

## 激光与光电子学进展

## 飞秒激光制备红外微光学元器件

牛亚华<sup>1</sup>, 孙盛芝<sup>1</sup>, 刘小峰<sup>2\*</sup>, 邱建荣<sup>3</sup><sup>1</sup>宁波大学红外材料及器件实验室, 高等技术研究院, 浙江 宁波 315211;<sup>2</sup>浙江大学硅材料国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;<sup>3</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 近年来,随着研究人员对红外微光学元器件的深入研究,高精度制备器件备受关注。传统的制备技术存在许多缺点,而飞秒激光有着超强、超快的特性,非常合适用来制备红外微光学元器件。以透镜阵列、复眼、光栅、光波导和光子晶体为例,介绍了飞秒激光使用不同材料、不同制造方法制备红外微光学元器件的发展,在材料上有红外半导体、硫系玻璃及红外聚合物等,在方法上有飞秒激光诱导化学刻蚀、飞秒激光辅助湿法刻蚀、飞秒激光辅助干法刻蚀等,对其应用及具体案例进行分析,并展望了该技术的发展趋势。

**关键词** 飞秒激光; 透镜; 复眼; 光栅; 光波导; 光子晶体

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223127

## Fabrication of Infrared Micro-Optical Components Using Femtosecond Laser

Niu Yahua<sup>1</sup>, Sun Shengzhi<sup>1</sup>, Liu Xiaofeng<sup>2\*</sup>, Qiu Jianrong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

**Abstract** With the advancements in the field of infrared micro-optical technologies, the preparation of infrared micro-optical devices with high precision has attracted increased attention. There are many shortcomings in the traditional preparation technology. However, the femtosecond laser is suitable for preparing infrared micro-optical components because of its ultra-fast characteristics. Taking lens array, compound eye, grating, optical waveguide and photonic crystal as examples, the development of infrared micro-optical components with the femtosecond laser using different materials and manufacturing methods is introduced. The materials used are the infrared semiconductor, chalcogenide glass, and infrared polymer. The methods used are the femtosecond laser-induced chemical etching, femtosecond laser-assisted wet etching, and femtosecond laser-assisted dry etching. The applications and specific cases are discussed, and the future development trend of this technology is presented.

**Key words** femtosecond laser; lens; compound eye; grating; optical waveguide; photonic crystal

## 1 引言

红外器件<sup>[1]</sup>是光电系统的关键和核心部件,是现代光电技术与微电子技术发展的基础。近年来,在军用探测感知、民用安防监控、医疗卫生等领域需求不断扩大,而随着新材料和新技术的涌现,对红外器件的要求也越来越高,需要制备高精度、低损耗的红外微光学

元器件。

传统制备红外器件的方法,如:切割、铣削、磨削等<sup>[2-3]</sup>,加工得到的结构精度不高,表面较为粗糙,且在加工时依赖砂轮或刀具,工具一旦有问题就会严重影响器件的精度,所以无法实现高精度制备。电子束刻蚀可以实现较高的精度,但这种方法依赖于昂贵的掩模,制作工序复杂,对工业加工应用而言,该方法经济

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-01-06; 录用日期: 2023-01-13; 网络首发日期: 2023-01-23

基金项目: 国家重点研究发展计划(2021YFB2802000)、国家自然科学基金(U20A20211)

通信作者: \*xfliu@zju.edu.cn

性和适用性不高。

激光具有一系列独特的性质,如:单色性、相干性、方向性和高光强等,自从Maiman<sup>[4]</sup>发明了第一台红宝石激光器之后,该成果引起了科学界和工业界的极大兴趣。激光加工技术开始于20世纪60年代,利用大功率的CO<sub>2</sub>激光器和Nd:YAG激光器输出的红外和近红外激光,将光能转化为热能,通过热累积效应沉积在材料上,使材料发生熔融、气化、等离子化等物理或化学变化<sup>[5]</sup>。然而,此微加工过程在物理机制上属于热加工,且激光脉冲的能量不可避免地会扩散到周围的材料中,极大地降低了微加工的精确度,限制了激光微加工的应用。

在20世纪80年代,作为一种新兴的加工技术,飞秒激光<sup>[6]</sup>具有超强(峰值功率密度达1022 W/cm<sup>2</sup>)、超快(脉冲宽度为10~15 fs)的物理特性。可以用于大部分金属和非金属材料的微加工,加工得到的红外器件精度高,且该过程为“冷加工”,能减少热损耗,是制备红外微光学元器件更合适的技术。制备出来的红外器件在工业、医疗等微加工领域具有广泛应用。本文总结了近年来一些课题组和团队使用飞秒激光制备红外器件的技术和研究进展。

飞秒激光可以用来制备表面型和内部型红外微光学元件,后续将详细介绍这两种红外微光学元件的制备研究进展。

## 2 飞秒激光制备器件的原理

### 2.1 增材制造

增材制造,即3D打印<sup>[7]</sup>,是指在计算机程序控制下,按照所需物理对象,通过光固化、选择性激光烧结、熔融堆积等技术使材料逐渐累加,连续形成3D材料层,直至创建出所需物理对象的过程。

目前,基于激光的最具代表性的增材制造工艺是立体光刻技术(SLA)。根据美国材料实验协会(ASTM)“ASTM F42 - 增材制造”的分类定义,SLA归类为光聚合工艺。这种工艺利用激光和材料沉积方法来实现逐层制造<sup>[8]</sup>。

SLA是一种通过将飞秒激光等聚焦在光敏聚合物树脂槽上而进行选择性光聚合的工艺。激光束在需固化的树脂层上绘制出轮廓,然后下降一层的距离,再将下一层未固化的树脂在前一层的顶部固化,重复此过程,直到获得所需的三维结构或部件为止<sup>[9-10]</sup>。图1为SLA的流程图。

增材制造的另一种方法是双光子聚合加工<sup>[5]</sup>,即在紧聚焦的飞秒激光照射下,光引发剂激活的自由基诱发单体在树脂内部发生聚合反应,高浓度低聚物或单体相互缠绕交联,形成固化的体积元。在飞秒激光连续扫描的情况下,这些体积元连接在一起形成各种固化的聚合结构。

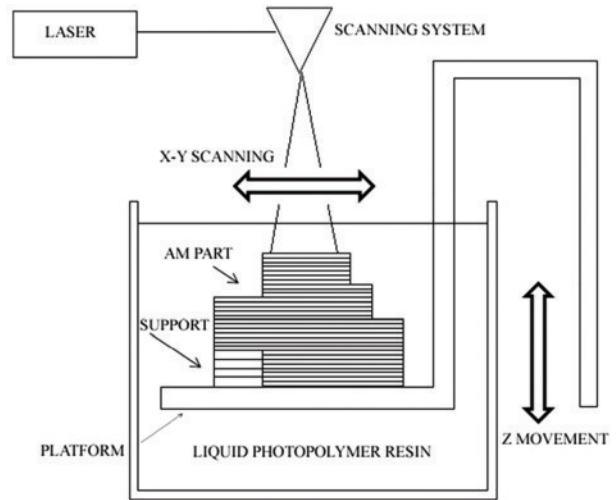


图1 SLA流程图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Flow chart of SLA<sup>[8]</sup>

### 2.2 减材制造

减材制造<sup>[11]</sup>,是相对“增材制造”而言,是将原材料装夹固定于设备上,通过切削工具(刀具、磨具和磨料)将坯料或工件上多余的材料层切去成为切屑,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法,也叫作切削加工,该方法已有300多年的历史。锁模钛蓝宝石激光器在脉冲激光器中有2个独特的特点。其一,飞秒到亚皮秒的超短脉冲持续时间。这种超短脉冲为激光微加工宽带间隙材料等开辟了新的可能性。其二,强激光脉冲辐照使材料在辐照过程中产生热应力,并可能引起裂纹和剥落,用超短激光脉冲代替普通激光脉冲可以有效避免这些故障。

飞秒激光去除物质的机理主要基于冷加工,该方法在物体表面加工时,产生的热影响区最小,是一项微纳尺度内材料精密加工的新技术<sup>[12]</sup>,其加工过程如图2所示。考虑到激光参量(功率、波长、脉冲持续时间等)、物质自身属性等因素,将飞秒激光加工物质的机理细分为熔化、热汽化、库仑爆炸、雪崩电离与多光子电离等几种作用机理<sup>[13]</sup>,在实际加工中,通常以雪崩电离与多光子电离为主要机理<sup>[14-15]</sup>。自由电子在吸收激光能量后产生较大的动能,与原子碰撞后产生多个自由电子,此过程不断反复,形成雪崩电离现象。飞秒激光辐照金属表面时,雪崩电离和多光子效应使大量的金属价带电子转变为高温自由电子,当其积累到一定密度时,激光能量被材料大量吸收,形成的高温高压等离子体以喷射的形式被剥离母材表面,达到材料去除的目的<sup>[15-16]</sup>。

### 2.3 飞秒激光内部修饰

飞秒激光进行内部修饰包括飞秒激光在透明介质中制备波导器件,诱导晶体选择性析出等。飞秒激光经过物镜聚焦到达样品内部,移动样品可以实现对其选择性修饰。根据激光传播方向和样品移动方向为垂直或平行,可以将激光波导加工分为横向直写和纵向

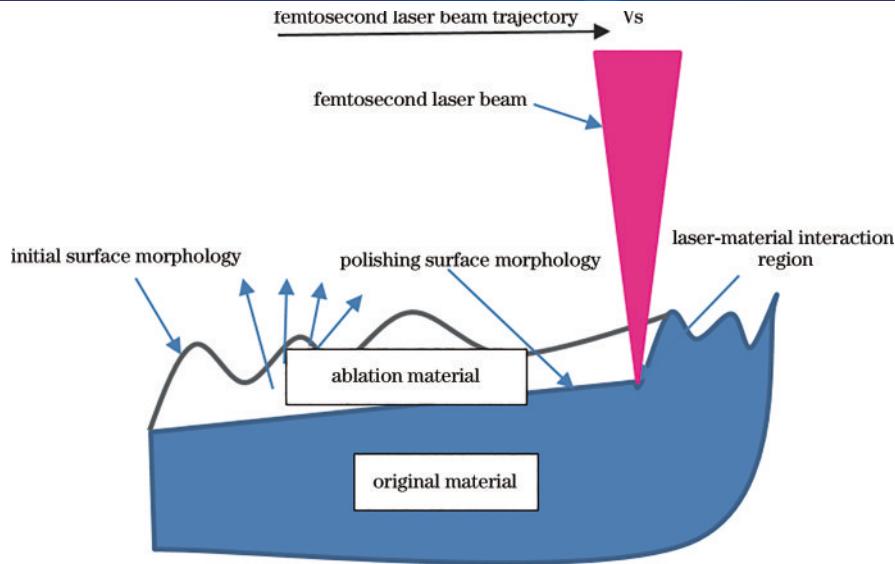


图 2 飞秒激光加工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond laser processing

直写<sup>[17]</sup>。激光在玻璃体内诱导晶体生长<sup>[5]</sup>的关键之处为激光能量能够有效地沉积在选定区域以实现玻璃的局部加热,然后通过玻璃材料的熔融重组来实现晶体的生长。

#### 2.4 飞秒激光加工机理

飞秒激光技术作为一种非接触式加工方法,其具有极高的峰值功率,可以在极短的时间内将所有的激光能量注入极小的加工区域,实现对材料的非热熔性加工,有效避免了重铸层、热影响区和熔渣对加工区域的不良影响。飞秒激光具有较高的峰值功率,而且还有极短的作用时间以及非线性加工等特点,其瞬间产生的高能量可以改变电子的吸收方式和运动方式,进而从根本上改变激光与材料作用的机理,实现高质量、高精度、高效率的微纳加工,成为目前具有较大潜力的一种表面微纳结构加工技术<sup>[18]</sup>。

### 3 飞秒激光制备表面型红外器件

#### 3.1 透镜阵列

微透镜是微光学中最为基础的成像和聚焦器件之一,其在集成光学成像领域具有重要的应用,在光通信、波前传感、光束整形和液晶显示等<sup>[19-23]</sup>领域也有着十分广泛的应用。在红外波段工作的微透镜器件被人们广泛重视,且这种微透镜器件被应用于众多领域。目前,用于红外微透镜制备的方法主要有飞秒激光辅助干法刻蚀<sup>[24]</sup>、飞秒激光辅助湿法刻蚀<sup>[25]</sup>,如图 3 所示。图 3(a)为飞秒激光辅助干法刻蚀的制造方法,图 3(b)为飞秒激光辅助湿法刻蚀制造方法。

除了在制备方法上有两类,用于制作红外微透镜的材料也主要分为硫系玻璃和红外聚合物两类。由于硫系玻璃中有大量不稳定的化学键,在高能激光作用下会发生折射率变化、微形变等效应,这些效应可用于

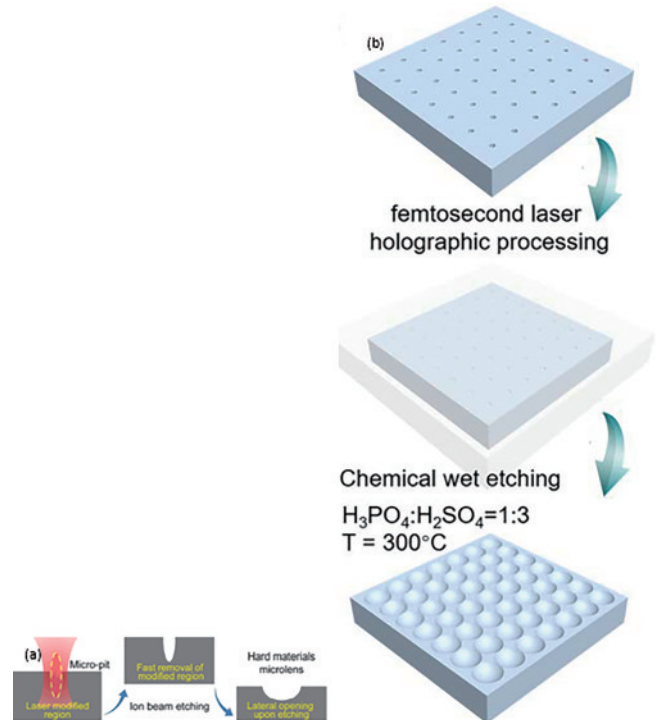


图 3 微透镜制备方法。(a)飞秒激光辅助干法刻蚀示意图<sup>[24]</sup>;  
(b)飞秒激光辅助湿法刻蚀示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 3 Preparation methods of microlens. (a) Schematic diagram of femtosecond laser-assisted dry etching<sup>[24]</sup>; (b) schematic diagram of femtosecond laser-assisted wet etching<sup>[25]</sup>

实现光存储,所以硫系玻璃也可以被用来实现微米级的折射微光学器件。2017年Kadan等<sup>[26]</sup>采用中心波长为 800 nm、脉冲宽度为 200 fs 的激光脉冲,在 0.5~11 μm 的 65GeS<sub>2</sub>-25Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-10CsCl 硫代卤化物玻璃上制备了衍射限制的平凹微透镜阵列和微镜阵列。微透镜的直径为 15~35 μm,焦距为 50~200 μm,经金属涂层后形成凹面微镜。其性能仅受激光脉冲重复频率



(通常为 1000 Hz)的限制。该过程制造的常规微透镜和微镜阵列可以应用于光通信。直径为  $17\ \mu\text{m}$ 、焦距为  $100\ \mu\text{m}$  的微透镜阵列如图 4 所示,其中每个凹面微透镜由 100 Hz 重复频率的单一激光脉冲产生,形成均匀的虚拟焦点阵列和字母“IP”的虚拟像,展现出良好的成像效果。

为了获得良好的透镜表面形貌和质量,在 2020 年,Zhang 等<sup>[27]</sup>将飞秒激光辅助化学蚀刻(FLACE)与精密玻璃成型工艺相结合,采用 FLACE 方法在硬质耐高温 BK7 玻璃上制作凹面微透镜阵列。采用中心波长为 800 nm、脉冲持续时间为 50 fs、重复频率为 1 kHz、激光功率为 5 mW 的飞秒激光脉冲,通过数值孔径(NA)为 0.5 的物镜进行聚焦,通过精密热机械成型工艺,在硫系玻璃  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}\text{ChG}$  表面上成功制备了一种三维密排六边形微透镜阵列。该阵列具有超过 6000 个凸六边形微透镜,尺寸为数十微米,占地面积

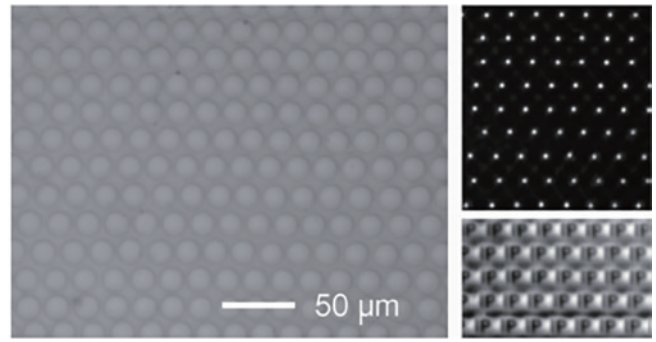


图 4 微透镜阵列及其虚焦点阵列和字母“IP”的虚像阵列<sup>[26]</sup>  
Fig. 4 Array of microlenses, virtual focal spots and virtual images of the letters “IP”<sup>[26]</sup>

为  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 。所制备的 ChG-微透镜阵列具有良好的表面形貌和质量,在波长为  $2.5 \sim 20\ \mu\text{m}$  下具有较高的透明度。此种方法的制造工艺图如图 5 所示。

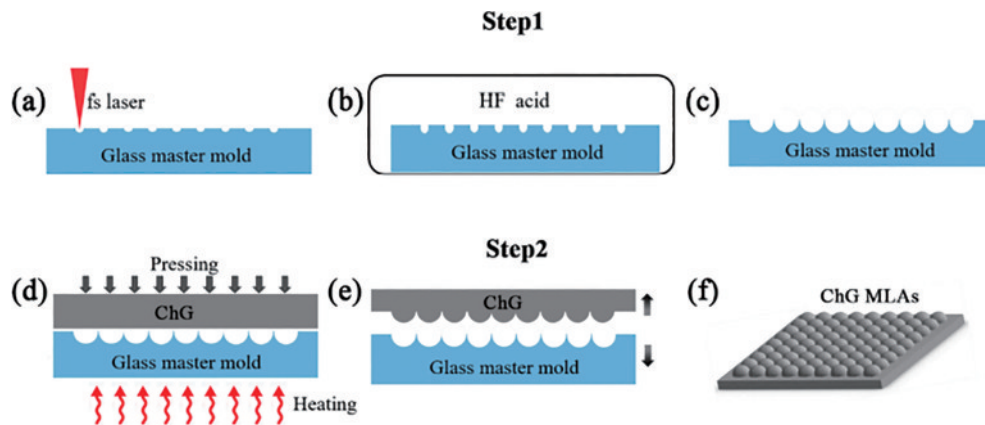


图 5 制造工艺示意图<sup>[27]</sup>。(a)通过激光照射在 BK7 玻璃上产生一系列激光暴露的弹坑;(b)用超声辅助 HF 蚀刻处理凹陷;(c)形成表面光滑的凹面微透镜阵列;(d)精密玻璃成型工艺;(e)将硫系玻璃(ChG)与模具分离;(f)凸型 ChG 微透镜阵列  
Fig. 5 Schematic of the fabrication process<sup>[27]</sup>. (a) An array of laser-exposed craters is produced on BK7 glass by laser irradiation; (b) craters are treated by ultrasonic-assisted HF etching; (c) concave microlens arrays with smooth surfaces are formed; (d) precision glass molding process; (e) separate the chalcogenide glass (ChG) from the mold; (f) convex ChG microlens arrays

除了上述的硫系玻璃可以用来制备透镜,红外聚合物也可以用来制备高性能的透镜。2019 年 Liu 等<sup>[28]</sup>利用飞秒激光辅助湿法刻蚀成形方法,在 BK7 光学玻璃衬底上制备了高精度平凹微透镜模板。玻璃暴露在高度聚焦的飞秒激光脉冲下,光子注入剂量为  $135\ \text{kJ}/\text{cm}^2$ ,然后用化学蚀刻剂对直径为  $150\ \mu\text{m}$  的六边形烧蚀坑进行刻蚀和抛光,最终形成表面粗糙度为纳米级的硬质凹面微透镜阵列模具。再利用纳米压印方法,在热塑性近红外聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板材(近红外区域折射率为 1.49,密度为  $1.19\ \text{g}/\text{cm}^3$ ,厚度为 1 mm)上制备了微结构阵列形貌。最终制作的高性能平面红外阵列化微光学器件由超过 4000 个凸微透镜子孔径紧密封装在  $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$  的面积内,工作频段范围为  $780\ \text{nm} \sim 2.2\ \mu\text{m}$ ,焦距为  $380\ \mu\text{m}$ ,微透镜的 NA 为 0.4。获得的器件表面形貌良好。

### 3.2 复眼

复眼是自然界中常见的一种视觉器官,常见于节肢动物中,其具有极高的视场角、低像差、低失真、高时间分辨率、高空间分辨率和无限景深等优点<sup>[29]</sup>,近些年受到较大的关注。根据成像原理,人工复眼的制作大多是仿照复眼中并置眼的形式,并置眼的单眼通过色素细胞在光学上各自独立,每个眼有自己的视场方向,具有高分辨率。人工复眼在医学应用方面或军事应用方面都有很大用处,如:内窥镜、机器视觉、牙科医疗等。虽然光刻技术已经被证明可以在各种材料上灵活地制作二维平面微透镜阵列,但要制作三维弯曲复眼却很困难。目前,飞秒激光制造已成为在各种材料上构建任意和复杂三维结构的一种强大的方法。

利用飞秒激光制备复眼的技术有很多,受蚊子功能性六角形复眼<sup>[30]</sup>结构阵列的启发,2018 年 Lin 等<sup>[31]</sup>提出利用超快激光直写技术并通过多脉冲能量渐变的

方式,来制备复眼结构。使用重复频率为 1 kHz、中心波长为 800 nm、脉冲宽度为 104 fs 的激光,在玻璃上构筑分散的微凹陷阵列来使表面粗糙化,在玻璃上制备了具有自组织微纳棒、纳米波纹和纳米颗粒的分布周期微凹陷,随后通过对结构表面进行简单的氟硅烷改性处理后,最终获得良好的超疏水性。通过此方法制备出了高透超疏多功能玻璃表面,所制备样品的相对透光度高达 98%,同时对水表现出超强的排斥性(接触角为  $165^\circ$ 、滚动角为  $2^\circ$ )。此外,样品还显示出良好的抗润湿性和自清洁、防雾、防冰<sup>[32]</sup>以及耐酸碱性能。

制备复眼的方法除了超快激光直写,在 2019 年, Liu 等<sup>[33]</sup>还提出了一种基于飞秒激光辅助干法刻蚀加工(DE-FsLM)方法,用于在弯曲蓝宝石衬底上快速制造人造复眼。首先利用中心波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、脉冲持续时间为 100 fs 的飞秒激光,激光光

束通过 NA 为 0.85 的物镜在正常入射到蓝宝石晶片表面时聚焦,三维扫描在弯曲蓝宝石衬底上刻蚀微凹型阵列,然后进行干刻蚀,形成高度为  $2.65\ \mu\text{m}$ 、直径为  $20\ \mu\text{m}$ 、折射率为 1.77、曲率半径为  $25.89\ \mu\text{m}$ 、焦距为  $33.62\ \mu\text{m}$  的蓝宝石凹型复眼,如图 6(a)所示。为了快速制作蓝宝石凹型复眼,使用了一个激光源(光转换标),以 200 kHz 的重复频率,输出脉冲持续时间小于 290 fs、波长为 1030 nm 的脉冲来加工,如图 6(b)所示。为提高加工精度,采用三次谐波产生系统实现了波长为 343 nm 的激光加工。为了增加加工面积,飞秒激光脉冲通过场透镜( $f=100\ \text{mm}$ )聚焦,并通过双镜装置进行扫描。然后,以蓝宝石凹面复眼为模板,通过高温铸造复制制备了一个大小为厘米级、19 万多只眼的 K9 玻璃凸面复眼。

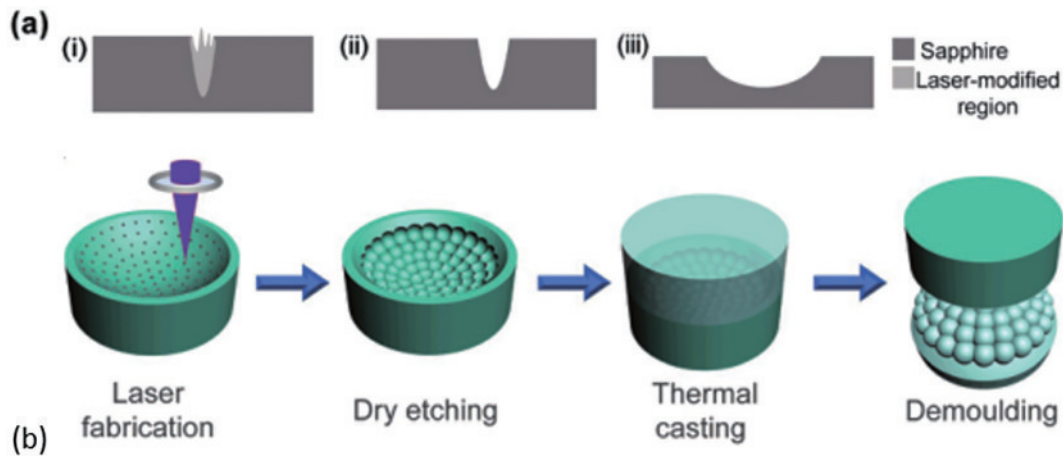


图 6 凹型透镜和复眼的制备。(a)采用 DE-FsLM 制作蓝宝石凹面微透镜方案;(b)蓝宝石凹型复眼模板和 K9 玻璃复眼制作示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Preparation of concave lens and compound eye. (a) Fabrication scheme of a sapphire concave microlens by DE-FsLM; (b) schematic diagram of fabrication of sapphire concave compound eye template and K9 glass compound eye<sup>[33]</sup>

而后,基于复眼结构的超疏水表面的制备技术和性质,在 2020 年, Liu 等<sup>[34]</sup>提出了可以利用不同于玻璃和蓝宝石衬底的材料来制备红外人工复眼结构,采用热塑性红外高分子材料制备了三维红外人工复眼(ACE)光学元件。提出了使用飞秒激光辅助湿法刻蚀和三维纳米压印技术制备薄壳多孔元件,采用中心波长为 800 nm、脉冲持续时间为 45 fs、重复频率为 1 kHz、脉冲能量为  $15\ \mu\text{J}$  的飞秒激光脉冲在弯曲 BK7 衬底上诱导体积修饰区。红外 ACE 的制备从硬凹模开始,因此采用高效无掩模(FLWE)技术使得高质量的小眼面被高效地制作到弯曲 BK7 硼硅酸盐冠状光学玻璃基板上,形成高度集成的小眼填充系数为 100% 的 3D 复合眼模。图 7 为 ACE 组件的表面形貌,最终复制的组分具有超薄壳结构( $105\pm 15\ \mu\text{m}$ )、超轻( $5\ \text{mg}$ )、高表面质量( $\lambda/15@1064\ \text{nm}$ )和显著的红外辐射选择性( $780\sim 2200\ \text{nm}$ )。经过一系列操作制备成型的 ACE 组件,在半球形薄壳圆顶上密集排列 1000 多

个高品质微面透镜,基底半径为 2.7 mm,凹陷高度为 2.1 mm,可将视场放大至  $148^\circ$ 。该结果表明:小孔直径为  $150\ \mu\text{m}$ , NA 为 0.35,实际空间分辨率高达  $160\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,具有优异的光学特性和均匀性。图 7(b) 的插图为眼体截面剖面图。

制备复眼的方式有很多,除了上述方法,在 2019 年, Jin 等<sup>[35]</sup>通过飞秒激光制备用于大规模生产人工复眼的三维模板,提出了一种利用飞秒激光直写制作的光聚合物模板大规模生产 3D 人造复眼的高效方法。首先,通过在盖玻片上旋涂 SU-8 薄膜制备光刻胶样品;然后,将 SU-8 薄膜在  $95\ ^\circ\text{C}$  下软烘焙 60 min。使用具有高数值孔径(NA 为 1.4,  $60\times$ )的油浸物镜将波长为 800 nm、脉冲宽度为 120 fs、重复频率为 80 MHz 的飞秒激光脉冲聚焦到 SU-8 光刻胶中。将混合的预聚物倒在 SU-8 模板上,经过一系列处理,PDMS 膜从 SU-8 模板上脱模,从而形成 PDMS 复眼。合成的 3D SU-8 复眼模板可用于多次(超过 50 次)复制聚二甲基



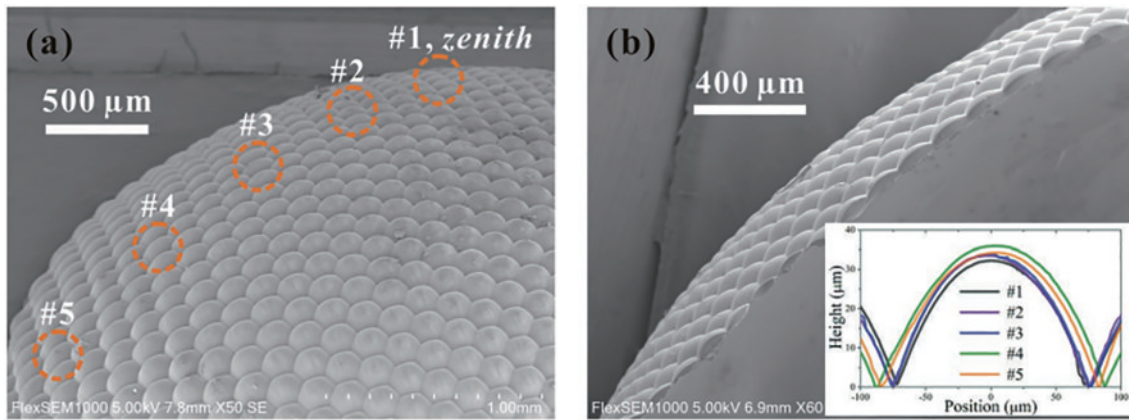


图7 ACE组件形貌图。(a)ACE组件的表面形貌;(b)壳体组件的截面形态<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Topography diagram of ACE components. (a) Surface morphology of ACE component; (b) cross section shape of shell component<sup>[34]</sup>

硅氧烷(PDMS)复眼,效率比使用逐点飞秒激光直写直接制造的效率高近20倍。PDMS复制品显示出良好的聚焦和成像性能,预计这种方法可能会成为大规模生产3D人造复眼的一种手段。

### 3.3 光栅

光栅是一种具有周期性结构的分光元件,被广泛应用于分光仪器和光谱分析系统中。按其工作方式可分为反射式和透射式。其中,透射式光栅由在透明材料表面刻蚀周期性结构而制成<sup>[36]</sup>,具有大宽带、高衍射效率和高损伤阈值等特性。透射光栅能够简化光学系统、降低调制难度且成本较低,因此在电子通信、生物医疗和微电子器件等领域有很好的应用前景。与其他透明材料相比,二氧化硅玻璃性能优异,是制备透射型玻璃光栅的理想材料之一。光栅的形成过程主要是激光烧蚀过程,在平面光栅的制作中,表面浮雕光栅是由蓝宝石激光器单次发射的两个脉冲干涉形成的。光栅制造过程中是用恒定速度移动衬底,并与激光脉冲重复频率同步的,这种制作方法可用于各种透明介质材料。故在2000年,Kawamura等<sup>[37]</sup>利用工作频率为10 Hz的Nd:YAG激光,将锁模钛蓝宝石激光器的近红外光(800 nm)脉冲放大,并将其分为2路(光强比约为3:7)。脉冲持续时间约为100 fs,通过改变其中一个脉冲的光路,使这两个光束之间的角度在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内变化,两个脉冲之间的时间延迟在0.2~2 ps范围内调整,基片位置的激光功率变化范围为0.1~3 mJ/脉冲。最后,这两个聚焦脉冲在衬底的上表面交叉,利用全息技术在难以加工的透明介质中制作出表面浮雕型光栅。预计利用锁模钛蓝宝石激光器的飞秒光脉冲全息技术将开辟透明介质精密微加工的新领域。

为了实现能集成在多模中红外硫系光波导末端或用于化学传感的裸芯硫系玻璃光纤表面的表面浮雕衍射微光栅,2012年,Kohoutek等<sup>[38]</sup>提出了利用飞秒脉冲激光表面刻蚀实现这些实际应用,通过使用波长为

800 nm、重复频率为1 kHz、脉冲持续时间为200 fs的蓝宝石脉冲激光器,利用NA为0.6的40×微透镜,将光束聚焦在Ge-Ga-Sb-S玻璃表面,对玻璃表面进行局部加热和烧蚀,制备了一阶10%的高效率浮雕衍射光栅。

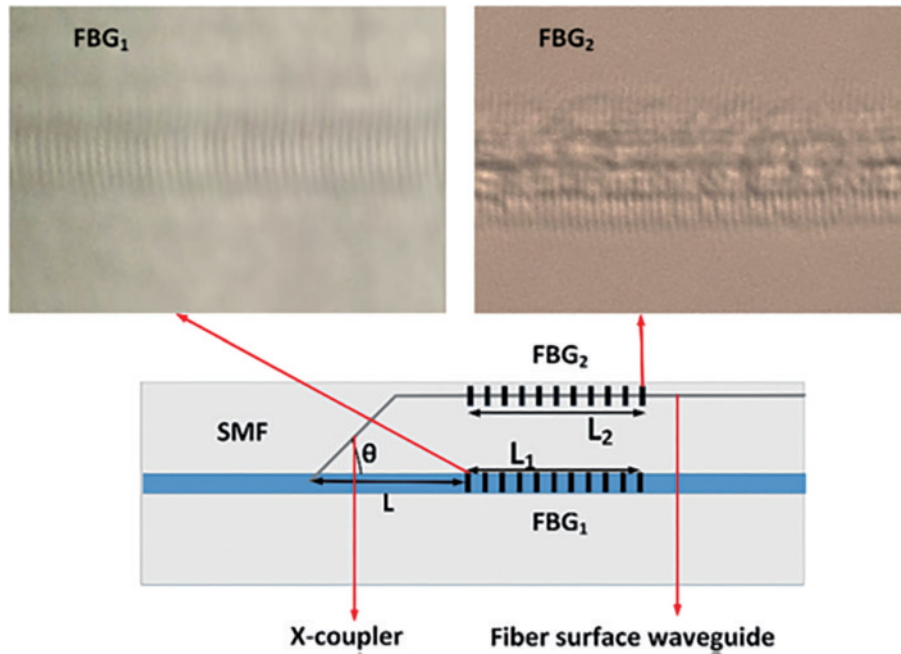
2021年,Chen等<sup>[36]</sup>提出了一种基于光纤表面波导和布拉格光栅的光纤传感器,用于同时感知折射率(RI)和温度。使用由再生放大钛蓝宝石激光器产生的脉冲持续时间为35 fs、重复频率为5 kHz、中心波长为800 nm的飞秒激光光源,使用放大率为 $100\times$ (NA=1.25)的油浸物镜将激光脉冲聚焦在单模光纤(SMF)上,对波导和光纤光栅进行处理。此光纤传感器由两个飞秒激光器制成的光纤布拉格光栅(FBG)组成,其中一个光栅位于光纤芯中,用于温度传感;另一个位于光纤表面波导中,用于测量温度和RI。为了保证实验的加工精度,采用了移动分辨率为 $1\mu\text{m}$ 的三维微加工平台。器件的两种FBG显微镜图像如图8所示。所制备的装置结构紧凑、坚固耐用、操作方便。

## 4 飞秒激光制备内部型红外器件

### 4.1 光波导

光波导结构能够将光场限制在微米级截面的通道内以无衍射的方式传输,保证了腔内相对较高的光密度,并使块体材料原有的光学性质在波导中得到一定程度的增强。光波导是高性能集成光子学器件的基本结构,被定义为具有低折射率包层的高折射率核心。在光通信、量子信息、传感等领域有重要的应用价值,一直是集成光子学领域的一个研究热点<sup>[39-40]</sup>。

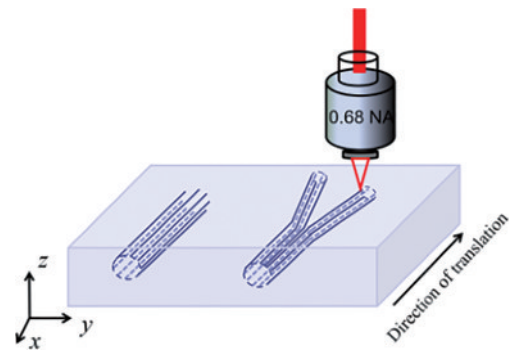
用紧聚焦飞秒激光脉冲,可以在各种玻璃和晶体内制作波导。该技术有可能产生平面的光子器件,也有可能产生三维的光子器件。在2003年,Nolte等<sup>[41]</sup>介绍了第一个真正的三维集成光学器件,一个用纯熔融二氧化硅制备的 $1\times 3$ 分束器。由能量为 $0.5\mu\text{J}$ 、脉

图 8 设备原理图<sup>[36]</sup>Fig. 8 Schematic diagram of the device<sup>[36]</sup>

冲持续时间为 50 fs(重复频率为 1 kHz)的 800 nm 激光脉冲,聚焦到表面以下约 200  $\mu\text{m}$  的抛光熔硅样品中。聚焦 NA 为 0.45 的 20 $\times$  物镜,修正后的盖玻璃厚度为 0.17 mm。通过计算机控制系统移动样品,最终产生了总长度为 10 nm,由 100  $\mu\text{m}$  分离的波导结构器件。此波导结构器件的制备证明了飞秒直写技术为三维集成光学打开大门的潜力。

2018 年, Li 等<sup>[42]</sup> 用飞秒激光直写在  $z$  形切割铌酸锂晶体中制备了 Y 型分束器。采用中心波长为 1047 nm、重复频率为 500 kHz、脉冲持续时间为 460 fs 的飞秒激光,采用 NA 为 0.68 的透镜,通过 8 mm $\times$  5 mm 的顶表面将飞秒激光聚焦到安装在电动 3D 平台上的样品中。利用计算机控制三维平台,通过激光聚焦使样品沿  $y$  方向平移,在样品中产生损伤轨迹。对脉冲能量、聚焦深度和扫描速度等关键参数的变化进行刻蚀:入射脉冲能量在 320~620 nJ 之间,以 40 nJ 为步长,聚焦深度范围为 110~320  $\mu\text{m}$ ,扫描速度为 0.3~15.0 mm/s,入射激光束的偏振方向为圆形。制作了 1 $\times$ 2 圆包层结构的 Y 型分束器,获得了低损耗的包层波导。包层波导和分束器的制作原理图如图 9 所示。

光波导除了用作分束器之外,还可用作耦合器。2019 年, Zhang 等<sup>[43]</sup> 利用波导由再生放大的 Yb:KGW 系统封装,在 200 kHz 的重复频率下产生波长为 1030 nm、脉冲宽度为 240 fs、脉冲能量为 1.55  $\mu\text{J}$  的脉冲。然后,将工程光束成像到油浸物镜的后孔径上 (NA 为 1.4) 和聚焦到晶体样品,通过计算机控制的高精度三轴空气轴承工作台,将样品沿  $y$  轴沿激光偏振方向以 1 mm/s 的速度平移,制作了长为 10 mm、深度为

图 9 包层波导和分束器的制作原理图<sup>[42]</sup>Fig. 9 Fabrication schematic of cladding waveguides and splitters<sup>[42]</sup>

55  $\mu\text{m}$  的直波导。单扫描飞秒激光还可以在铌酸锂晶体中横向书写压缩包层波导,形成一个 2 $\times$ 2 定向耦合器。

2018 年, Chen 等<sup>[44]</sup> 采用飞秒激光直接刻蚀技术制备了硼铝硅酸盐玻璃内波导。在实验中,使用 NA 为 0.75 的 40 $\times$  微透镜将钛宝石激光器聚焦在玻璃表面以下。利用气动技术控制玻璃芯片的运动,在玻璃内部制作波导结构。通过实验实现了多光子模式在光子芯片上的非交换编织。3 种模式的非交换编织示意图如图 10 所示,2 种配置的不同结果证明了是非交换编织。实验中激光束的移动速度为 40 mm $\cdot$ s<sup>-1</sup>,波导的制作截面尺寸约为 6.9  $\mu\text{m}$  $\times$  5.3  $\mu\text{m}$ ,波导与背景的折射率对比度约为 2.5 $\times$ 10<sup>-3</sup>,制作的波导能很好地限制光子的传输损耗为约 0.03 dB $\cdot$ mm<sup>-1</sup>。然而,波导与背景的折射率相对较小,直接观察光/光子通道并不容易。为了解决该问题,首先通过控制激光束的运动轨迹来制作波导;然后,将激光再次聚焦在波导内部的一系列点进行第二次曝光,曝光时间为 10 ms。二次曝



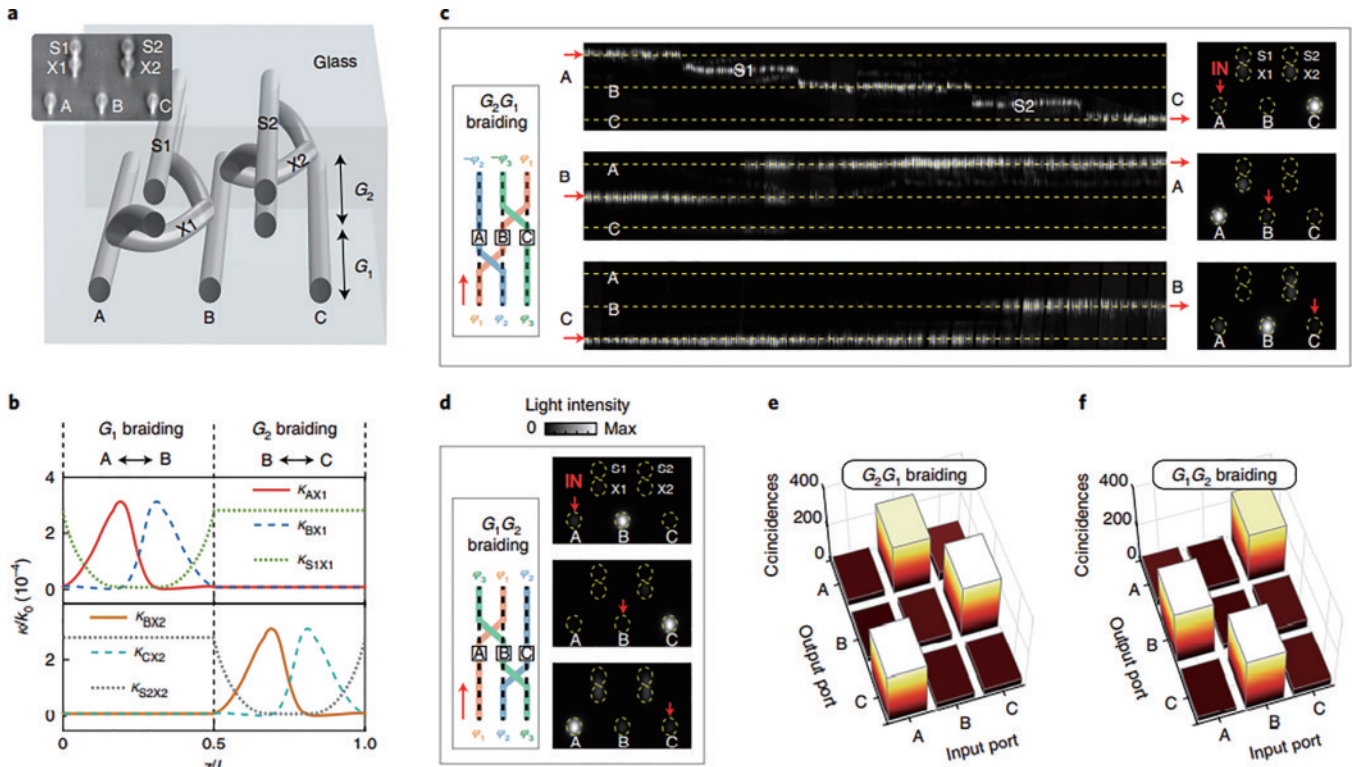


图 10 3 种模式的非交换编织<sup>[44]</sup>。(a)  $G_2G_1$  编织配置示意图; (b) 耦合系数的调制剖面; (c)  $G_2G_1$  编织的实验结果; (d)  $G_1G_2$  编织输出面的衍射图; (e)  $G_2G_1$  编织重合率; (f)  $G_1G_2$  编织重合率

Fig. 10 Non-Abelian braiding of three modes<sup>[44]</sup>. (a) Schematic diagram of a  $G_2G_1$  braiding configuration; (b) modulation profiles of the coupling coefficients; (c) experimental results of the  $G_2G_1$  braiding; (d) light-diffraction patterns at the output facet of the  $G_1G_2$  braiding; (e)  $G_2G_1$  braiding coincidence rate; (f)  $G_1G_2$  braiding coincidence rate

光过程进一步改变了波导内局部的折射率,且在波导内部产生了点散射体,相邻散射体的间距保持在  $140\ \mu\text{m}$  左右。这些散射体可以将光/光子耦合出波导,从而可以直观地看到编织结构内部的光通道。该技术被称为“双曝光辅助散射技术”。

#### 4.2 光子晶体

光子晶体是一种介电常数随空间呈周期性变化的材料。2001 年, Misawa 等<sup>[45]</sup> 报道了利用波长为

795 nm、脉冲持续时间为 250 fs 的飞秒激光在石英玻璃和光聚合树脂中激光微加工光子晶体结构,并对其结构和光学性质进行详细分析。玻璃中二维三角形晶格和三维菱形晶格的光子晶体(PhC)具有较明显的光子间隙。研究了树脂激光微加工原木桩三维光子晶体中平面微腔的形成过程。在二氧化硅和光聚合树脂中制备光子晶体的图像如图 11 所示。

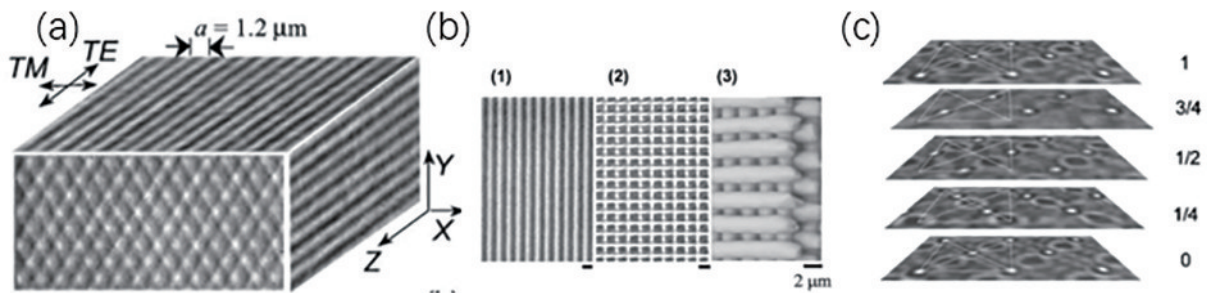


图 11 在二氧化硅和树脂中制备光子晶体<sup>[45]</sup>。(a) 二维三角形 PhC 在二氧化硅中的重建图像; (b) 树脂制备的 1D、2D 和 3D 结构; (c) 激光微加工金刚石光子晶格在玻璃中不同原子平面的光学显微镜图像

Fig. 11 Preparation of photonic crystals in silica and resin<sup>[45]</sup>. (a) Reconstructed image of the 2D triangular PhC in silica; (b) 1D, 2D and 3D structures fabricated in resin; (c) optical microscope images of different atomic planes in laser micro-fabricated diamond photonic lattice in glass

光子晶体具有很多功能和作用,其中,空间滤波是改善激光辐射空间特性的一种常用技术,可以解决光

束空间质量问题。在 2019 年, Gailevičius 等<sup>[46]</sup> 提出并实验证明利用中心波长为 1030 nm、脉冲重复率为



25 kHz、脉冲持续时间为 200 fs 的飞秒激光直接刻蚀贝塞尔光束用于制备具有空间滤波功能的光子晶体。这种滤波器在机械上是稳定的,体积小(毫米级),不需要直接进入远场域,因此这种滤波器是微型激光器和微激光腔内空间滤波应用的极好候选对象。如图 12

所示,这样扫描一个窄带滤光带的中心角  $\alpha_c$  可以覆盖更大的角范围,然而最终将导致分别更长的晶体。该技术允许在无机玻璃中制作光子晶体滤波器,在宽角(约  $10^\circ$ )近 0% 透射角阻带之间具有窄角(约  $1^\circ$ )近 100% 透射通带。

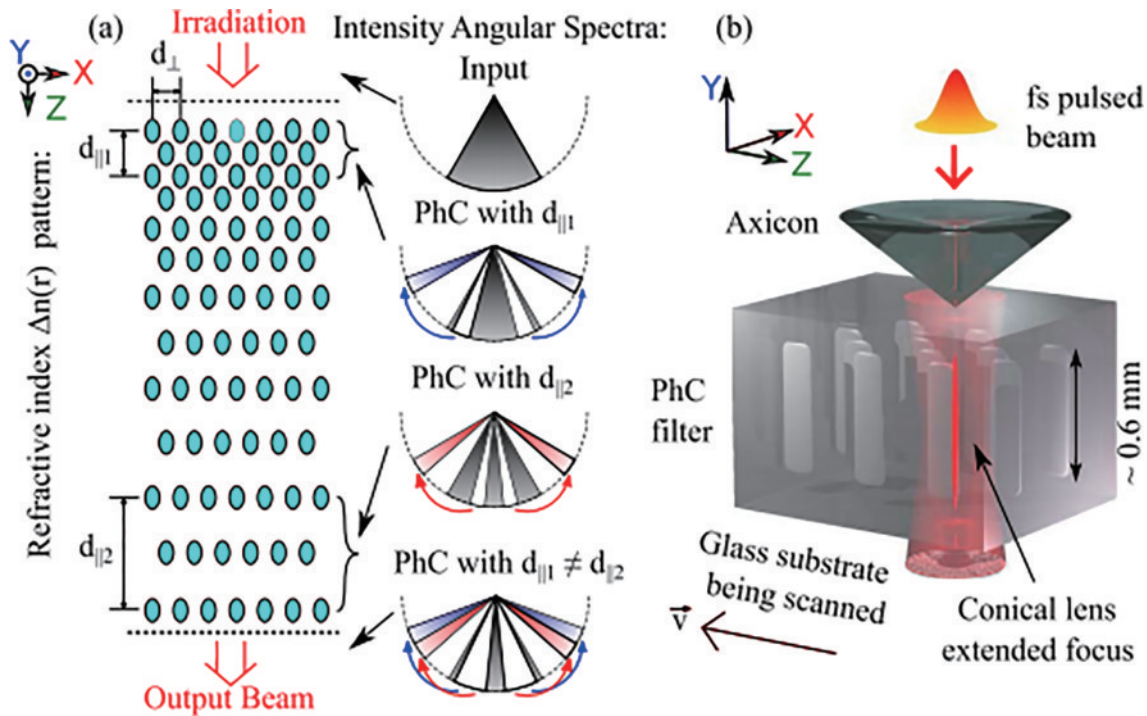


图 12 空间滤波示意图。(a)啁啾 PhCs 宽带空间滤波示意图;(b)采用贝塞尔光束直接激光刻蚀的主要方案<sup>[46]</sup>

Fig. 12 Spatial filtering diagram. (a) Illustration of broadband spatial filtering in chirped PhCs; (b) principal scheme of direct laser writing using Bessel beams<sup>[46]</sup>

在 2018 年,Zhu 等<sup>[47]</sup>采用典型的飞秒激光刻蚀系统在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中制备了微结构。光源为锁模钛宝石激光系统,再生放大器工作波长为 800 nm、脉宽 104 fs、重复频率 1 kHz。激光束经过扩束器后被一个 NA 为 0.8 的  $50\times$  物镜聚焦到  $\text{LiNbO}_3$  晶体中。样品位置由纳米定位台精确控制,分辨率为 1 nm,移动范围为  $200\ \mu\text{m}(x)\times 200\ \mu\text{m}(y)\times 200\ \mu\text{m}(z)$ ,通过飞秒激光选择性刻蚀  $\text{LiNbO}_3$  晶体中的非线性系数,实现了三维  $\text{LiNbO}_3$  非线性光子晶体(NPC)的实验演示,飞秒激光工程实现的三维 NPC 的制作原理图如图 13 所示。有效转换效率可与典型的准相位匹配(QPM)过程相媲美。该三维  $\text{LiNbO}_3$  NPC 具有控制三维非线性相互作用波的独特能力,可为未来的非线性光学研究提供一个很有前景的平台。

时隔 3 年,Zhu 等<sup>[48]</sup>使用飞秒激光刻蚀技术制作了带有设计的  $16\ \text{pixel}(x)\times 16\ \text{pixel}(y)\times 10\ \text{pixel}(z)$  像素的三维全息图的三维铌酸锂 NPC,在 811 nm 的输入波长下完全满足 3D-QPM 条件,因此相应的二次谐波(SH)图案在输入功率为 2.4 W 时,转换效率达到  $1.7\times 10^{-5}$ ,这至少比以前的报告高出一个数量级,得到了很好的识别。当基波波长远离 QPM 波长时,SH

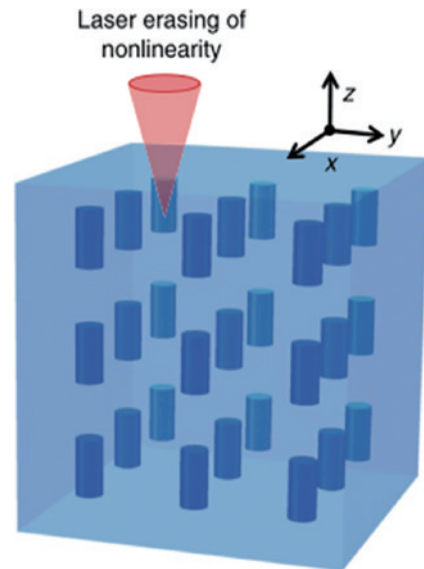


图 13 飞秒激光工程实现的三维 NPC 制作原理图<sup>[47]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of the 3D NPC fabrication realized through femtosecond laser engineering<sup>[47]</sup>

功率迅速下降,SH 模式变得难以区分,如图 14(b)所示。采用脉冲宽度为 104 fs、重复频率为 1 kHz、中心波长为 800 nm 的再生放大钛蓝宝石飞秒激光系统在

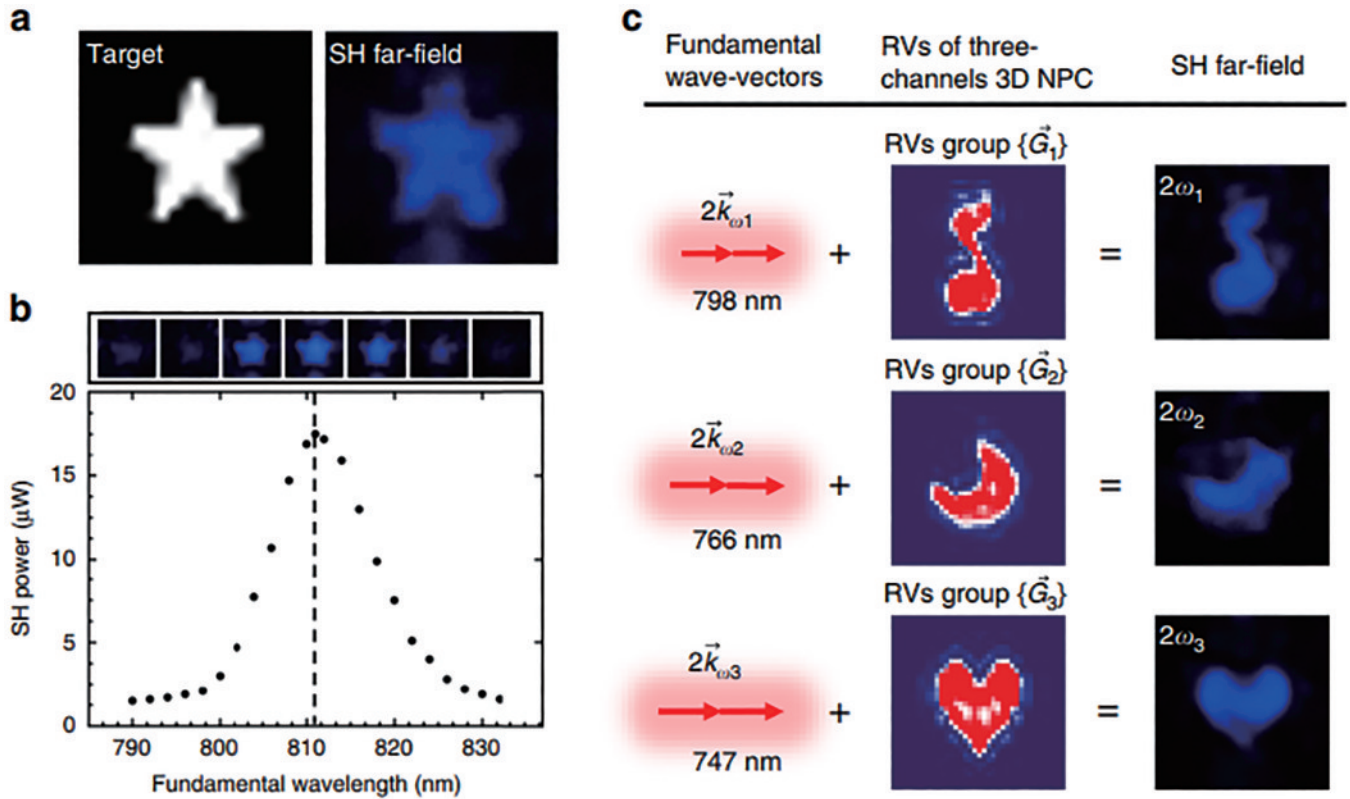


图 14 实验结果。(a)SH波的星图重建图;(b)调谐基本波长时SH波的输出功率和图形;(c)三通道QPM分复用全息术的实验结果<sup>[48]</sup>

Fig. 14 Experimental results. (a) Reconstruction of a star pattern at SH wave; (b) output power and pattern at SH wave when tuning the fundamental wavelength; (c) experimental results of three-channel QPM-division multiplexing holography<sup>[48]</sup>

商业化的 5% MgO 掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中制备了 3D NPC。采用半波片和格兰激光分束器对激光功率进行调制后,激光束通过 NA 为 0.8 的 50× 物镜聚焦到 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中,该晶体安装在具有纳米分辨率和 200 μm(x) × 200 μm(y) × 200 μm(z) 移动范围的压电平台(E545)上。晶体内部的焦斑尺寸在 X 和 Y 方向约为 1.5 μm, Z 方向约为 3 μm。图 14 为 QPM 分复用全息术的实验结果。该实验为实现高效非线性多路复用全息技术,实现高安全性、高密度的光信息存储提供了一种有前景的策略。

### 4.3 光纤光栅

飞秒激光作为一项先进的微纳加工技术,因其脉冲短、峰值功率大,具有极高的加工精度,非常适合加工光栅类的精密结构。因此研究使用飞秒激光在光纤内部制备光栅,其具有重要的意义。在 1999 年, Kondo 等<sup>[49]</sup>利用脉冲宽度为 120 fs、波长为 800 nm、重复频率为 200 kHz 的激光束进入显微镜,并通过 NA 为 0.46 的 20× 物镜聚焦照射的新技术制作了长周期光纤光栅。采用这种方法制作的光纤光栅具有很高的抗热衰性能,因此认为这种技术将有助于制作具有优良老化特性的光纤光栅。

自从希尔等在近 40 年前首次演示以来,FBG 已经

成为几乎所有基于光纤的光纤网络和传感器系统的不可或缺的组件。2016 年, Antipov 等<sup>[50]</sup>利用波长为 800 nm、持续时间为 112 fs 的超快激光脉冲刻蚀技术,使用 NA 为 0.8 的 20× 油浸物镜,制备了长 19.5 cm、光谱带宽达 30 nm 的啁啾宽带 FBG,啁啾 FBG 的原理图如图 15 所示。这些方法可以在非光敏光纤中刻蚀具有灵活周期分布的光栅,从而定制反射和色散特性。这些光栅还提供了非常高的群延迟色散值,并可用于引入正常和异常的群速度色散,近 2 ns 的最大群延迟显示了利用这些光栅进行色散补偿的潜力。

随着技术的进步,制备光栅的方法也越来越简化。2017 年, Lu 等<sup>[51]</sup>提出并演示了利用波长为 800 nm、重复频率高达 1000 Hz、脉冲持续时间为 120 fs、脉冲能量为 1.4~1.9 μJ 的短脉冲飞秒红外激光器在光纤中逐平面制备了几个长为 10 mm 的 FBG。

不仅在普通光纤中能制备光栅,FBG 还可以在光子晶体光纤中来制备,由于包层区域存在气孔以及吸收过程所需折射率变化的非线性特性,所以刻蚀 FBG 并非易事。2018 年, Baghdasaryan 等<sup>[52]</sup>成功在光子晶体光纤中,利用相位掩模和短焦距透镜,使用波长为 1030 nm 的红外飞秒脉冲激光,用  $f=10$  mm 的圆柱形透镜,在大约 4 s 内刻蚀一个传输衰减为 4 dB 的 FBG。



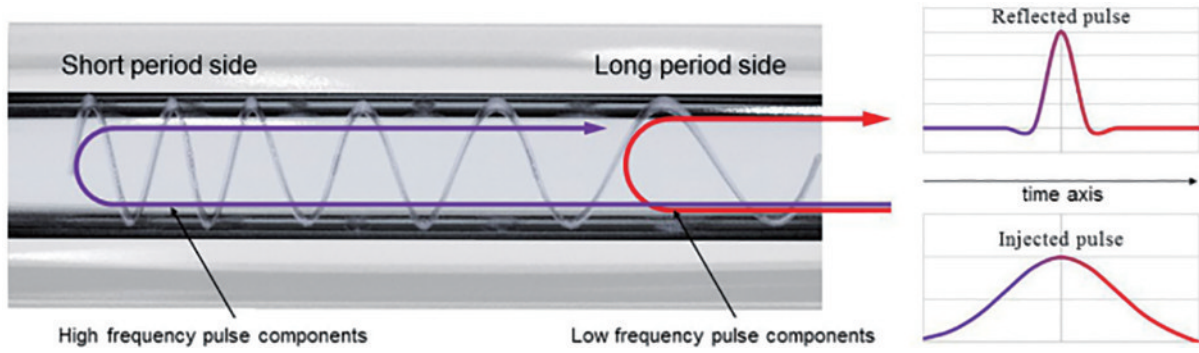


图 15 啁啾 FBG 的原理图<sup>[50]</sup>

Fig. 15 Schematic representation of a chirped FBG<sup>[50]</sup>

对采用短焦距圆柱透镜的相位掩模刻蚀装置进行了数值和实验研究,实验结果证明了对焦距  $f$  为 10 mm 的柱面透镜,六角形晶格 PCF 需要从束腰位置平移约  $15\ \mu\text{m}$ ,以有效地将能量传递到核心区域。

光纤光栅的用途很多,比如可以利用新的方法制备传感器,用来进行结构健康监测和微波信号处理。

在 2019 年, Wolf 等<sup>[53]</sup>提出了一种对 7 芯纺丝光纤中不同结构的 FBG 阵列逐点飞秒刻蚀的新方法,利用波长为 1030 nm、脉冲持续时间为 232 fs、重复频率为 1 kHz 的飞秒激光,通过光纤的丙烯酸酯保护涂层实现 FBG 刻蚀,创建了矢量弯曲传感器,纤维截面几何形状和弯曲计算参数如图 16 所示。该传感器的实现表明,使用

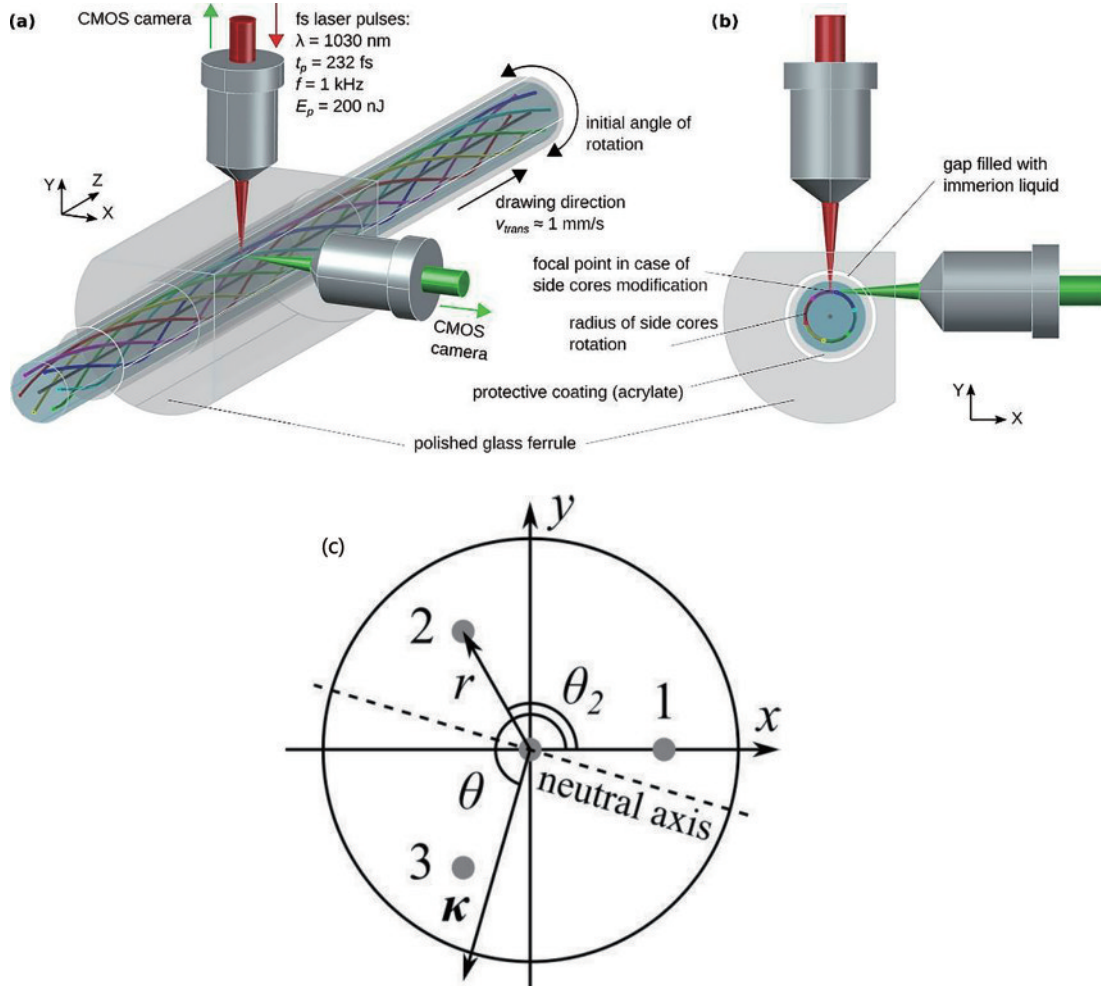


图 16 刻蚀示意图及光纤截面图。(a)在逐点 FBGs 刻蚀过程中,飞秒激光脉冲聚焦示意图;(b)透明插箍通道牵引涂膜光纤示意图<sup>[53]</sup>;(c)光纤截面几何形状和弯曲计算参数

Fig. 16 Etching schematic and fiber cross section. (a) During the point-by-point FBGs etching process, the femtosecond laser pulse focusing diagram; (b) transparent ferrule channel traction coating fiber schematic diagram<sup>[53]</sup>; (c) fiber cross-section geometry and bending calculation parameters

单通道询问方案可以高精度地测量小于 4 mm 的弯曲半径。

2020 年, Krämer 等<sup>[54]</sup>采用相位掩模扫描技术写入无源 Nufern GDF 20/400 光纤中来制备光纤光栅。使用波长为 800 nm、脉冲持续时间为 100 fs 的钛蓝宝石再生放大系统产生准直的激光束,使用一个聚焦长度为 12 mm 的无柱面透镜聚焦后沿光纤轴进入核心。在光纤前面放置一个相位掩模,产生均匀的干涉图案,然后将其印入光纤芯中产生光栅。为了确保精确的对准,装置被放置在三轴空气轴承平移台上。最后,得到用于千瓦级光纤激光系统的无源大模面积光纤中的高鲁棒 FBG。光栅是使用近红外飞秒激光脉冲直接通过光纤涂层刻蚀的,然后在全光纤掺铒单模振荡器设置中实现,信号输出功率高达 5 kW。

氟化玻璃材料作为活性组分的新宿主材料,由于

其中红外波长范围内固有的低损耗,所以在 2021 年, She 等<sup>[55]</sup>利用重频为 200 kHz、波长为 792 nm、脉冲持续时间为 115 fs 的飞秒激光在国产氟酸盐光纤中制备了长周期光纤光栅。将氟酸盐光纤放入 V 型槽中,然后浸入折射率匹配的液体中,随后用厚度为 100 μm 的盖玻片覆盖,以消除弯曲界面引起的额外像差。然后,将该组件安装到可编程的三轴压电平移平台和二维线性电动平台上,使光纤芯通过飞秒激光束的焦点进行远距离移动,长周期管状光栅就被刻蚀到光纤芯中。LPFG 的实验装置如图 17 所示。在透射谱上获得了强至 -17 dB 的衰减峰,具有清晰且可预测的光谱共振。该光纤光栅在氟酸盐光纤中的应变敏感性可以为中红外波长区域的一系列新应用铺平道路,例如光纤激光光束整形应用、光纤放大器和传感器件中的可调谐光学抑制带滤波器。

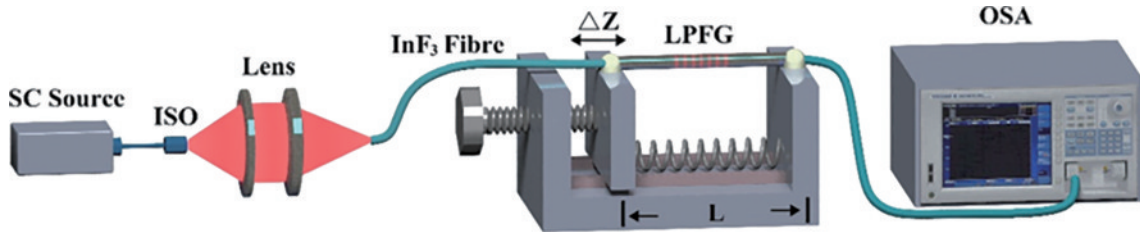


图 17 用于拉伸 LPFG 的实验装置示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 17 Schematic of experimental setup used to tension the LPFG<sup>[55]</sup>

2021 年, Liu 等<sup>[56]</sup>研究提出了使用改良的飞秒激光直接写入光纤的聚合物涂层,成功制备了氟碲酸盐光纤光栅。利用单飞秒激光脉冲照射光纤的聚合物涂层,实现了壳状形态。系统地研究了不同的光纤光栅制作方法和参数,以优化性能。使用不同方法制备的

光栅如图 18 所示。氟碲酸盐光纤光栅对重复写入的激光功率和反射率饱和效应具有较高的敏感性。成功制备了一种低插入损耗(1.5 dB)氟碲酸盐光纤光栅,反射率超过 99%,带宽小于 1 nm。该刻蚀方法灵活,可在氟碲酸盐玻璃透明窗口中刻蚀任意波长的光纤光

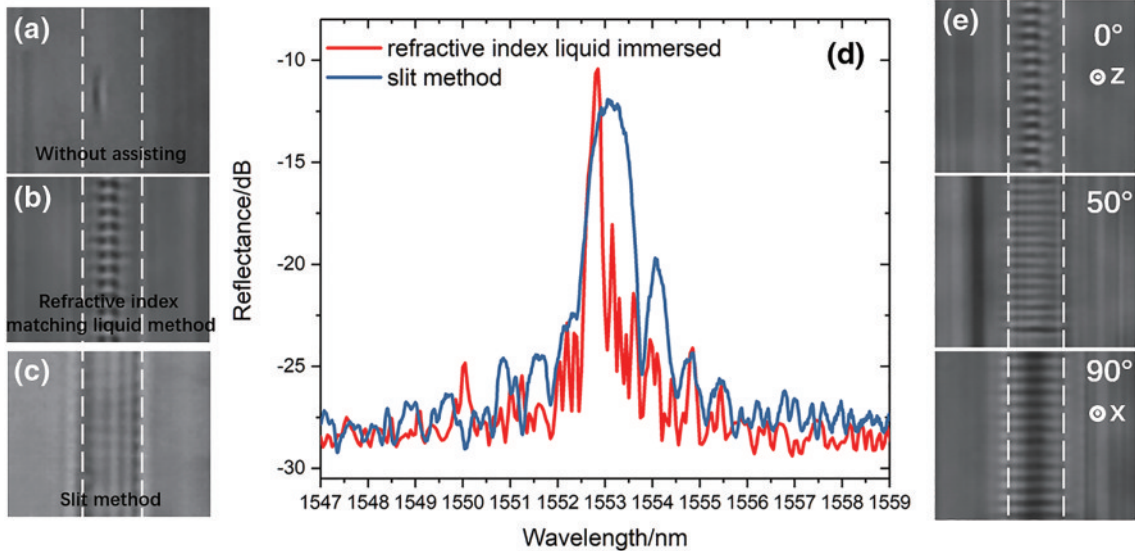


图 18 不同方法制备的光栅形貌<sup>[56]</sup>。(a)裸光纤写入法;(b)折射率匹配液体法;(c)狭缝法;(d)最后两个 FBG 的反射光谱;(e)不同角度观察的光栅形貌(折射率法制备)

Fig. 18 Morphologies of grating fabricated by different methods<sup>[56]</sup>. (a) Bare fiber writing; (b) refractive index matching liquid method; (c) slit method; (d) reflectance spectra of the last two FBGs; (e) grating morphologies (fabricated by refractive index method) observed at different angles



栅,适用于红外光纤激光器或传感器。

2021年,Goebel等<sup>[57]</sup>提出了利用超短激光脉冲和相位掩模技术将窄线宽FBG刻蚀到不同类型的多芯光纤中,其可以作为陷波滤波器。以1 kHz的重复频率发射持续时间为100 fs、中心波长为800 nm的激光脉冲,使用高精度的空气轴承旋转2D工作台,以尽量减少剩余的纤维运动。在激光束下移动包括光纤和相

位掩模在内的这一阶段,以垂直于光纤轴的方向扫描覆盖整个光纤芯。接下来,将纤维旋转以相应地处理以下核心。光纤的旋转可以与 $\pm 1^\circ$ 的精度对齐,得到单个芯的精确结构。FBG的芯到芯波长变化分别为约0.18 nm和0.11 nm,这种芯到芯波长变化的滤光片,足以满足抑制地球上层大气中羟基发出的光的要求。

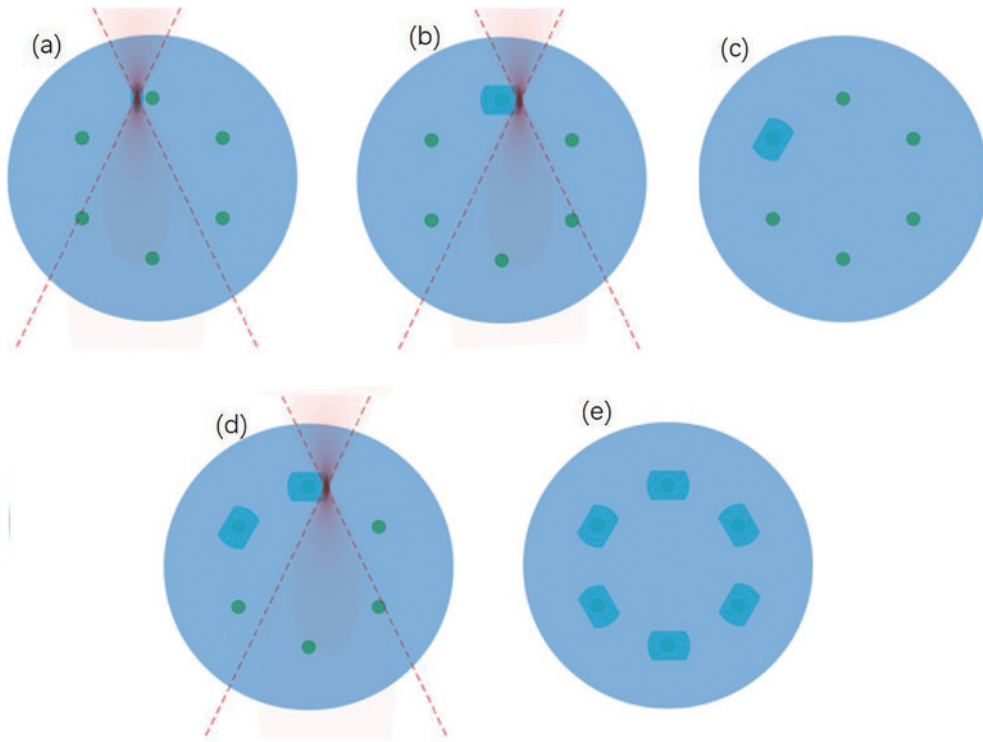


图 19 MCF的刻蚀策略<sup>[57]</sup>。(a)(b)激光聚焦扫描上芯;(c)旋转光纤;(d)重复刻蚀;(e)所有芯构造完成

Fig. 19 Inscription strategy for the MCF<sup>[57]</sup>. (a) (b) Laser focus scans across the upper core; (c) fiber is rotated; (d) inscription is repeated; (e) all cores are structured

2022年,Liu等<sup>[58]</sup>利用低强度飞秒激光和相位掩模对载氢SMF进行辐照,获得了具有强包层模式共振的高局域化光纤布拉格光栅(HLFBGs)。使用来自台蓝宝石放大器激光器的中心波长为800 nm、重复频率为1 kHz、脉冲时间为35 fs的激光脉冲辐照光纤来制备。HLFBGs的显微镜图如图20所示。实验结

果表明,光纤芯的局域折射率调制导致了强包层模式的出现,而更高的局域化导致了更强的包层模式共振。所制备的HLFBGs具有优异的高温稳定性和易于制造,非常适合在恶劣环境下进行化学检测和多参数测量。

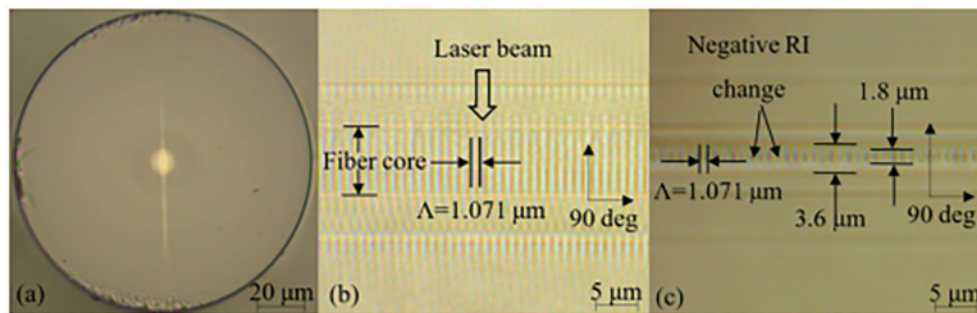


图 20 HLFBGs的显微镜照片<sup>[58]</sup>。(a)光纤横截面;(b)俯视图(平行于激光束);(c)侧视图(垂直于激光束)

Fig. 20 Microscope photographs of HLFBGs<sup>[58]</sup>. (a) Cross-section of the fiber; (b) top view (parallel to the laser beam); (c) side view (perpendicular to the laser beam)

## 5 结 语

飞秒激光作为一种新型的微纳加工技术,具有脉冲短、峰值功率大、加工精度极高和“冷加工”等优势,被广泛应用于红外器件的制备中。此前所使用的非飞秒激光加工的方法,例如切割、铣削、磨削等,加工出来的结构精度不高表面较粗糙,且在加工时严重依赖工具,工具一旦有问题就会严重影响器件的精度,所以无法实现高精度制备;又如电子束刻蚀虽然可以实现较高的精度,但这种方法依赖于昂贵的掩模,制作工序复杂,对工业加工应用来说经济性和适用性不高。相比之下,飞秒激光以及结合不同的方法来制备表面型红外器件和内部型红外器件,能够实现较高的精度和较为简单的加工工序,使得如今飞秒激光制备的红外微光学元器件应用范围和领域越来越广泛且全面,在工业、医疗等微加工领域等都具有广泛应用。总结了包括使用不同材料、不同制造方法制备红外器件的发展,在材料上有红外半导体、硫系玻璃及红外聚合物等;在方法上有飞秒激光诱导化学刻蚀,飞秒激光辅助湿法刻蚀,飞秒激光辅助干法刻蚀,超快激光直写技术并通过多脉冲能量渐变的方式,结合三维纳米压印技术,改变激光入射光束的能量密度和入射角度以及飞秒激光诱导微爆炸法等。虽然介绍的方法满足制备器件的需求且经济价值高,但是仍存在一些问题,比如制备的器件精度要求更高,需要继续探索新的制备方法和制备手段,飞秒激光结合其他更多的技术比如飞秒激光结合多光子电离或飞秒激光结合传统工艺,改变激光参数等手段,朝着更高精度、更简单、工艺更成熟的方向发展。相信在未来,研究者也会不断学习,充分利用飞秒激光技术的优势,探索新的方法,在不同材料上制备出性能更加优异的红外器件,应用于更广阔的领域。

### 参 考 文 献

- [1] 红外材料与器件[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(2): 140.  
Infrared materials and devices[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(2): 140.
- [2] Kim Y B, Park J, Lee W S, et al. Fabrication of microlens array by the tilted milling method to improve the surface morphology[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(10): 1171-1177.
- [3] 叶震, 姚鹏, 于世孟, 等. 柱面微透镜阵列的精密磨削[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1567-1579.  
Ye Z, Yao P, Yu S M, et al. Precision grinding of cylindrical microlens array[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(7): 1567-1579.
- [4] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.
- [5] 邱建荣. 飞秒激光加工技术: 基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018, 6: 23-24.  
Qiu J R. Femtosecond laser processing technology: basis and application[M]. Beijing: Science Press, 2018, 6: 23-24.
- [6] 马切, 马杰, 刘勇涛, 等. 飞秒激光在材料微加工中的初步研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(21): 9-12.  
Ma Q, Ma J, Liu Y T, et al. Preliminary study on femtosecond laser in material micromachining[J]. New Technology & New Products of China, 2020(21): 9-12.
- [7] 顾波. 增材制造技术国内外应用与发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2022(3): 1-16.  
Gu B. Application and development trend of additive manufacturing technology at home and abroad[J]. Metal Processing (Hot Processing), 2022(3): 1-16.
- [8] Monzón M D, Ortega Z, Martínez A, et al. Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5/7/8): 1111-1121.
- [9] Wang J C. A novel fabrication method of high strength alumina ceramic parts based on solvent-based slurry stereolithography and sintering[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(3): 485-491.
- [10] Vehse M, Seitz H. A new micro-stereolithography-system based on diode laser curing (DLC)[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(10): 2161-2166.
- [11] 唐成铭, 赵吉宾, 田同同, 等. 基于激光选区熔化与高速切削的增减材复合制造系统开发[J]. 热加工工艺, 2022, 51(19): 118-122.  
Tang C M, Zhao J B, Tian T T, et al. Development of A hybrid additive and subtractive manufacturing system based on selective laser melting and high speed machining [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 118-122.
- [12] 周宇玲, 单等玉, 王争飞, 等. 激光抛光 3D 打印钛合金板的机理及工艺研究[J]. 应用激光, 2019, 39(4): 621-627.  
Zhou Y L, Shan D Y, Wang Z F, et al. Study on mechanism and process of laser polished 3D printing titanium alloy sheet[J]. Applied Laser, 2019, 39(4): 621-627.
- [13] Pecholt B, Vendan M, Dong Y Y, et al. Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(3): 239-250.
- [14] 李晓溪, 贾天卿, 冯东海, 等. 超短脉冲激光照射下氧化铝的烧蚀机理[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2154-2158.  
Li X X, Jia T Q, Feng D H, et al. The mechanism of ablation of sapphire by an ultra-short pulse laser[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2154-2158.
- [15] 孙元征, 林晓辉, 陈云飞. 超短脉冲激光烧蚀熔融硅的理论模型[J]. 功能材料与器件学报, 2008, 14(1): 38-42.  
Sun Y Z, Lin X H, Chen Y F. Theoretical model investigation about the mechanism of ultrashort-pulse laser ablation fused silica[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2008, 14(1): 38-42.
- [16] Chen G, Qiao J. Femtosecond-laser-enabled simultaneous figuring and finishing of glass with a subnanometer optical



- surface[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3860-3863.
- [17] Bhardwaj V R, Simova E, Rajeev P P, et al. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(5): 057404.
- [18] Tan D Z, Wang Z, Xu B B, et al. Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 024002.
- [19] Wu Y C, Sharma M K, Veeraraghavan A. WISH: wavefront imaging sensor with high resolution[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 44.
- [20] Yang J, Schleusner S, Fabick R, et al. Microlens collimation film with near-infrared spectral filter for large-area fingerprint sensor[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 485-487.
- [21] Freitas J R, Pimenta S, Ribeiro J F, et al. Simulation, fabrication and morphological characterization of a PDMS microlens for light collimation on optrodes[J]. *Optik*, 2021, 227: 166098.
- [22] Xiong B, Wang J N, Peng R W, et al. Construct achromatic polymer microlens for high-transmission full-color imaging[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(2): 2001524.
- [23] Li H, Yu Y, Peng J, et al. Resolution improvement of light field imaging via a nematic liquid crystal microlens with added multi-walled carbon nanotubes[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5557.
- [24] Liu X Q, Yu L, Yang S N, et al. Optical nanofabrication of concave microlens arrays[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(5): 1800272.
- [25] Cao X W, Lu Y M, Fan H, et al. Wet-etching-assisted femtosecond laser holographic processing of a sapphire concave microlens array[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9604-9608.
- [26] Kadan V, Blonskyi I, Shynkarenko Y, et al. Single-pulse femtosecond laser fabrication of concave microlens- and micromirror arrays in chalcogenide glass[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 283-289.
- [27] Zhang F, Yang Q, Bian H, et al. Fabrication of chalcogenide glass based hexagonal gapless microlens arrays via combining femtosecond laser assist chemical etching and precision glass molding processes[J]. *Materials*, 2020, 13(16): 3490.
- [28] Liu F, Yang Q, Chen F, et al. Low-cost high integration IR polymer microlens array[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1600-1602.
- [29] 张良, 戴博, 张大伟. 人工复眼的研究进展[J]. *光学仪器*, 2021, 43(4): 86-94.
- Zhang L, Dai B, Zhang D W. Research progress of artificial compound eye[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(4): 86-94.
- [30] Gao X F, Yan X, Yao X, et al. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(17): 2213-2217.
- [31] Lin Y, Han J P, Cai M Y, et al. Durable and robust transparent superhydrophobic glass surfaces fabricated by a femtosecond laser with exceptional water repellency and thermostability[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(19): 9049-9056.
- [32] Wu X H, Chen Z. A mechanically robust transparent coating for anti-icing and self-cleaning applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(33): 16043-16052.
- [33] Liu X Q, Yang S N, Yu L, et al. Rapid engraving of artificial compound eyes from curved sapphire substrate[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(18): 1900037.
- [34] Liu F, Bian H, Zhang F, et al. IR artificial compound eye[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4): 1901767.
- [35] Jin G X, Hu X Y, Ma Z C, et al. Femtosecond laser fabrication of 3D templates for mass production of artificial compound eyes[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2019, 2(3): 110-117.
- [36] Chen Q, Wang D N, Gao F. Simultaneous refractive index and temperature sensing based on a fiber surface waveguide and fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1209-1212.
- [37] Kawamura K, Ogawa T, Sarukura N, et al. Fabrication of surface relief gratings on transparent dielectric materials by two-beam holographic method using infrared femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics B*, 2000, 71(1): 119-121.
- [38] Kohoutek T, Hughes M A, Orava J, et al. Direct laser writing of relief diffraction gratings into a bulk chalcogenide glass[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(10): 2779.
- [39] Wang L, Chen F, Wang X L, et al. Low-loss planar and stripe waveguides in Nd<sup>3+</sup>-doped silicate glass produced by oxygen-ion implantation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(5): 053112.
- [40] Nalivaiko V I, Ponomareva M A. Optical grating waveguide sensors based on chalcogenide glasses[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2019, 126(4): 439-442.
- [41] Nolte S, Will M, Burghoff J, et al. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(1): 109-111.
- [42] Li S L, Ye Y K, Shen C Y, et al. Femtosecond laser inscribed cladding waveguide structures in LiNbO<sub>3</sub> crystal for beam splitters[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(11): 117103.
- [43] Zhang Q, Li M, Xu J, et al. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(5): 503-507.
- [44] Zhang X L, Yu F, Chen Z G, et al. Non-Abelian braiding on photonic chips[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(5): 390-395.
- [45] Mizeikis V, Sun H B, Marcinkevicius A, et al. Femtosecond laser micro-fabrication for tailoring photonic crystals in resins and silica[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2001, 145(1/2): 41-47.
- [46] Gailevičius D, Purlys V, Staliunas K. Photonic crystal spatial filters fabricated by femtosecond pulsed Bessel

- beam[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 4969-4972.
- [47] Wei D Z, Wang C W, Wang H J, et al. Experimental demonstration of a three-dimensional lithium niobate nonlinear photonic crystal[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(10): 596-600.
- [48] Chen P C, Wang C W, Wei D Z, et al. Quasi-phase-matching-division multiplexing holography in a three-dimensional nonlinear photonic crystal[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 146.
- [49] Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, et al. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 646-648.
- [50] Antipov S, Ams M, Williams R J, et al. Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 30-40.
- [51] Lu P, Mihailov S J, Ding H M, et al. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 926-931.
- [52] Baghdasaryan T, Geernart T, Morana A, et al. IR femtosecond pulsed laser-based fiber Bragg grating inscription in a photonic crystal fiber using a phase mask and a short focal length lens[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14741-14751.
- [53] Wolf A, Dostovalov A, Bronnikov K, et al. Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13978-13990.
- [54] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [55] She L, Qi Q Y, Zhang P Q, et al. Mid-infrared fluorindate glass long-period fiber grating by femtosecond laser inscription[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103808.
- [56] Liu L T, Chen F Y, Xiao X S, et al. Direct femtosecond laser inscription of an IR fluorotellurite fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4832-4835.
- [57] Goebel T A, Nold J, Hupel C, et al. Ultrashort pulse written fiber Bragg gratings as narrowband filters in multicore fibers[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(19): D43-D51.
- [58] Liu C, Jiang Y J, Yang H L, et al. Highly localized fiber Bragg gratings with strong cladding mode inscribed by femtosecond laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(11): 587-590.