671-2673.
- [25] 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.
- [26] Kiriakidis G, Katsarakis N. Fabrication of 2-D and 3-D photonic band-gap crystals in the GHz and THz regions [J]. *Materials Physics and Mechanics*, 2000, 1(1): 20-26.
- [27] Ward D W, Stutz E R, Nelson K A. Fabrication of polaritonic structures in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> using femtosecond laser machining [J]. *Applied Physics A*, 2006, 86(1): 49-54.
- [28] Mary A, Rodrigo S G, Martín-Moreno L, et al. Theory of light transmission through an array of rectangular holes [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(19): 195414.
- [29] Garcia-Vidal F J, Martín-Moreno L, Ebbesen T W, et al. Light passing through subwavelength apertures [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(1): 729-787.