

飞秒贝塞尔光束直写铌酸锂高深径比光子晶体结构

孙伟高^{1,2}, 季凌飞^{1,2*}, 郑锦灿^{1,2}, 温亚楠^{1,2}, 王冠强^{1,2}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²北京工业大学跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 具有深微孔结构的铌酸锂晶体可以成为具有优良光波选择性调制功能的光子晶体器件。然而,目前使用的聚焦离子束刻蚀、化学刻蚀或常规激光制孔等方法很难获得光子晶体所需的高深径比微孔。本文基于飞秒脉冲高峰值功率、超短脉宽的基本特点,通过对光束进行贝塞尔整形以及对光束与铌酸锂晶体的相互作用进行调控和研究,用飞秒单脉冲在铌酸锂晶体内部一步制备出深径比约为 700:1 的大面积均匀微孔阵列。测试结果表明,设计并制备的高深径比微孔阵列光子晶体结构对 450~510 nm 波长范围内的光束具有明显的选择透过性。

关键词 激光技术; 超快激光; 贝塞尔光束; 铌酸锂; 深径比; 光子晶体

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002503

1 引言

光子晶体是一种在光学尺度上具有周期性介电结构的材料,可以产生被称为光子带隙的“禁止”频率。通过人为地对晶体内部结构进行设计和制备,可以实现不同的禁止频率,达到操纵和控制光子的目的^[1-2]。基于这种特性,光子晶体被广泛应用于信息传输以及光电器件集成领域。目前,用于制备光子晶体的主要材料包括半导体、氧化物晶体、玻璃以及高分子聚合物^[3-4]。其中,铌酸锂晶体以其优异的非线性光电特性脱颖而出,对该材料的微孔结构和周期阵列进行设计,可以使其成为一种极具吸引力的光子晶体^[5]。然而,铌酸锂晶体的硬度高,且化学性质不活泼,传统的机械或化学方式很难实现该材料光子晶体所需微孔结构的制备。聚焦离子束(FIB)刻蚀技术是目前制备铌酸锂晶体纳米微孔的主流加工手段^[6-7],但在 FIB 微孔制备过程中,被去除的样品易发生再沉积,导致微孔深度有限且侧壁不够陡直。有限的微孔深度限制了光波与光子晶体结构之间的耦合,降低了器件的功能性。因此,探寻

一种高效可靠的高深径比微孔结构铌酸锂光子晶体制备方法具有重要意义^[8]。

飞秒激光具有超短的脉冲宽度和超高的峰值功率,理论上可以在任意材料表面进行加工,而且可以有效减小加工过程的热影响,提高加工精度^[9-11]。近年来,不少学者已经利用飞秒激光实现了铌酸锂晶体中多种微结构的加工^[12-13]。如:华东师范大学的程亚团队^[14]利用飞秒激光成功地在铌酸锂表面获得了划刻深度为 110 μm 的沟槽,并在沟槽中嵌入微型电极,调控晶体内部的电场分布;山东大学的陈峰团队^[15]采用飞秒激光对铌酸锂晶体内部进行刻蚀,成功制备出传输损耗仅为 0.5 dB/cm 的包层波导。然而,目前采用飞秒激光实现铌酸锂晶体高深径比微孔结构的加工仍是一个挑战。这主要是由于为了实现飞秒激光高斯光束焦点区域极高的峰值功率,通常会将其焦场的瑞利长度限制在 10 μm 的尺度内,在直接使用高斯光束飞秒激光进行微孔加工时,为了获得更高的深径比,多采用连续脉冲配合焦点移动加工单孔再平移扫描加工后续单孔的制备方法^[16-17]。然

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51975017)、北京市教委重点科研项目(KZ202110005012)、国家重点研发计划(2018YFB1107500)

通信作者: *ncltji@bjut.edu.cn

而,这种方法先形成的微结构与材料的喷溅都会对后续脉冲的加工产生难以预测的影响,极易造成深微孔堵塞,制孔深度依然有限且加工效率不高,难以满足器件批量生产的需求。

贝塞尔光束由 Durnin 等^[18]于 1986 年首次提出,其独特的空间光场强度分布可以有效调节瞬态局域电子密度的分布,形成狭长、均匀的相互作用区。同时,贝塞尔光束自身的“自修复”特性,使其在材料内部传播时具有很强的鲁棒性,能够有效抵抗非线性畸变,保持光场稳定^[19-20]。这些特性使得贝塞尔光束在进行高深径比结构加工时具有不可比拟的优势^[21-23]。

本研究团队使用整形后的飞秒贝塞尔光束对铌酸锂晶体进行加工,通过对加工工艺进行优化探索及机制分析,成功实现了大面积、高深径比微孔阵列的一步制备,对未来铌酸锂光子晶体器件的制备具有重要的指导意义。

2 实 验

本研究所用飞秒贝塞尔光束光子晶体结构直写装置的架构如图 1 所示。实验所用光源为武汉华日精密激光股份有限公司(Huaray Laser)生产的波长为 1035 nm 的飞秒激光器,激光脉冲宽度为 350 fs,重复频率为 1 Hz~800 kHz,光束质量 M^2 为 1.17。激光器输出的原始高斯光束通过扩束镜后平行入射至底角为 2° 的锥透镜产生第一区贝塞尔光束。由锥透镜产生的第一区贝塞尔光束空间尺度较大且能量较为发散,无法直接用于高精度加工。通过聚焦镜(焦距约为 8 mm,数值孔径为 0.45)对光束进行空间尺度压缩,整形后最终输出的贝塞尔光束直径约为 $2\ \mu\text{m}$ 。实验样品为 0.5 mm 厚的 Z 切铌酸锂,样品依次采用乙醇溶液和去离子水进行超声清洗,然后固定于三维移动平台上用于光束直写实验。为了保证实验的一致性,所有样品均选择 +Z 面作为激光入射面。

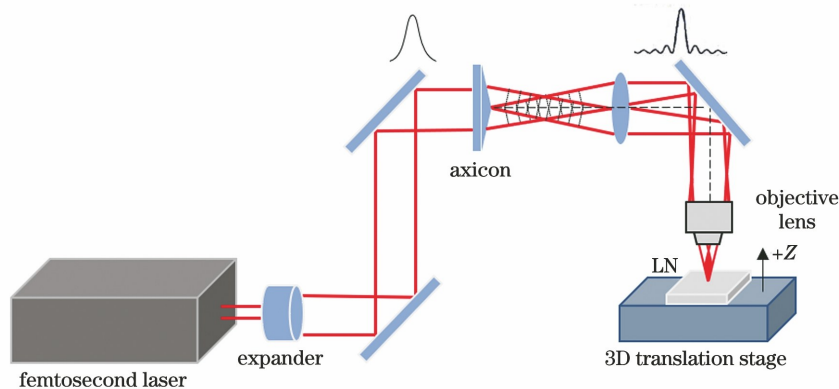


图 1 飞秒贝塞尔光束直写装置架构图(LN: 铌酸锂)

Fig. 1 Sketch of femtosecond Bessel beam direct writing device (LN: LiNbO_3)

微孔阵列直写过程如图 2 所示。通过控制激光重复频率 f 及平台移动速度 v ,在无间歇动态扫描过程中实现飞秒激光单脉冲连续加工,一步完成微

孔阵列的制备。其中,横向间隔 H 由激光重复频率 f 和扫描速度 v 共同决定($H = v/f$),纵向间距 L 由行扫描间隔决定。

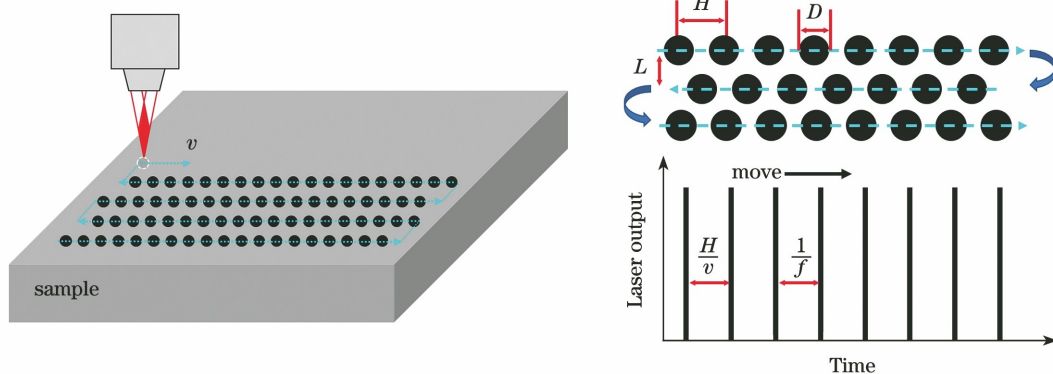


图 2 微孔阵列制备示意图

Fig. 2 Schematic of microholes array fabrication

微孔阵列制备完成后,采用激光共聚焦显微镜(Olympus OLS-3100)以及偏光显微镜(LEICA DM 2700 P)表征微孔出入口的形貌。使用偏光显微镜(LEICA DM 2700 P)和扫描电子显微镜(SU8020)对微孔截面进行观测。使用光谱仪(Oceanhood XS11639-350-1000)对微孔阵列的透射光谱进行测量。本研究中的所有实验数据均进行3次测量,以保证测量的准确性。

3 实验结果

将贝塞尔光束焦点的中心区域调节至铌酸锂晶体的上表面,设置激光脉冲频率 f 为 200 Hz,平台移动速度 v 为 1 mm/s,微孔阵列纵向间隔为 5 μm ,调节激光平均功率分别为 0.29, 0.62, 0.76, 1.14 mW,进行微孔阵列结构的制备。图 3(a)~(d)所示为不同平均功率激光直写铌酸锂晶体的微孔入口形貌以及对应的截面形貌。由图可知激光平

均功率对铌酸锂微孔形貌具有显著影响,关系到最终周期性结构的加工质量。当激光平均功率为 0.29 mW 时,微孔深度约为 261 μm ,入口直径仅为 1.1 μm ,材料内部微孔的平均直径约为 0.48 μm ;当激光平均功率增大至 1.14 mW 时,微孔深度增加至 347 μm ,入口直径增加至 1.7 μm 左右,材料内部微孔的平均直径增加至 1.1 μm 。可见,随着激光平均功率的增加,微孔的入口径向尺寸、平均直径及深度均增大。这说明了激光工艺参数对微孔形貌的可控性。值得注意的是,虽然激光平均功率的增大可使微孔直径和深度均增加,但微孔的深径比却下降。这说明激光平均功率的增加对微孔平均直径的影响要大于对微孔深度的影响,因此,低功率的单脉冲贝塞尔光束更有利于获得高深径比的微孔。当激光平均功率为 0.29 mW 时,单脉冲贝塞尔光束半个焦点区域所能形成的最大深径比约为 541 : 1。

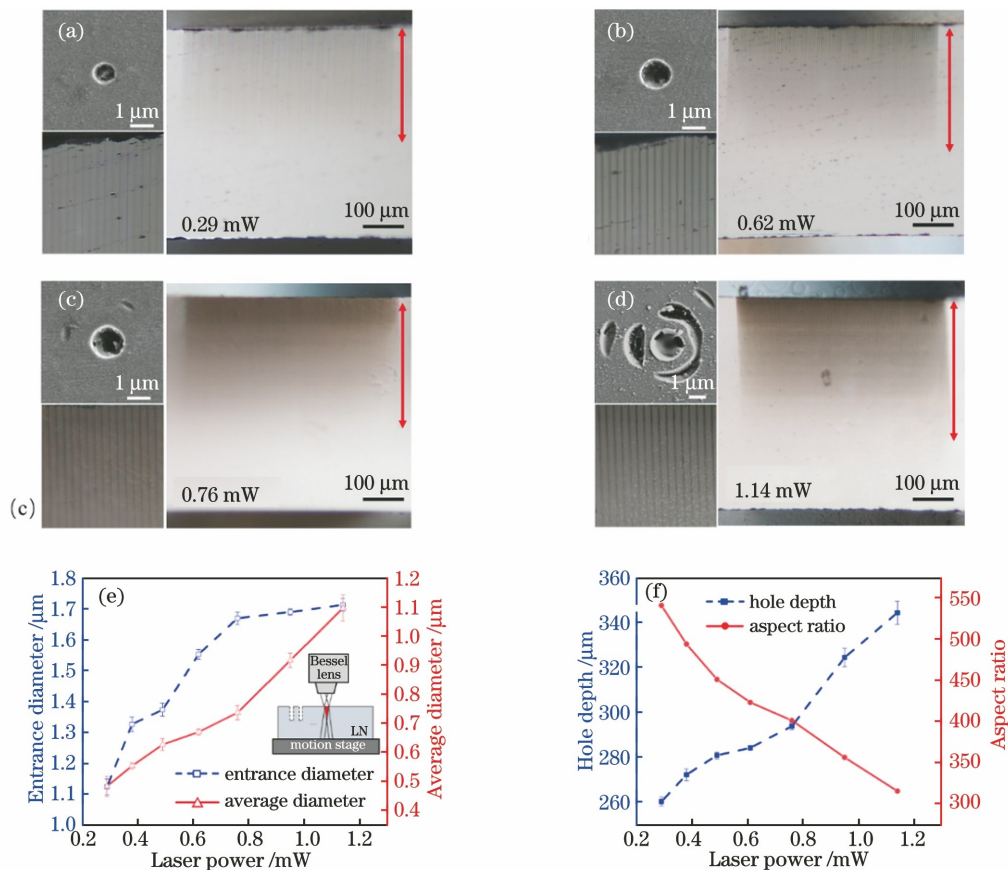


图 3 激光平均功率对微孔形貌特征的影响。(a)~(d)激光平均功率分别为 0.29, 0.62, 0.76, 1.14 mW 时,微孔入口及其对应的截面形貌;(e)激光平均功率对微孔入口直径和平均直径的影响;(f)激光平均功率对微孔深度及深径比的影响

Fig. 3 Influence of average laser power on microholes morphological characteristics. (a)~(d) Images of microhole entrance and corresponding cross-section at average laser power of 0.29, 0.62, 0.76, and 1.14 mW, respectively; (e) influence of average laser power on entrance diameter and average diameter of microhole; (f) influence of average laser power on depth and aspect ratio of microhole

区别于传统的高斯光束,贝塞尔光束通常以一系列同心环的形式存在。实验所用贝塞尔光束的电场分布可由零阶贝塞尔函数(J_0)进行定义,它可以看作是平面波与所属圆锥形表面波矢量干涉形成的^[24],即

$$E(r, \varphi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_0(k_r r), \quad (1)$$

式中: r 和 φ 分别表示横向坐标和极坐标; z 表示传播方向的坐标; k_z 和 k_r 分别为纵向及横向波矢量; A_0 表示振幅。

正是基于这种波阵特点,贝塞尔光束才具有超长的景深及优异的自修复能力,但贝塞尔光束主瓣周围的圆环同样携带光束能量,因此其空间分辨率及能量利用率有所降低。如图3所示,随着激光平均功率从0.29 mW增加至0.62 mW,贝塞尔光束仅在材料表面形成尺寸逐渐增大的主瓣刻蚀,未观察到贝塞尔光束旁瓣的影响。当激光平均功率增加至0.76 mW时,贝塞尔光束首次在铌酸锂表面出现旁瓣刻蚀;随着激光能量进一步增加,旁瓣相应获得更高的能量,当激光平均功率增大至1.14 mW时,铌酸锂表面已出现明显的同心圆环图样的刻蚀,这无疑增大了单脉冲贝塞尔光束在材料表面的作用区域。当微孔阵列横向或纵向间隔小于旁瓣刻蚀区域时,相邻脉冲作用区域发生重叠,导致器件性能直接降低甚至损坏。因此,对于贝塞尔微孔阵列的制备,激光能量与阵列参数之间的匹配尤为重要。

基于上述激光参数的优化,将平均功率设为0.76 mW,孔间距设为6 μm ,根据式(2)所示的锥透镜变换后的高斯-贝塞尔光束光强分布公式^[24],以及式(3)所示的光束传播角 β 的菲涅耳公式^[22],对实验用透镜聚焦后的贝塞尔光束在样品中的强度分布进行模拟分析,模拟结果如图4所示。

$$I(r, z) = 2k\pi(\tan\beta)^2 z \exp\left[\frac{-2(\tan\beta)^2}{w_1^2}\right] \times J_0^2(kr \tan\beta), \quad (2)$$

$$\beta = \alpha \frac{\sin\{\sin[\sin(n_{ax} - 1)\alpha]N\}}{n_s}, \quad (3)$$

式中: N 为光学系统的放大倍数; w_1 为经过光学系统衰减后等效的高斯入射半径($w_1 = w_0/N$, w_0 为入射高斯光束的半径); k 为波矢量; α 为锥透镜楔角; n_{ax} 为锥透镜折射率; n_s 为样品折射率。

分析得出聚焦后的贝塞尔光束的焦深约为600 μm ,大于实验所用铌酸锂材料的厚度(约为500 μm),因此理论上可以通过调节光束和材料的相对位置使铌酸锂材料完全处于贝塞尔光束的焦点

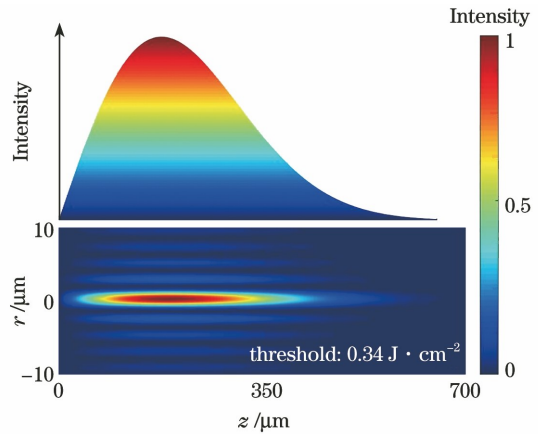


图4 聚焦后的贝塞尔光束的强度分布模拟图
Fig. 4 Simulation of intensity distribution of Bessel beam after focusing

区域内。通过电机控制三维移动平台在 Z 轴方向升降,将贝塞尔光束焦点的中心区域逐步从样品上表面移至下表面,获得直写微孔阵列,如图5所示。将贝塞尔光束焦点中心区域距样品上表面的距离记为 ΔZ 。当 $\Delta Z = 0$ 时,贝塞尔光束焦点的中心区域位于铌酸锂上表面。此时微孔在距上表面261 μm 的范围内生成,与贝塞尔光束模拟结果吻合,约为贝塞尔光束模拟所得焦深的一半。在样品的上表面可以观察到明显的微孔入口,且部分微孔周围存在一级同心圆环旁瓣,而样品下表面无明显的孔迹。随着光束相对样品上表面下移40 μm ,铌酸锂内部的微孔深度延长约80 μm ,约为光束移动距离的2倍,微孔入口形貌逐渐均匀且一级圆环旁瓣形貌基本消失。进一步将光束相对样品上表面下移80 μm ,在样品的上下表面分别观察微孔形貌,结果发现实现了微孔贯通,且微孔的出入口形貌基本一致,仅由主瓣形成。由图4所示的模拟图可知贝塞尔光束强度在焦点区域内接近对称分布,且光强中心无明显衍射现象,因此在该情况下贝塞尔光束焦点区域的中心应位于材料中心附近,此时,铌酸锂的整个截面均处于贝塞尔光束的焦点区域内。由于飞秒激光的超短脉宽,即便是实验中所用光束的光子能量(约为1.2 eV)远小于铌酸锂的禁带宽度(约为3.8 eV),材料依然可以通过非线性吸收机制获得能量沉积^[25-26]。这种独特的机制使得位于光束焦点区域的材料产生大量自由电子,并通过焦点区域与材料厚度的匹配形成孔径均匀的通孔。当光束相对样品的位置进一步下移至 $\Delta Z = 160 \mu\text{m}$ 时,样品上表面的微孔入口将会消失,而下表面的微孔出口越发明显。当光束相对样品表面下移200 μm 时,贝塞尔光束焦

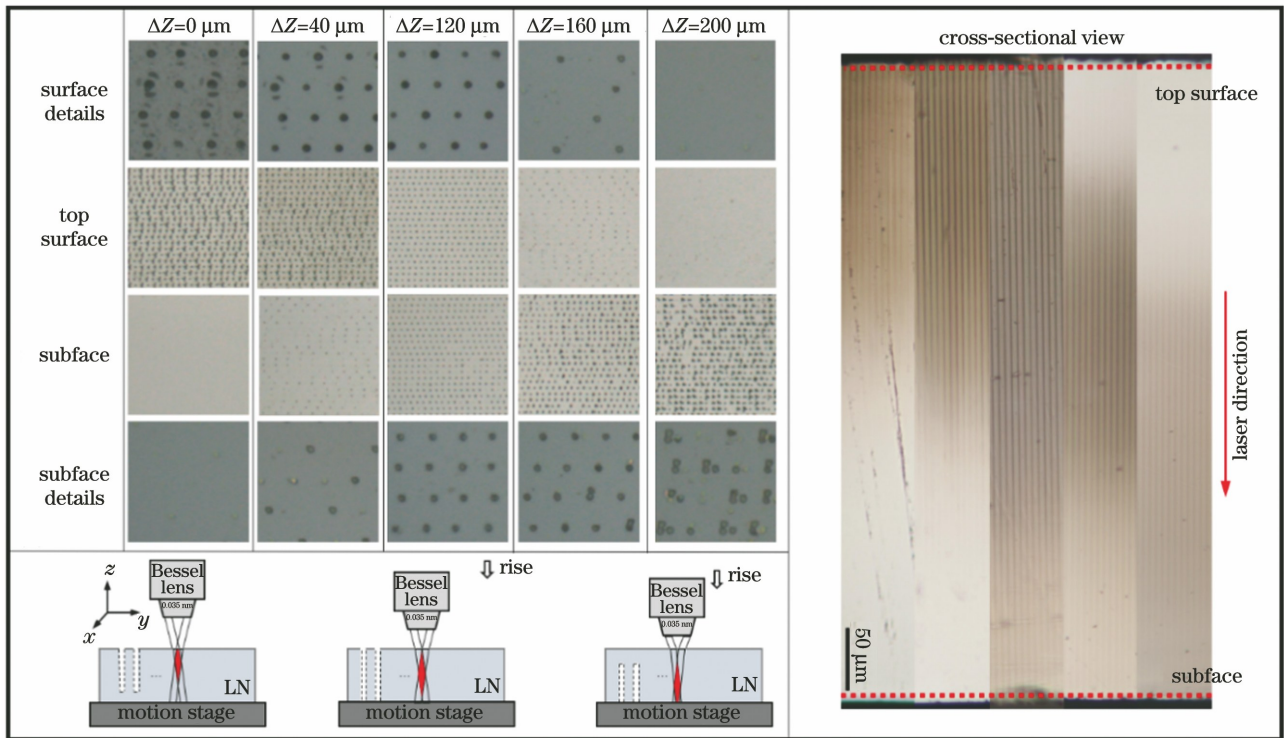


图5 贝塞尔光束焦点区域和材料的相对位置对微孔形貌的影响

Fig. 5 Influence of relative position of Bessel beam focus area and material on microhole morphology

点区域的中心移至样品下表面附近,此时样品下表面的贝塞尔光束旁瓣所携带的能量高于铌酸锂晶体的损伤阈值,因此除了在靠近下表面约 $330\ \mu\text{m}$ 区域范围内可观察到形成的微孔外,还能在样品下表面观察到不同于 $\Delta Z=0$ 时的旁瓣刻蚀形貌,这种旁瓣刻蚀的差异主要源于样品上下表面微孔出入口处等离子体演化状态的不同。

综上所述,通过调节飞秒贝塞尔光束与样品的相对位置可以有效延长微孔深度,并有选择地调控微孔形成区域。值得注意的是,光束和样品相对位置的改变并不会对微孔孔径造成影响,展现出贝塞尔光束对微孔孔径与孔深具有强大的解耦能力,有利于实现材料内部各种形貌、尺寸微孔结构的制备。

上述实验结果表明,当激光平均功率为 $0.76\ \text{mW}$,焦点位于铌酸锂晶体上表面下方 $120\ \mu\text{m}$ 时,可以获得完全贯穿的高深径比通孔。基于该优化工艺,本研究团队在上表面面积为 $2\ \text{cm} \times 3\ \text{cm}$ 的铌酸锂晶体内部制备了间隔为 $4\ \mu\text{m}$ 的微通孔阵列,如图 6(a)所示。微孔截面形貌的扫描电子显微镜照片如图 6(b)所示,孔径为 $715\ \text{nm}$,深径比约为 $700:1$ 。如图 6(c)所示,采用波长范围为 $400 \sim 1100\ \text{nm}$ 的线偏振光分别从原始铌酸锂晶体端面

和已制备微孔阵列的光子晶体端面沿垂直于微孔阵列的方向入射,使用光学显微镜从不同样品的另一端面观察出光情况(在光学显微镜和晶体样品之间加入与入射光偏振方向垂直的偏振片)。图 6(d)所示为显微镜观察到的出光现象。图 6(e)为测量得到的晶体样品的透射光谱,可见,制备有光子晶体微孔阵列的样品呈现出明亮的蓝绿色(光谱测量显示该波段范围为 $450 \sim 510\ \text{nm}$),而没有制备微孔结构的原始样品则呈现出与入射光相近但较暗的颜色。铌酸锂晶体的双折射特性使得沿垂直于晶体光轴方向(即垂直于微孔阵列的方向)入射的线偏光生成偏振方向相互垂直的两束光波[如图 6(c)所示],与显微镜前偏振片平行的光波得以透过,而与偏振片垂直的光波则被完全阻挡。光子晶体样品所呈现的蓝绿色则说明微孔阵列对 $450 \sim 510\ \text{nm}$ 波段范围内的光具有选择透过性,证实了所制备光子晶体的良好滤波特性。

4 结 论

本课题组通过对飞秒激光贝塞尔光束进行整形,实现了深径比约为 $700:1$ 的大面积铌酸锂微孔阵列的一步制备,微孔成形均匀,阵列可控性高。本文系

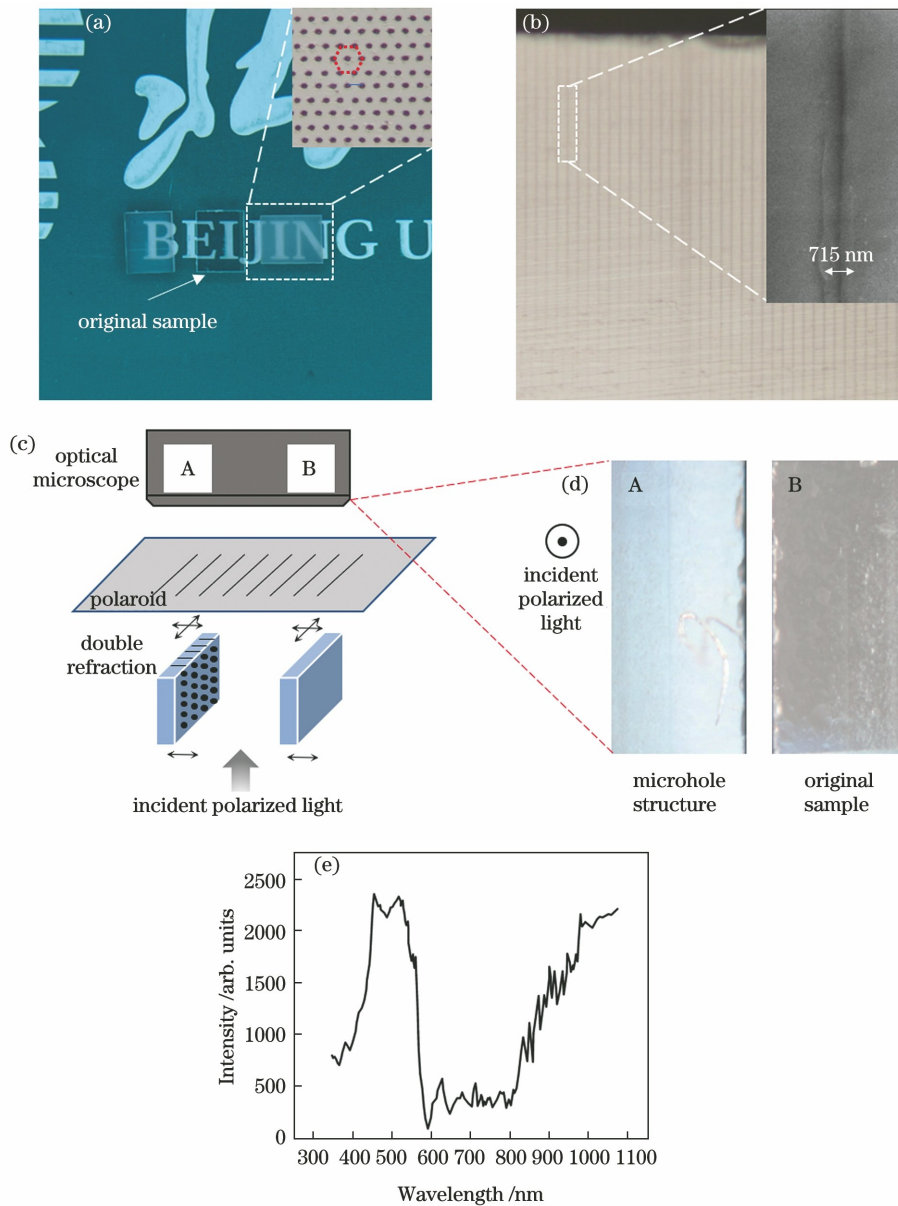


图6 飞秒贝塞尔光束直写周期性微孔阵列。(a) 基于微孔阵列的光子晶体器件实物图；(b) 微孔横截面的偏光显微镜照片以及对应的 SEM 图片；(c) 光子晶体滤波性能测试示意图(图中双箭头表示光束偏振方向)；(d) 光子晶体滤波性能测试结果；(e) 光子晶体样品的透射光谱

Fig. 6 Femtosecond Bessel beam direct write periodic microhole arrays. (a) Optical microscope image of photonic-crystal based on microhole array; (b) optical microscope image and corresponded SEM image of microhole cross-section; (c) schematic of filtering performance test of photonic-crystal (the double arrows in the figure indicate polarization direction of the light); (d) test result of photonic-crystal filtering performance; (e) transmission spectra of photonic-crystal sample

统地研究和总结了激光输出功率以及相对焦点位置对微孔形貌、深度和深径比的影响规律,分析了合理抑制贝塞尔旁瓣的能量输入以及阵列的设计机制。基于贝塞尔光束制备微孔的参数优化,完成了高深径比铌酸锂光子晶体结构的制备,光学测试结果显示,该光子晶体结构具有可靠的波长选择透过性。这种高效可靠的高深径比微孔结构加工方式为更多

铌酸锂光子晶体器件的制备提供了一条值得探索的新途径。

参 考 文 献

[1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. Nature, 1998, 391 (6668): 667-669.

- [2] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, 297(5582): 820-822.
- [3] Akahane Y, Asano T, Song B S, et al. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic-crystal[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 944-947.
- [4] Gailevičius D, Purlys V, Staliunas K. Photonic crystal spatial filters fabricated by femtosecond pulsed Bessel beam [J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (20): 4969-4972.
- [5] 杜金恒, 宋伟, 张怀金. 三维准相位匹配研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1208001.
Du J H, Song W, Zhang H J. Advances in three-dimensional quasi-phase matching[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1208001.
- [6] Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(8): 081101.
- [7] Si G Y, Danner A J, Teo S L, et al. Photonic crystal structures with ultrahigh aspect ratio in lithium niobate fabricated by focused ion beam milling [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2011, 29(2): 021205.
- [8] Zhao Q Z, Zhang D L. Transmission spectral characteristics of photonic-crystals milled in annealed proton-exchange LiNbO₃ waveguide [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(3): 034207.
- [9] 何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.
He F, Cheng Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 595-622.
- [10] Liu H G, Lin W X, Hong M H. Hybrid laser precision engineering of transparent hard materials: challenges, solutions and applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 162.
- [11] Lin Z Y, Hong M H. Femtosecond laser precision engineering: from micron, submicron, to nanoscale [J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 1-22.
- [12] 周超, 马嘉男, 项晓仪, 等. 飞秒激光加工铌酸锂晶体: 原理与应用[J]. *物理学进展*, 2020, 40(3): 69-83.
Zhou C, Ma J N, Xu X Y, et al. Femtosecond laser processing of lithium niobate crystal: principle and applications[J]. *Progress in Physics*, 2020, 40(3): 69-83.
- [13] Jia Y C, Wang S X, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3 (10): 190042.
- [14] Liao Y, Xu J, Sun H Y, et al. Fabrication of microelectrodes deeply embedded in LiNbO₃ using a femtosecond laser [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(21): 7018-7021.
- [15] He R Y, An Q, Jia Y C, et al. Femtosecond laser micromachining of lithium niobate depressed cladding waveguides[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3 (9): 1378-1384.
- [16] 李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202019.
Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (2): 0202019.
- [17] 杜坤, 李晓炜, 杨炳东, 等. 飞秒激光非金属微孔加工研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57 (11): 111417.
Du K, Li X W, Yang B D, et al. Research progress of femtosecond laser microhole drilling on non-metallic materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111417.
- [18] Durnin J, Miceli J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(13): 128.
- [19] Polesana P, Franco M, Couairon A, et al. Filamentation in Kerr media from pulsed Bessel beams [J]. *Physical Review A*, 2008, 77 (4): 043814.
- [20] 魏张帆, 孙川, 郭凯, 等. 用于皮秒激光切割的贝塞尔镜头研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(10): 1022001.
Wei Z F, Sun C, Guo K, et al. Study on Bessel lens for picosecond laser cutting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 1022001.
- [21] 胡梦宁, 葛励成, 张晋平, 等. 多脉冲飞秒激光深小孔的加工[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403006.
Hu M N, Ge L C, Zhang J P, et al. Hole-drilling with high depth-diameter ratio using multi-pulse femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403006.
- [22] Xie Q, Li X W, Jiang L, et al. High-aspect-ratio, high-quality microdrilling by electron density control using a femtosecond laser Bessel beam [J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(2): 136.
- [23] 杨泽齐, 段军, 陈航, 等. 皮秒贝塞尔光束切割化学强化玻璃[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102010.
Yang Z Q, Duan J, Chen H, et al. Chemically strengthened glass fabricated by picosecond Bessel beam cutting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019,

- 46(11): 1102010.
- [24] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 607-621.
- [25] Ma R, Ji L F, Yan T Y, et al. Influence of ambient gases on plasma dynamics of ultrafast laser-induced filamentation in sapphires[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20461-20472.
- [26] Yan T Y, Ji L F, Sun W G. Characteristics and formation mechanism of filamentary plasma string induced by single picosecond laser pulse in sapphire [J]. *Applied Physics A*, 2021, 128(1): 39.

High-Aspect-Ratio Photonic-Crystal Structure of Lithium Niobate Fabricated via Femtosecond Bessel Beam Direct Writing

Sun Weigao^{1,2}, Ji Lingfei^{1,2*}, Zheng Jincan^{1,2}, Wen Yanan^{1,2}, Wang Guanqiang^{1,2}

¹*Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

²*Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract

Objective Lithium niobate crystals with deep microhole structures are excellent photonic-crystal devices with modulation properties of wavelength selection. However, current fabrication methods, such as focused ion beam etching, chemical etching, or conventional laser drilling, remain a considerable challenge for obtaining microholes with high-aspect-ratios in lithium niobate crystals. This paper presents a strategy for the one-step fabrication of uniform deep microhole arrays with a 700:1 aspect ratio within lithium niobate crystals using the ultrafast laser temporal Bessel shaping technique. This efficient and high-quality strategy for fabricating deep microhole arrays has excellent process stability. The prepared lithium niobate microhole array has remarkable selective beam transmittance, and we hope that this strategy can be used as a promising method for fabricating lithium niobate photonic-crystals.

Methods In this study, the original femtosecond Gaussian beam was transformed into a zero-order Bessel beam using a series of beam shaping units and the energy distribution of the femtosecond Bessel beam was calculated via COMSOL simulations. The one-step fabrication of deep microholes was realized using the high peak power of the femtosecond laser and by adjusting the spatial energy distribution of the Bessel beam. By matching the pulse frequency and the speed of the moving stage, stable and uniform fabrication of large-area deep microhole arrays could be achieved by varying beam energy and the relative focal position. The resulting microhole morphology and aspect ratio were evaluated using scanning electron microscope, confocal laser scanning microscope, and optical microscope. Additionally, the beam transmission test was performed on the microhole arrays, verifying the structure's excellent selective beam transmission ability.

Results and Discussions The femtosecond Bessel beam obtained after beam shaping successfully realized the fabrication of microhole arrays with a 700:1 aspect ratio. Varying the laser power can effectively adjust the morphology and aspect ratio of the fabricated microhole. With an increase in laser power, the diameter and depth of the microhole become larger but the aspect ratio gradually decreases. At the same time, an increase in laser power can lead to a side lobe etching effect on the sample surface, resulting in degradation of the device performance or even its damage. Variation in the relative focal position slightly changes the microhole diameter but considerably affects the depth of the microhole. Furthermore, maximum utilization of the Bessel beam energy can be achieved when the Bessel beam is focused at the center of the sample, and a complete through-hole of a 500 μm thick lithium niobate crystal is realized. This high-aspect-ratio microhole array demonstrates excellent selective transmission of light beams in the 450–510 nm range.

Conclusions In this study, a femtosecond Bessel beam is successfully used to rapidly produce a uniform array of microholes with an aspect ratio of 700:1 inside a lithium niobate crystal. The effects of laser output power and

relative focal position on the microhole's morphology, depth, and aspect ratio are systematically studied and summarized. The laser power range for inhibiting the side lobe etching effect and the design principles of the microhole array are presented. The high-aspect-ratio lithium niobate photonic-crystal filter is fabricated based on the optimization of the processing parameters, and the wavelength-selective transmission of the structure for beams in the range of 450–510 nm is demonstrated through the transmission spectrum measurements. The efficient and reliable processing of high-aspect-ratio microhole structures provides a new pathway that is worth exploring for the fabrication of lithium-niobate-based photonic-crystal devices.

Key words laser technique; ultrafast lasers; Bessel beam; lithium niobate; aspect ratio; photonic-crystal