

激光与光电子学进展

光纤集成微纳结构器件的双光子聚合制备及应用

廖常锐^{1,2}, 李博哲^{1,2}, 邹梦强^{1,2}, 熊聪^{1,2}, 朱梦^{1,2}, 余建^{1,2}, 李驰^{1,2}, 王义平^{1,2*}

¹深圳大学物理与光电工程学院教育部/广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学广东省光纤传感技术粤港联合研究中心, 深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 随着光纤技术的发展, 光纤器件的结构越来越复杂, 功能越来越多样, 体积也越来越小, 这对光纤器件的加工提出了很大的挑战。飞秒激光双光子聚合方法具有突破光学衍射极限的超高加工精度和无掩模直写的真三维加工能力, 在微纳结构加工中拥有独特优势, 为微纳结构与光纤集成提供了一种全新的思路和可能性。介绍飞秒激光双光子聚合制备光纤微纳结构器件方向的最新研究进展、应用前景与展望。

关键词 光纤光学; 双光子聚合; 飞秒激光; 光纤器件; 微纳结构; 光学微腔; 微透镜器件

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306005

Optical Fiber Integrated Micro/Nano-Structured Device Fabricated by Femtosecond Laser Induced Two-Photon Polymerization and Its Applications

Liao Changrui^{1,2}, Li Bozhe^{1,2}, Zou Mengqiang^{1,2}, Xiong Cong^{1,2}, Zhu Meng^{1,2},
Yu Jian^{1,2}, Li Chi^{1,2}, Wang Yiping^{1,2*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Shenzhen Key Laboratory of Photonic Devices and Sensing Systems for Internet of Things, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract With the development of optical fiber technology, optical fiber devices have more complex structure, more diverse functions, and more compact size. This poses a great challenge to the microfabrication of optical fiber devices. Femtosecond laser induced two-photon polymerization has the advantages of ultrahigh processing accuracy which breaks through the optical diffraction limit and true three-dimensional processing ability of direct writing without mask. It has unique advantages in the processing of micro/nano-structure, and provides a new idea and possibility for the integration of micro/nano-structure and optical fiber. In this paper, the latest research progress and application prospect of femtosecond laser induced two-photon polymerization for fiber integrated micro/nano-structured devices are introduced.

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-06-05; 录用日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61635007, 62075136)、广东省国际科技合作项目(2020A0505100066)、深圳市优秀科技青年人才培养项目(RCYX20200714114524139)

通信作者: *ypwang@szu.edu.cn

Key words fiber optics; two-photon polymerization; femtosecond laser; optical fiber device; micro/nano-structure; optical micro-cavity; microlens device

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 140.3390

1 引言

光纤本质上是一种利用光的全内反射原理制成的导光元件^[1]。光纤一般由高折射率的纤芯和低折射率的包层组成。高折射率纤芯由玻璃或石英构成,而低折射率包层一般由玻璃、石英或塑料构成。自从光纤问世以来,其由于具有抗电磁干扰、质量轻、尺寸小、损耗低、价格便宜等优点,被广泛用于传感、成像和通信等领域^[2-4]。随着光纤传感和通信技术的飞速发展,对性能更好、用途更广的光纤器件的需求越来越大,这推动了特种光纤的研发和对光纤器件制备技术的探索。传统的光纤器件制备技术(例如,熔融拉锥制备的微纳光纤和侧抛制备的D型光纤)为微纳结构提供了强光纤倏逝场的激发条件,如表面等离子体共振(SPR)^[5-6]和回音壁模式(WGM)^[7]。但石英光纤的热光系数和热膨胀系数等物理参数并不理想,以至于器件难以获得更高的传感灵敏度和探测分辨率。其他例如利用二氧化碳激光照射^[8-9]、飞秒激光烧蚀^[10]、抛磨^[11]和化学腐蚀^[12]等方法制备的光纤器件不仅表面粗糙,而且由于减材制造,器件强度较低。因此亟待一种高精度且高稳定性的加工方式制备光纤器件。

飞秒激光诱导双光子聚合是一种增材制造的方式,可以实现微型三维结构的3D打印制备^[13-16]。双光子吸收是飞秒激光与物质相互作用时同时吸收两个单个能量低于禁带宽度的光子的过程,从而实现从基态到激发态的跃迁^[17-23]。而双光子吸收速率与光强的平方成正比,因此聚合反应只能发生在光强足够高的激光焦点中心的区域。正是由于这种非线性阈值效应,双光子聚合的最小特征尺寸可以轻易地突破光学极限^[24-25],目前最小的特征尺寸可以达到10 nm^[26]。配合计算机辅助设计(CAD)、扫描振镜及三维运动控制系统,飞秒激光能在透明的光刻胶内直写复杂的定制化的三维结构,使得亚波长级的微纳器件的制造成为可能^[27-28]。目前双光子聚合已经广泛应用于微机械^[29]、微流体^[30-31]、生物医学^[32-33]和微纳光子学^[34]等领域。

双光子聚合技术的高精度、高灵活性和真三维

加工等独特的优点,为光纤微纳器件的集成与制备提供了全新的方法与思路。结合“光纤实验室”概念,在光纤内部以及光纤端面集成功能性的微纳结构器件成为可能。本文主要从光纤光栅、光学微腔干涉仪、衍射光学器件和微透镜器件4个方面总结了飞秒激光双光子聚合制备的光纤微纳结构器件及其应用,探讨了这类光纤集成微纳结构器件的发展前景。

2 光纤光栅

2.1 双光子聚合制备光纤光栅

飞秒激光诱导双光子聚合技术由于优异的三维加工特性和超越衍射极限的分辨率,现已被广泛用于加工微纳尺度的功能性结构器件。光纤光栅作为光纤传感领域中重要的元件,也是研究热点之一。用飞秒激光诱导双光子聚合技术实现的聚合物光纤光栅由于可以利用聚合物材料的物理化学特性,因此相较于传统的石英光纤光栅,有独特的优势。优势有:用具有超高热光系数的光刻胶聚合物材料,可实现超高温灵敏度度的光纤传感器;用掺杂磁性纳米颗粒的光刻胶聚合物制备的光栅,可实现对周围磁场的测量等。

图1为目前用飞秒激光诱导双光子聚合技术制备光纤内集成聚合物光纤光栅的一般工艺手段^[35-36]。图1(a)展示了激光诱导双光子聚合加工的一般光路图。飞秒激光脉冲经过扩束器、能量衰减器、电动快门和高数值孔径的显微物镜后聚焦于样品上,如图1(b)所示,通过PC端控制三维位移平台的精确移动,可实现任意微纳三维结构的制备。图1(c)为在微纳光纤上加工制备的Bragg光栅或螺旋型光栅。

而如果想要在光纤内部集成功能性结构,如Bragg光栅,则需要一套更为繁琐的加工步骤,如图1(d)~(g)所示,大致可分为4步,熔接、烧蚀、聚合、显影。

熔接:如图1(d)所示,通过电弧放电的方式在两根单模光纤之间熔接一段空心光纤。空心光纤的内径为10~40 μm ,外径为125 μm 。为了使加工得到的聚合物光纤光栅有最佳的模式匹配效率,此

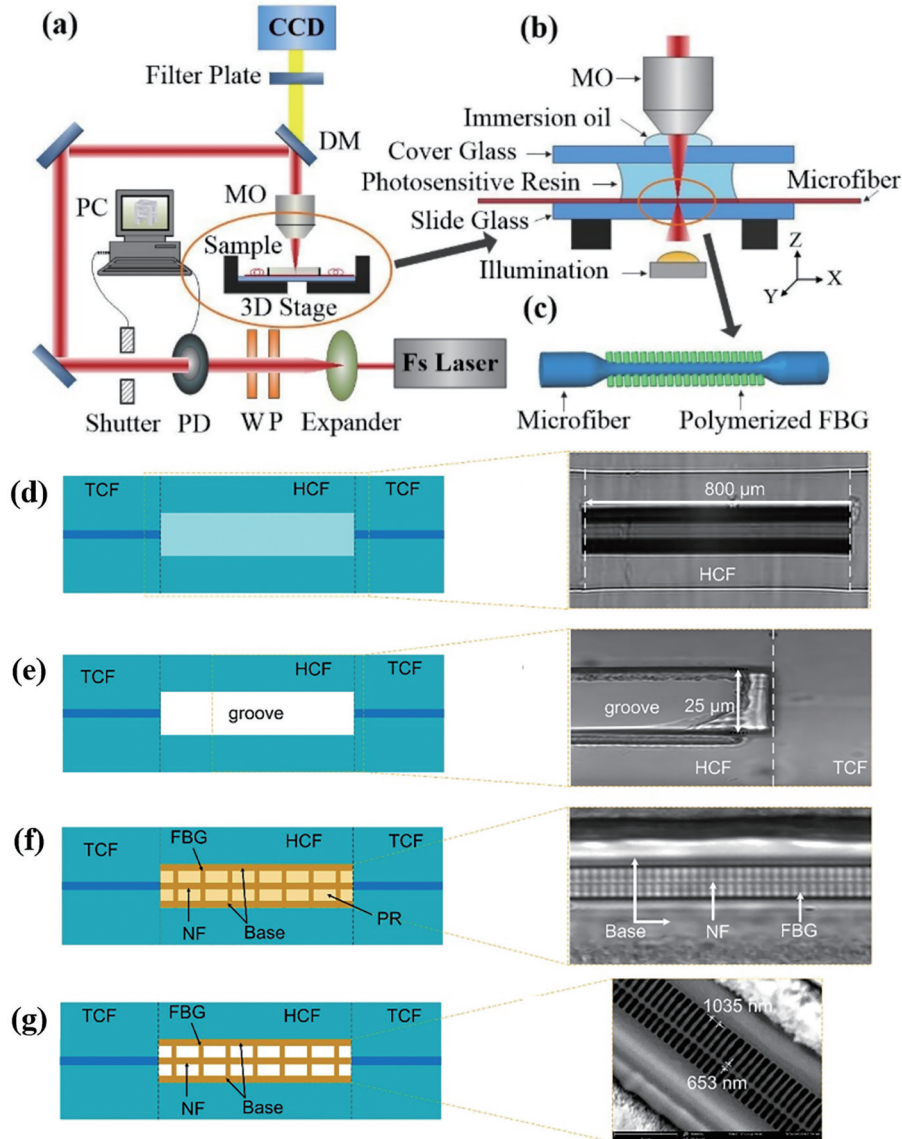


图 1 飞秒激光诱导双光子聚合工艺的加工示意图。(a)飞秒激光微加工系统光路图^[35];(b)双光子聚合制造过程中的微纳光纤固定方法^[35];(c)聚合物 Bragg 光栅示意图^[35];(d)熔接过程^[36];(e)烧蚀过程^[36];(f)聚合过程^[36];(g)显影过程^[36]

Fig.1 Processing diagram of femtosecond laser-induced two-photon polymerization process. (a) Optical path diagram of femtosecond laser micromachining system^[35]; (b) methods of fixing micro/nano-fibers in the process of two-photon polymerization^[35]; (c) polymer Bragg grating diagram^[35]; (d) welding process^[36]; (e) ablation process^[36]; (f) polymerization process^[36]; (g) development process^[36]

处选用的单模光纤可以是小芯径的单模光纤,一般纤芯直径为 5.8 μm 或更小。

烧蚀:完成熔接工艺后,需要用飞秒激光器对中间空心光纤部分进行烧蚀操作,其目的是为了在后续加工时,让液态光刻胶能顺利地填充空气芯内部,以实现加工出来的结构完全集成在传输光纤内部。此步骤中烧蚀的长度一般为空心光纤长度,宽度略大于或等于空心光纤内径即可。随后需要对烧蚀完成的样品进行超声清洗,以洗去烧蚀过程中

产生的碎屑残渣。

聚合:经过上述两步得到的样品可固定于一块载玻片上,滴上光刻胶,待光刻胶完全流入空气芯内部后,盖上盖玻片,放置于如图 1(a)所示的飞秒微纳加工平台上进行加工。加工的结构形貌一般先是由软件建模或程序控制得到的,此处加工的光纤光栅结构包括一根连接两端单模光纤的百纳米级聚合物波导和架空其上的聚合物光栅。为实现对 C 波段,如 1550 nm 光的波长选择,加工的光栅周

期为 1035 nm。

显影:完成上述步骤后,希望得到的功能性光纤光栅结构就已固化于光纤内部,只要配置一定比例的显影液就可以有效洗去未固化的液态光刻胶部分,得到理想的光纤内集成聚合物微纳波导光栅结构。此处的显影液一般选用丙酮、异丙醇或是两者的混合物。这样,就实现了飞秒激光诱导双光子聚合光纤内集成聚合物波导光栅器件的加工制备。

2.2 光纤光栅的应用

双光子聚合制备的光纤集成光波导器件利用聚合物材料替代光纤的石英材料,从而器件性能得到提高。例如,光纤布拉格光栅(FBG)^[37-38]的传感灵敏度受到石英材料较低的热光系数和热膨胀系数的限制,而双光子聚合制备的聚合物光波导器件可以很好地解决这个难题。光纤集成光波导器件可以分为光纤表面和光纤内部两种集成方式。在光纤表面集成方面,深圳大学王义平教授课题组^[35]在 2018 年首次利用双光子聚合方法将直线型的聚

合物光栅微结构打印到微光纤的表面,实现了光纤表面集成的布拉格光栅,如图 2(a)所示。该课题组^[39]在 2019 年又报道了微光纤表面集成的螺旋型布拉格光栅,如图 2(b)所示,与直线型光栅相比,这种螺旋型的布拉格光栅具有更佳的光谱质量、机械强度和折射率传感灵敏度。在光纤内部集成方面,深圳大学王义平教授课题组^[40]在 2018 年利用双光子聚合方法在空心光纤内部打印制备了悬挂式的聚合物波导光栅,如图 2(c)所示,其温度灵敏度高达 $-220 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是石英布拉格光栅灵敏度的 10 倍。同年,该课题组^[41]利用双光子聚合制备了光纤内部集成的聚合物波导干涉仪,结果图 2(d)所示,实现了灵敏度为 $6.4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的温度传感应用。2020 年,该课题组^[36]进一步优化了聚合物波导结构,将光波导的宽度减小至 653 nm,并成功研制出一种新型的光纤集成全光调制器,如图 2(e)所示,该调制器具有 176 ns 的快速时间响应和 $45.43 \text{ pm}/\text{mW}$ 的线性调制性能。

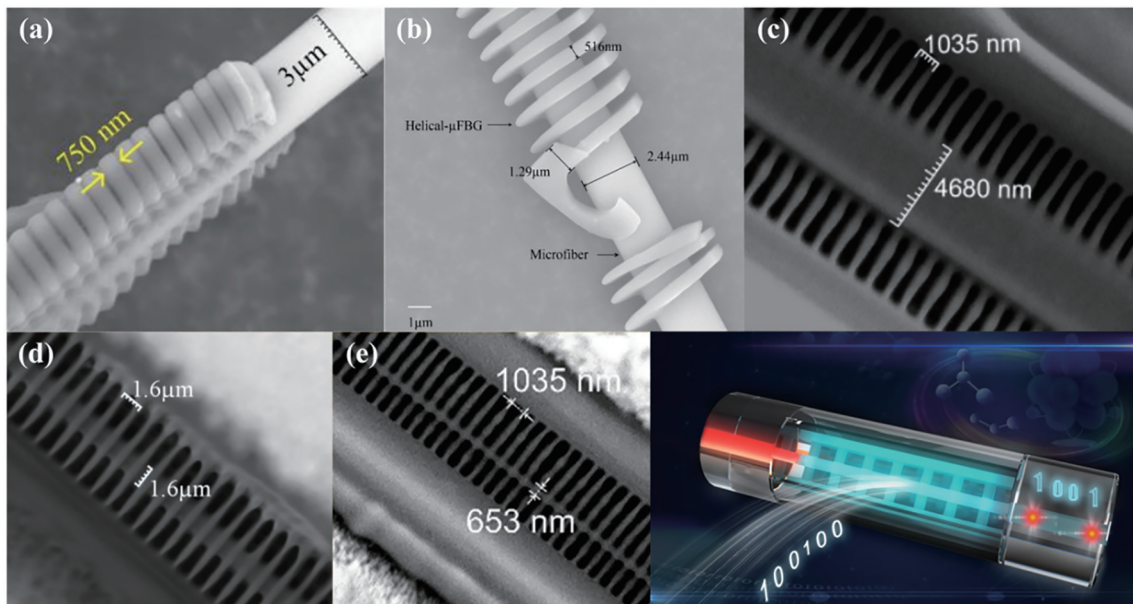


图 2 利用双光子聚合方法制备的各种光纤集成光波导器件。(a)微光纤表面集成的直线型聚合物布拉格光栅^[35]; (b)微光纤表面集成的螺旋型聚合物布拉格光栅^[39]; (c)空心光纤内集成的聚合物波导布拉格光栅^[40]; (d)空心光纤内集成的聚合物波导干涉仪^[41]; (e)空心光纤内集成的聚合物布拉格光栅型全光调制器^[36]

Fig. 2 Various optical integrated waveguide devices fabricated by two-photon polymerization. (a) Linear polymer FBG integrated on microfiber surface^[35]; (b) helical FBG integrated on microfiber surface^[39]; (c) polymer waveguide FBG integrated in hollow fiber^[40]; (d) polymer waveguide interferometer integrated in hollow fiber^[41]; (e) all-optical modulator based on a polymer FBG integrated in hollow fiber^[36]

3 光纤微腔干涉仪

3.1 双光子聚合制备光纤微腔干涉仪

光学微腔是一种具有高灵敏度、高检测精度、

低检测极限的传感结构,应用领域广泛,种类繁多。以光纤为载体的光学微腔十分紧凑,可有效利用光与物质的相互作用,应用于传感器、激光器等光纤器件的开发。

在光纤中制备微腔的方式主要有减材和增材制造。如皮秒激光烧蚀、飞秒激光烧蚀、聚焦离子束铣削等方法,可在光纤基底上直接减材制备各类微腔,但受限于加工精度、加工效率、光纤结构及稳定性等问题。双光子聚合作为一种高精度、灵活的增材制造方法,可在光纤基底上直接增材打印各类复杂的光纤微腔,有效实现光学微腔与光纤的精密集成。

2020年,深圳大学王义平教授课题组^[42]报道了利用双光子聚合技术打印的一种光纤端面微悬臂梁法布里珀罗(FP)腔,并在镀钯氢敏修饰后,用于氢气传感,如图3(a)所示。此工作利用双光子聚合3D光刻技术,直接在光纤端面打印微悬臂梁,高加工精度保证了微悬臂梁FP腔的强光信号,为制备出极薄的微悬臂梁提供了条件。实验中对不

同高度的微悬臂梁进行了光谱测量,稳定、对比度较大的反射光谱显示其制备过程具备高度可重复性,如图3(b)所示。扫描电子显微镜表征了实际制备的样品形貌,微悬臂梁表面光滑、结构稳定、尺寸与设计一致,如图3(c)所示。灵活的设计和快速的加工工艺提高了效率。更软的聚合物材质为基于静态模式的微悬臂梁提供了更高的挠度灵敏度。通过磁控溅射的方式在微悬臂梁上表面镀覆钯膜,形成双材料悬臂梁。利用钯膜吸氢膨胀的原理,使双材料悬臂梁之间产生应力差,弯曲微悬臂梁,通过光学干涉法,精确解调环境中的氢气浓度。在氢体积分数从0%上升至4.5%时,该传感器的灵敏度约为 $-2 \text{ nm} \cdot \%^{-1}$,且响应时间短,在4%时约为13.5 s,将在医疗和生物传感等方面有广阔的应用前景。

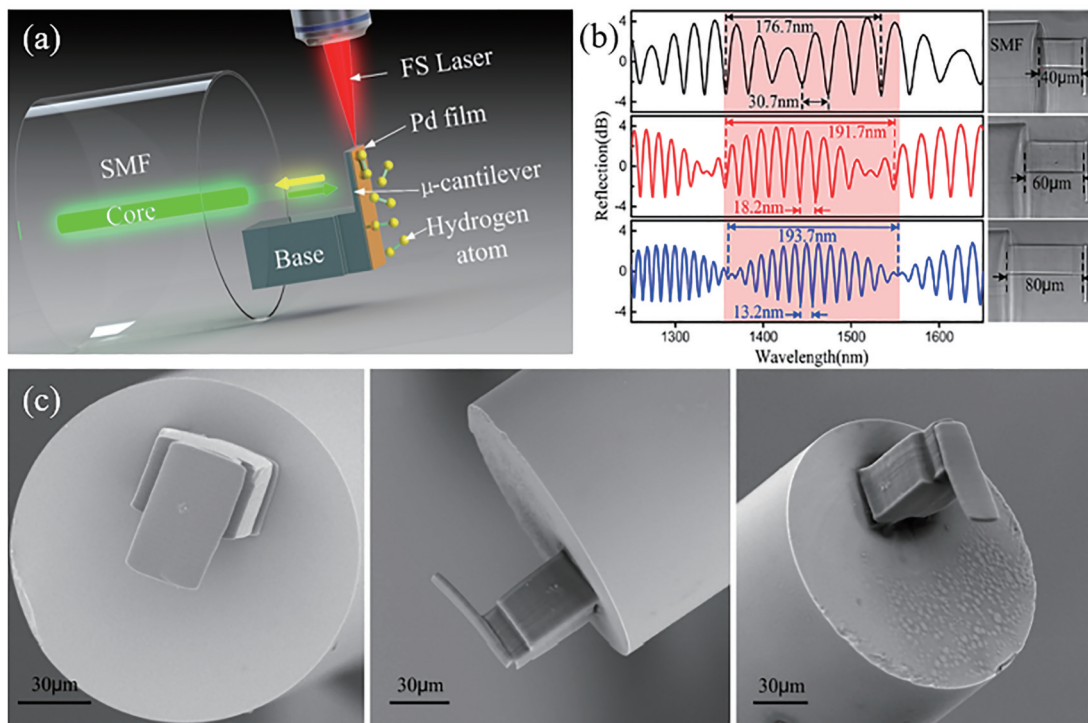


图3 光纤端面聚合物微悬臂梁氢气传感器^[42]。(a)原理图;(b)不同高度微悬臂梁的反射光谱;(c)微悬臂梁的扫描电镜图
Fig. 3 Hydrogen sensor based on fiber end polymer μ -cantilever^[42]. (a) Schematic diagram; (b) reflection spectra of μ -cantilever beams at different heights; (c) scanning electron microscopy image of the polymer μ -cantilever

此传感器的制备主要包括四个部分:建模、聚合、显影、镀膜,如图4所示。在建模过程中,根据所设计微悬臂梁的形状,采用编程方式进行建模,编程的建模方式具备高灵活性,可在实验过程中任意调整形状参数。在聚合过程中,采用了从光纤侧面聚合的方式。将光刻胶滴注于光纤尖端并浸没端面进行聚合。采用飞秒激光,配合高数值孔径的油

浸物镜和高精密空气轴承平台对样品进行聚合。聚合加工是一项需要协调物镜、激光能量、扫描速度、线距、层距的工作。在聚合完成后,用丙酮与异丙醇的混合溶液对样品进行显影。显影完成后,对微悬臂梁上表面进行钯膜镀覆,以实现其氢敏性。

利用双光子聚合制备其他光纤光学微腔的方式与上例类似,根据结构的形态、复杂性,还可选择

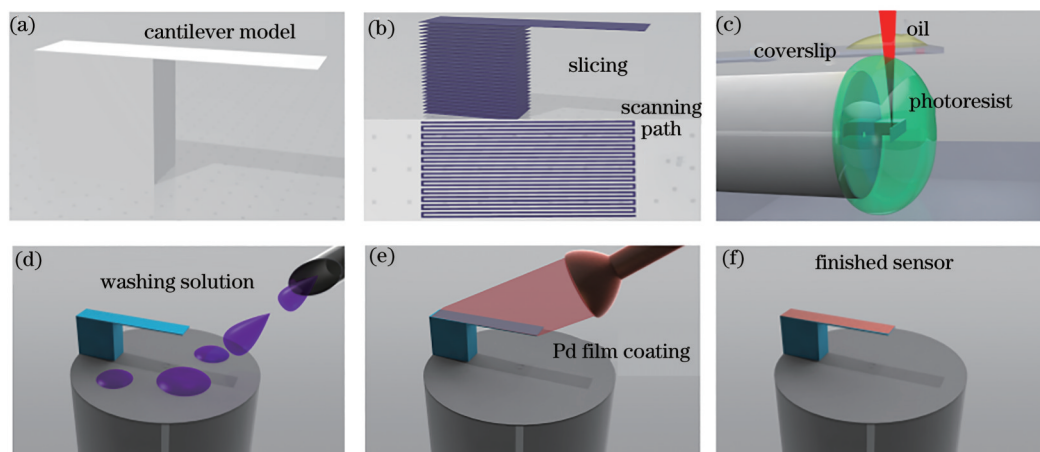


图4 聚合物微悬臂梁氢气传感器的制备流程。(a)建模;(b)分层、扫描路径设计;(c)聚合;(d)显影;(e)钯膜镀膜;(f)成品
Fig. 4 Fabrication process of the polymer μ -cantilever hydrogen sensor. (a) Modeling; (b) model slicing and scanning path design; (c) polymerization; (d) developing; (e) palladium film coating; (f) finished product

侧式或立式的装配方式,对于特定的光刻胶选择特定的显影液进行显影,对于器件特定的应用场景对结构进行特定的修饰。

3.2 光纤微腔干涉仪的应用

光学微腔的应用主要集中于传感领域,基于待测物直接或间接引起的腔内介质折射率变化和腔体形态的变化,可实现对待测参量的实时测量。FP腔是被研究最广泛的光纤光学微腔。2015年, Melissinaki等^[43]成功在光纤端面制备出FP腔,并用于检测挥发性有机溶剂。微腔底部开口设计,可用于残留光刻胶的洗涤和挥发性有机溶剂的进入;微腔表面楔形角设计用于消除多光束干涉效应。该传感器实现了检测下限为 4×10^{-6} 的乙醇蒸汽体积分数检测,灵敏度高达 1.5×10^3 nm/RIU(RIU为折射率单位)。2015年, Li等^[44]在光纤端面制备了FP腔用于折射率和温度的同时测量。该传感器利用多光束干涉,通过跟踪反射光谱中两个峰的漂移,实现了折射率和温度双参量测量。实验得到两个峰对应的折射率灵敏度分别为1539 nm/RIU和863 nm/RIU,温度灵敏度分别为451 pm/°C和206 pm/°C。随后, Li等^[45]用液体聚合物填充开放腔,并将其密封来提高灵敏度,器件的温度灵敏度提高到877 pm/°C,灵敏度是固体交联聚合物FP腔^[44]的3倍多。此外, Li等^[46]于2017年通过将开放腔的聚合物膜的厚度减小到1.6 μ m,制作了高灵敏度的光纤声波传感器,其声压灵敏度在1 kHz频率下达到 (0.0508 ± 0.0052) nm/Pa。随着双光子聚合微纳加工工艺的不断发展,基于光纤FP腔的复杂结构已能被很好地打印出来。2018年,

Thompson等^[47]设计了一种在单模光纤端面上的微型光纤力传感器。该传感器是由一系列薄板和弹簧制成的,薄板由弹簧支撑,弹簧在外力的作用下被压缩,引起FP腔长的变化,从而得到不同的反射光谱,最终实现0~50 μ N范围内力的感测,测量误差约为1.5 μ N。同年, Power等^[48]提出了一种更复杂的具有集聚力传感器的绳系式三维微抓钳,同样集成在光纤的端面,其长度和宽度约为100 μ m,使用光学干涉测量法实现了轴向力的测量。

由于双光子聚合微纳加工具有精度高和灵活性好的特点,它可以打印出高质量的曲面,并可以应用于微环谐振腔的制备。2005年, Sherwood等^[49]报道了一种基于侧面抛光光纤微环谐振器的新型光纤器件,该器件避免了光纤到芯片的耦合和连接问题,初步验证了双光子聚合制备聚合物微环谐振器的可行性。此外, Wei等^[50]于2016年报道了一种聚合物WGM传感器,该传感器由锥形波导、Y型分束器、平行波导、微圆柱体组成。在1536 nm波长下,实验测得其品质因数为6400,并且具有高达154.84 nm/RIU灵敏度,可用于液体折射率的精确测量。2019年,深圳大学王义平教授课题组^[51]在微纳光纤上设计并制备了WGM谐振器,其使用两种类型的环结构:圆形和跑道形。利用该器件,成功进行了温度测量,最大温度灵敏度为1.68 nm/°C,品质因数高达 1.9×10^3 。WGM谐振腔的制备局限于光纤侧面,近年来,在光纤端面集成WGM谐振腔也取得了很大的进展。2019年, Zhang等^[52]在七芯光纤端面制备了一种高品质因数的WGM谐振器用于蒸汽传感,该谐振器由微柱、棱镜、锥体、波导和环形谐振器组成。其品质因数高达

1.2×10^5 , 这是当时利用双光子聚合制备 WGM 谐振器的最高 Q 值。2020 年, Liu 等^[53]设计了一种新型气体传感器。该传感器集成在七芯光纤端面, 由对称悬挂在 3 个悬置微波导的两侧的两对 3 个 WGM 谐振器构成, 实验测得聚乙二醇单丁醚、异丙醇和酒精蒸汽的灵敏度分别为 9.54×10^6 pm、 2.70×10^6 pm 和 2.63×10^6 pm, 且具有良好的可逆性。双光子聚合微纳加工也可用于光纤内部集成 WGM 传感器的加工。2021 年, 深圳大学王义平课题组^[54]将 BaTiO₃ 微球作为 WGM 谐振腔, 将直径为 1 μm 的聚合物波导嵌在一段开槽空心光纤中, 制备了由 BaTiO₃ 微球组装而成的 WGM 谐振器, 实现了灵敏度为 -593 pm/°C 的温度传感应用。

4 衍射光学器件

4.1 双光子聚合制备光纤集成衍射光学器件

衍射光学器件是一类以光的衍射理论为设计基础, 具有分光、聚焦和成像等功能的光学元件。利用其独特的负热差与负色差特性, 与传统光学器件结合, 衍射光学器件可以很好地实现消色差与消热差, 从而减少系统中光学元件的数量, 简化光学系统结构, 灵活充分利用光能, 在开辟光学技术的数字化领域方面有重要价值。近年来衍射光学器件已广泛应用于光学传感^[55]、光通信^[56]等领域。现目前, 衍射光学器件的加工技术有很多种类型, 最早人们采用大规模集成电路制作的光刻工艺, 该技术适合大批量生产, 然而多次套刻之后的精度较低。20 世纪 90 年代初, 人们开始研究衍射光学器件的直写技术, 该技术无需掩模, 直接利用激光或者电子束写入浮雕图案, 但曝光时间长、设备庞大、成本昂贵。90 年代后期, 出现了准分子激光加工和灰阶掩模等新方法, 降低了成本, 缩短了制作周期。飞秒激光双光子聚合技术是一种无掩模的 3D 微纳加工技术。该技术具有对材料穿透性好、空间选择性高的优点, 近年来已成为全球制造各种功能性微器件和纳米器件的一大热门技术, 特别适用于制造具有若干光学特性的衍射光学器件。

螺旋波带片 (SZP) 作为一种典型的聚焦衍射光学元件, 可以被视为一个螺旋相位片与菲涅耳波带片的复合结构。其透过率函数通常可以表达为

$$T_l(r, \varphi) = \exp\left(i l \varphi - \frac{i \pi r^2}{\lambda f}\right), \quad (1)$$

式中: l 为 SZP 的微结构拓扑荷 (或螺旋臂数);

(r, φ) 为 SZP 微结构面的极坐标; λ 和 f 分别为 SZP 的名义运行波长和焦距。为了易于加工且使光纤端面加工的 SZP 微结构能够保持较高的聚焦衍射效率, 在光纤端面上设计制备相位型的二值化 SZP 微结构。整个光纤端面 SZP 的构成如图 5 所示, 从下至上分别为单模光纤、渐变折射率光纤、圆柱形基底和二值化的 SZP 微结构。

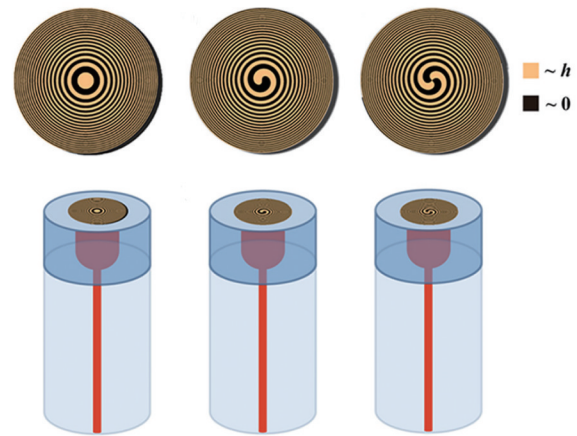


图 5 双光子聚合方法制备的光纤端面 SZP 结构^[55]

Fig. 5 SZP structure of optical fiber end face prepared by two-photon polymerization method^[55]

当入射光分别透过二值化 SZP 微结构的脊区和槽区时, 由于折射率指数的差别, 这两部分光束将产生 π 的相位差, 对应脊区的高度 h 可以表达为

$$h = \frac{\lambda}{2(n_{\text{SZP}} - n_{\text{air}})}, \quad (2)$$

式中: n_{SZP} 和 n_{air} 分别为 SZP 微结构脊区材质的折射率和空气折射率。二值化 SZP 微结构被设计的运行波长为 λ , 定义焦距为 f 。实验采用的光刻胶被聚合之后对 1550 nm 激光的折射率大小为 n_{SZP} 。空气的折射率取值为 n_{air} , 据此可以求得 SZP 微结构的脊区高度 h 。与此同时, 为了克服色差给聚合加工带来的影响, 在结构设计中为 SZP 增添了一块存在一定厚度的同材质圆柱形基板, 确保聚合的 SZP 被牢牢地粘附在渐变折射率光纤的端面上。

飞秒激光双光子聚合系统的实验光路示意图如图 6 所示。从光纤激光器输出的 780 nm 波长激光首先通过振镜 (x_g, y_g) 系统, 然后经物镜聚焦到光刻胶中。微结构写制完成后, 经显影液显影, 然后使用氮气吹干光纤端面微结构。图 7 为在复合光纤微结构端面成功制备的 SZP 微结构 ($l=0, 1, 2$)。

4.2 光纤集成衍射光学器件的应用

光纤端面集成不同光学特性的衍射光学器件

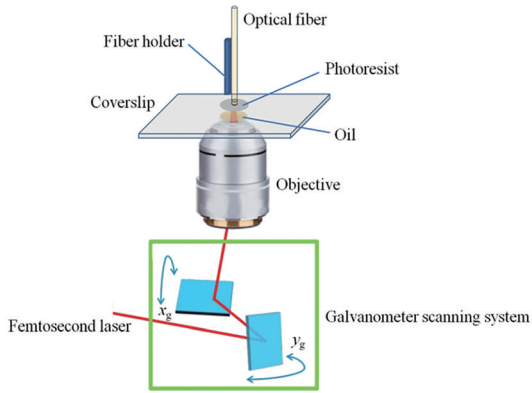


图 6 光纤端面 SZP 微结构写制光路图^[57]

Fig. 6 Optical path diagram of the optical fiber end face written by the SZP microstructure^[57]

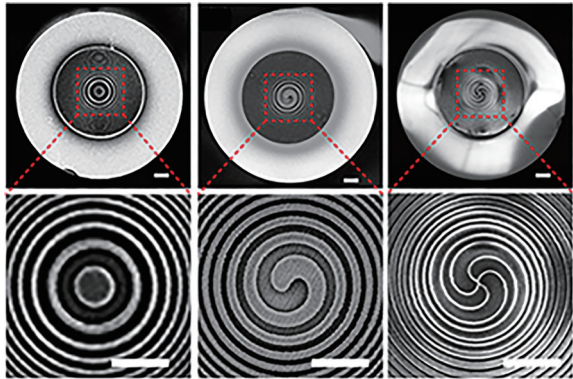


图 7 光纤端面 SZP 结构^[57]

Fig. 7 Fiber end face SZP structure^[57]

为微粒操控、光束整形及光谱分析等研究领域打开了一扇新的大门,将能够较大幅度地缩小仪器设备的成本、体积及能量的损耗,且回避了以往光纤与衍射光学器件间繁琐的光束对准问题。飞秒激光双光子聚合技术制备光纤集成衍射光学器件已经

成为近年来世界各国学者研究的前沿热点问题。双光子聚合这种具备无掩模高分辨的 3D 微纳加工技术可以在光纤端面制备出结构和形貌非常完美的衍射光学器件。

深圳大学王义平教授课题组近年来在双光子聚合制备光纤集成衍射光学器件方面做了较多的研究工作。2020 年,该课题组^[57]在单模光纤熔接渐变折射率多模光纤的复合光纤结构顶端,基于飞秒激光双光子聚合技术制备出了具有不同螺旋臂数的二值化螺旋波带片,成功地实现了一类紧凑型的全光纤聚焦涡旋光束发生器。通过对该类全光纤发生器输出光场特性进行实验测量,发现它们均能够较好地实现与数值仿真结果相匹配的涡旋聚焦效果。同时,通过弹性地设计端面螺旋波带片的几何结构参数(如螺旋臂数),可以实现对输出光场特性如焦距、焦斑直径、涡旋拓扑电荷等的精确调控。由于可以有效地克服涡旋光束传播过程中所固有的高发散特性,该类全光纤聚焦涡旋光束发生器可被应用于光纤微粒操控、全光纤受激发射损耗(STED)显微镜以及轨道角动量(OAM)光纤通信等不同领域中。

二值化螺旋波带片具有结构设计简单、加工效果更易于得到保证等优点,然而由于高阶衍射的存在,聚焦效率和涡旋纯度较低。通过对光纤端面聚合加工工艺的深入摸索,2020 年该课题组^[58]成功在光纤端面上制备出了 Kinoform 型螺旋波带片,如图 8 所示。由于该微结构具有连续的抛物线型表面轮廓结构,因此具备较高的衍射效率和较高的涡旋纯度值。该类光纤聚焦涡旋光束发生器经检测为一种偏振无关器件,因此在光通信和光学微粒操控等方面也具有重要的应用价值。

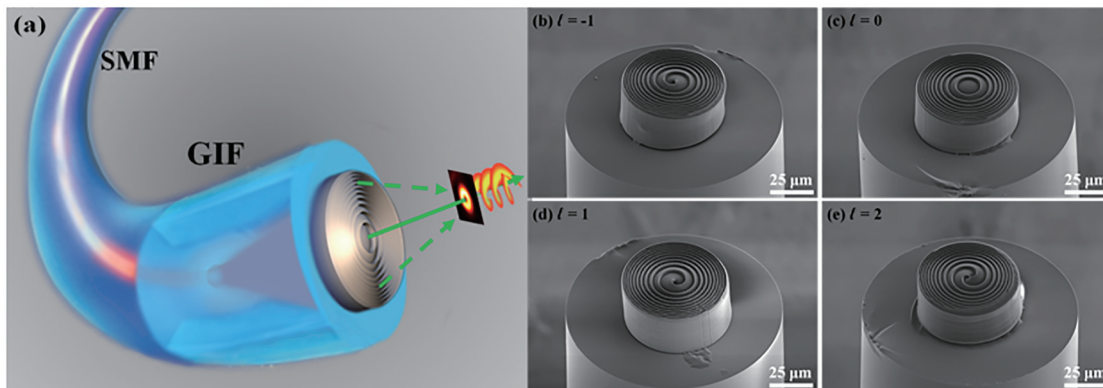


图 8 双光子聚合制备的光纤端面 Kinoform 型螺旋波带片^[58]。(a)结构设计;(b) $l = -1$; (c) $l = 0$; (d) $l = 1$; (e) $l = 2$

Fig. 8 Kinoform SZP of fiber end face prepared by two-photon polymerization^[58]. (a) Structure design; (b) $l = -1$; (c) $l = 0$; (d) $l = 1$; (e) $l = 2$

5 微透镜器件

5.1 双光子聚合制备光纤集成微透镜

在光纤上直接制作微透镜元件不仅实现了系统集成,而且利用光纤作为光传输和收集的介质,可减少光信号在传输过程中的损耗。在光纤端面上制造微透镜的传统方法有激光微加工^[59-60]、聚焦离子束铣削^[61-62]、抛光技术^[63]、紫外固化^[64-65]及注射印刷^[66-70]等,这些方法存在分辨率低、体积受限等缺点。这些缺点使这些方法只能加工一些简单的微透镜结构,不能加工具有特殊需求、自由形式的光纤光学器件。因此将自由曲面透镜缩小到微纳光学尺度是目前光学微加工领域的一个挑战。自由形式的光学器件的制备多使用传统加工方式实现,如多轴车床、磁流变抛光、模制和离子束抛光技术。双光子聚合技术的出现成功地突破了这些限制,并且简化了制作工序。

2003年,Bianchi等^[71]首次利用双光子聚合制备了光纤端面微抛物面反射器。该结构基于全内反射原理,在外纤芯内传播的光被侧向抛物面反射。该结构的中心部分具有以焦点为中心的球形抛物线表面的点。在多模光纤的端面制备了覆盖住纤芯的微抛物面反射器,确保纤芯出射的光能够完全进入反射器。反射器的底部和顶部直径分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$,高度为 $26.5\ \mu\text{m}$,焦距和工作距离分别为 $3.8\ \mu\text{m}$ 和 $11\ \mu\text{m}$ 。该反射器使多模光纤的数值孔径从0.22增大到0.98,从而实现分辨率高于普通光纤的荧光成像。2016年,Gissibl等^[72]利用双光子聚合在光纤端面集成的自由曲面微光学系统包括在单模光纤端面上集成的光纤准直器、环形透镜、自由曲面透镜、手性光子晶体。使用了浸入法(将光敏介质直接放在物镜上)制备这些微光学元。光刻胶充当浸没介质,并且主体衬底可以直接浸入光敏浸没材料中。由于该方法不仅可以用于小的光学元件体积,而且不会受限于物镜的工作距离限制引起的小的制造高度,这对于工作距离短的高数值孔径物镜来说是非常重要的。此外,自由光学曲面的表面形状在形式和复杂性上不受限制,只要表面的特征尺寸大于双光子聚合最小体积元素,它就可以被制备出来。曝光后,显影剂需要渗透到结构的所有外部轮廓,因此,必须预留出显影液进出的孔洞,来保证透镜组间的空气间隔。这些结构都是按照具有一定层间距的逐层方式制造的,所以透镜

表面的粗糙度主要由层间距和光致抗蚀剂的邻近效应决定。此外,双光子聚合不限于特殊的衬底,几乎可以在任意的表面上进行加工,利用高数值孔径的物镜,可以轻易地实现 $200\ \text{nm}$ 以下的特征尺寸器件加工。因此,双光子聚合几乎可以在任何种类的主体元件或衬底上直接制造具有亚微米分辨率、体积高达立方毫米的自由形式光学器件。

5.2 光纤集成微透镜的应用

利用双光子聚合方法在光纤上集成微透镜元件,从而实现光操控、空间光耦合、光束整形及成像等功能。在光操控方面,2013年,Liberale等^[73]提出一种新型的集成系统,在光纤端面利用双光子光刻技术制作微棱镜光束偏转器,从而实现稳定的3D捕获。在空间分辨光谱学研究中,光与多芯光纤的耦合具有重要意义。双光子聚合可以将自由空间中的耦合器件完美地集成在光纤端面,从而实现纤芯对入射光的高效收集。2017年,Dietrich等^[74]报道了利用双光子聚合制作的小平面透镜阵列。该透镜阵列可提供接近100%的填充率和高达73%的耦合效率(低至1.4 dB的损耗),用于将光从自由空间中耦合到多芯光纤的纤芯中,实验证实了该器件在天体光子学应用中的可行性。2018年,Dietrich等^[75]在光纤端面上制作了光束整形微透镜元件,该微透镜使InP激光器和光纤之间的耦合效率达到88%。此外,他们还报道了能同时调整光束形状和传播方向的打印自由曲面镜,并探索了用于光束扩展的多透镜系统。2020年,Bremer等^[76]报道了一种量子点微透镜与3D打印微物镜相结合的片上集成单模光纤耦合器,实现了量子器件的实用化。该量子器件具有高宽带光子提取效率,单模光纤耦合效率可达22%。

光纤集成微光学元件的另外一种重要应用是将折衍射光学元件集成到光纤端面,实现输出光束整形。2020年,Schmidt等^[77]首次通过双光子聚合的方式,将自由形式的全息表面集成到单模光纤端面,实现了光场的调控。

利用双光子聚合方法在光纤端面集成微透镜结构的成像,不仅可以有效地缩小透镜尺寸,而且可以做到可控的微透镜面型,实现自由曲面透镜的制备,该方法在光学成像方面有巨大潜力。2016年,Gissibl等^[78]在传像光纤端面集成了微透镜组,构成了光纤内窥镜,实现了清晰的成像,可用于获取空器官或体内腔体的内部的图像。2020年,

Li 等^[79]展示了一种新的超薄探针制造技术,在单模光纤上集成了侧面自由曲面的显微光学元件,直径小于 130 μm ,成功制备了超薄畸变校正光学相干层析成像探针,并且通过对人和小鼠动脉粥样硬化成像,验证了该器件具有极高的成像质量和良好的机械灵活性。2020 年, Wang 等^[80]利用双光子聚合技术,在单模光纤端面制备出具有高分辨率的非球面微透镜,可在三个波长(561, 590, 630 nm)消除像差,并利用数值孔径为 0.6 的微透镜实现了光纤显微成像。

6 总结与展望

随着光纤传感、光纤成像、光纤操控等技术的快速发展,光纤集成微纳结构器件已逐渐成为新型光纤器件方向的研究热点。利用双光子聚合技术制备光纤微纳结构器件可以充分拓展光纤器件的材料体系和结构体系,以满足人们对具有更多功能、更高性能和更高集成度的光纤器件的迫切需求。在未来,双光子聚合技术与光纤的结合将会更加紧密,光纤集成微纳器件的应用可以通过聚合物材料的功能化,如在光刻胶中掺杂磁性纳米粒子、碳纳米管或生物量子点等功能粒子,为光纤集成微纳结构器件在微机械、微仿生和生化等领域的应用提供新的机遇。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [3] Hopkins H H, Kapany N S. A flexible fibrescope, using static scanning[J]. Nature, 1954, 173(4392): 39-41.
- [4] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [5] Zhao J, Cao S Q, Liao C R, et al. Surface plasmon resonance refractive sensor based on silver-coated side-polished fiber[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 230: 206-211.
- [6] Wu T S, Shao Y, Wang Y, et al. Surface plasmon resonance biosensor based on gold-coated side-polished hexagonal structure photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20313-20322.
- [7] Liao J, Yang L. Optical whispering-gallery mode barcodes for high-precision and wide-range temperature measurements[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 32.
- [8] Wang Y P, Wang D N, Jin W. CO₂ laser-grooved long period fiber grating temperature sensor system based on intensity modulation[J]. Applied Optics, 2006, 45(31): 7966-7970.
- [9] Wang Y P. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(8): 081101.
- [10] Lin C P, Liao C R, Zhang Y F, et al. Optofluidic gutter oil discrimination based on a hybrid-waveguide coupler in fibre[J]. Lab on a Chip, 2018, 18(4): 595-600.
- [11] An N, Tan T, Peng Z, et al. Electrically tunable four-wave-mixing in graphene heterogeneous fiber for individual gas molecule detection[J]. Nano Letters, 2020, 20(9): 6473-6480.
- [12] Li Z Y, Liao C R, Chen D N, et al. Label-free detection of bovine serum albumin based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometric biosensor[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17105-17113.
- [13] Cumpston B H, Ananthavel S P, Barlow S, et al. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication [J]. Nature, 1999, 398(6722): 51-54.
- [14] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697-698.
- [15] Deubel M, von Freymann G, Wegener M, et al. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications[J]. Nature Materials, 2004, 3(7): 444-447.
- [16] Farsari M, Chichkov B N. Two-photon fabrication [J]. Nature Photonics, 2009, 3(8): 450-452.
- [17] Xu B B, Zhang Y L, Xia H, et al. Fabrication and multifunction integration of microfluidic chips by femtosecond laser direct writing[J]. Lab on a Chip, 2013, 13(9): 1677-1690.
- [18] Farson D F, Choi H W, Lu C M, et al. Femtosecond laser bulk micromachining of microfluid channels in poly (methylmethacrylate)[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(3): 210-215.
- [19] Wochnowski C, Cheng Y, Hanada Y, et al. Fs-laser-induced fabrication of polymeric optical and fluidic microstructures[J]. Journal of Laser Micro/

- Nanoengineering, 2006, 1(3): 195-200.
- [20] Lim T W, Son Y, Jeong Y J, et al. Three-dimensionally crossing manifold micro-mixer for fast mixing in a short channel length[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(1): 100-103.
- [21] Zhu X, Naumov A Y, Villeneuve D M, et al. Influence of laser parameters and material properties on micro drilling with femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 1999, 69(1): S367-S371.
- [22] Hwang D J, Choi T Y, Grigoropoulos C P. Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass[J]. Applied Physics A, 2004, 79(3): 605-612.
- [23] Shah L, Tawney J, Richardson M, et al. Femtosecond laser deep hole drilling of silicate glasses in air[J]. Applied Surface Science, 2001, 183(3/4): 151-164.
- [24] Lee J T, George M C, Moore J S, et al. Multiphoton writing of three-dimensional fluidic channels within a porous matrix[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(32): 11294-11295.
- [25] Sugioka K, Cheng Y, Midorikawa K. Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture[J]. Applied Physics A, 2005, 81(1): 1-10.
- [26] Zhang Y L, Guo L, Wei S, et al. Direct imprinting of microcircuits on graphene oxides film by femtosecond laser reduction[J]. Nano Today, 2010, 5(1): 15-20.
- [27] Malinauskas M, Gilbergs H, Žukauskas A, et al. A femtosecond laser-induced two-photon photopolymerization technique for structuring microlenses[J]. Journal of Optics, 2010, 12(3): 035204.
- [28] Malinauskas M, Žukauskas A, Purlys V, et al. Femtosecond laser polymerization of hybrid/integrated micro-optical elements and their characterization [J]. Journal of Optics, 2010, 12(12): 124010.
- [29] Alsharif N, Burkatovsky A, Lissandrello C, et al. Design and realization of 3D printed AFM probes[J]. Small, 2018, 14(19): e1800162.
- [30] Wang J, He Y, Xia H, et al. Embellishment of microfluidic devices via femtosecond laser micromanufacturing for chip functionalization[J]. Lab on a Chip, 2010, 10(15): 1993-1996.
- [31] Kelemen L, Lepera E, Horváth B, et al. Direct writing of optical microresonators in a lab-on-a-chip for label-free biosensing[J]. Lab on a Chip, 2019, 19(11): 1985-1990.
- [32] Spagnolo B, Brunetti V, Leménager G, et al. Three-dimensional cage-like microcaffolds for cell invasion studies[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10531.
- [33] Hippler M, Lemma E D, Bertels S, et al. 3D scaffolds to study basic cell biology[J]. Advanced Materials, 2019, 31(26): e1808110.
- [34] Nocentini S, Martella D, Parmeggiani C, et al. Beam steering: structured optical materials controlled by light[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(15): 1870059.
- [35] Wang J, Lin C P, Liao C R, et al. Bragg resonance in microfiber realized by two-photon polymerization [J]. Optics Express, 2018, 26(4): 3732-3737.
- [36] Liao C R, Li C, Wang C, et al. High-speed all-optical modulator based on a polymer nanofiber Bragg grating printed by femtosecond laser[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(1): 1465-1473.
- [37] Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: present status and applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.
- [38] Grobnic D, Mihailov S J, Ballato J, et al. Type I and II Bragg gratings made with infrared femtosecond radiation in high and low alumina content aluminosilicate optical fibers[J]. Optica, 2015, 2(4): 313-322.
- [39] Liao C R, Yang K M, Wang J, et al. Helical microfiber Bragg grating printed by femtosecond laser for refractive index sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(12): 971-974.
- [40] Li C, Liao C R, Wang J, et al. Femtosecond laser microprinting of a polymer fiber Bragg grating for high-sensitivity temperature measurements[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3409-3412.
- [41] Li C, Liao C R, Wang J, et al. Femtosecond laser microprinting of a polymer optical fiber interferometer for high-sensitivity temperature measurement[J]. Polymers, 2018, 10(11): 1192.
- [42] Xiong C, Zhou J T, Liao C R, et al. Fiber-tip polymer microcantilever for fast and highly sensitive hydrogen measurement[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(29): 33163-33172.
- [43] Melissinaki V, Farsari M, Pissadakis S. A fiber-endface, Fabry-Perot vapor microsensor fabricated by multiphoton polymerization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(4): 344-353.

- [44] Li M, Liu Y, Zhao X L, et al. Miniature Pi-shaped polymer fiber tip for simultaneous measurement of the liquid refractive index and temperature with high sensitivities[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(10): 105701.
- [45] Li M, Liu Y, Gao R X, et al. Ultracompact fiber sensor tip based on liquid polymer-filled Fabry-Perot cavity with high temperature sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 233: 496-501.
- [46] Li M, Liu Y, Zhao X L, et al. High sensitivity fiber acoustic sensor tip working at 1550 nm fabricated by two-photon polymerization technique[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 260: 29-34.
- [47] Thompson A J, Power M, Yang G Z. Micro-scale fiber-optic force sensor fabricated using direct laser writing and calibrated using machine learning[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14186-14200.
- [48] Power M, Thompson A J, Anastasova S, et al. A monolithic force-sensitive 3D microgripper fabricated on the tip of an optical fiber using 2-photon polymerization[J]. *Small*, 2018, 14(16): 1703964.
- [49] Sherwood T, Young A C, Takayesu J, et al. Microring resonators on side-polished optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(10): 2107-2109.
- [50] Wei H M, Krishnaswamy S. Direct laser writing polymer micro-resonators for refractive index sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(24): 2819-2822.
- [51] Li Z Y, Liao C R, Wang J, et al. Femtosecond laser microprinting of a fiber whispering gallery mode resonator for highly-sensitive temperature measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1241-1245.
- [52] Zhang S Y, Tang S J, Feng S F, et al. High-Q polymer microcavities integrated on a multicore fiber facet for vapor sensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(20): 1900602.
- [53] Liu Q Q, Zhan Y X, Zhang S Y, et al. "Optical tentacle" of suspended polymer micro-rings on a multicore fiber facet for vapor sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11730-11741.
- [54] Li C, Zhu M, Ji P, et al. In-fiber BaTiO₃ microsphere resonator for high-sensitivity temperature measurement[J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 318.
- [55] Simonaho S P, Silvennoinen R. Sensing of wood density by laser light scattering pattern and diffractive optical element based sensor[J]. *Journal of Optical Technology*, 2006, 73(3): 170-174.
- [56] Li M, Chen Y, Yu J J, et al. Hollow top-hat DOE shaping method applied in space uplink chaotic optical communication for BER improvement[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(16): 828-830.
- [57] Yu J, Wang Y P, Yang W, et al. All-fiber focused beam generator integrated on an optical fiber tip[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(24): 241102.
- [58] Yu J, Bai Z Y, Zhu G X, et al. 3D nanoprinted kinoform spiral zone plates on fiber facets for high-efficiency focused vortex beam generation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 38127-38139.
- [59] Presby H M, Benner A F, Edwards C A. Laser micromachining of efficient fiber microlenses[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(18): 2692-2695.
- [60] Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500005.
杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500005.
- [61] Schiappelli F, Kumar R, Prasciolu M, et al. Efficient fiber-to-waveguide coupling by a lens on the end of the optical fiber fabricated by focused ion beam milling[J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73/74: 397-404.
- [62] Cabrini S, Liberale C, Cojoc D, et al. Axicon lens on optical fiber forming optical tweezers, made by focused ion beam milling[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83: 804-807.
- [63] Grosjean T, Saleh S S, Suarez M A, et al. Fiber microaxicons fabricated by a polishing technique for the generation of Bessel-like beams[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(33): 8061-8067.
- [64] Kim K R, Oh K, Chang S. Refractive microlens on fiber using UV-curable fluorinated acrylate polymer by surface-tension induced self-assembly[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2003, June 1-6, 2003, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D. C.: OSA, 2003: CFC7.
- [65] Kim J, Han M, Chang S, et al. Achievement of large spot size and long collimation length using UV curable self-assembled polymer lens on a beam expanding core-less silica fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2499-2501.
- [66] Kim J Y, Brauer N B, Fakhfour V, et al. Hybrid polymer microlens arrays with high numerical

- apertures fabricated using simple ink-jet printing technique[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(2): 259-269.
- [67] Cadarso V J, Perera-Núñez J, Jacot-Descombes L, et al. Microlenses with defined contour shapes[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18665-18670.
- [68] Kim J Y, Pfeiffer K, Voigt A, et al. Directly fabricated multi-scale microlens arrays on a hydrophobic flat surface by a simple ink-jet printing technique[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(7): 3053-3058.
- [69] Liu F, Zhang F, Bian H, et al. Development and preparation of refractive infrared microlens array device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071607.
刘丰, 张帆, 边浩, 等. 折射型红外微透镜阵列器件的发展及制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071607.
- [70] Liu X G, Huo F R, Xue C X. Parameter optimization and error compensation of diffraction microlens injection molding process[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052204.
刘兴国, 霍富荣, 薛常喜. 衍射微透镜注塑成型工艺参数优化及误差补偿[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052204.
- [71] Bianchi S, Rajamanickam V P, Ferrara L, et al. Focusing and imaging with increased numerical apertures through multimode fibers with micro-fabricated optics[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 4935-4938.
- [72] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Sub-micrometre accurate free-form optics by three-dimensional printing on single-mode fibres[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11763.
- [73] Liberale C, Cojoc G, Bragheri F, et al. Integrated microfluidic device for single-cell trapping and spectroscopy[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1258.
- [74] Dietrich P I, Harris R J, Blaicher M, et al. Printed freeform lens arrays on multi-core fibers for highly efficient coupling in astrophotonic systems[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18288-18295.
- [75] Dietrich P I, Blaicher M, Reuter I, et al. *In situ* 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 241-247.
- [76] Bremer L, Weber K, Fischbach S, et al. Quantum dot single-photon emission coupled into single-mode fibers with 3D printed micro-objectives[J]. *APL Photonics*, 2020, 5: 106101.
- [77] Schmidt S, Thiele S, Toulouse A, et al. Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping[J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1279-1286.
- [78] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 554-560.
- [79] Li J W, Thiele S, Quirk B C, et al. Ultrathin monolithic 3D printed optical coherence tomography endoscopy for preclinical and clinical use[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 124.
- [80] Wang B K, Zhang Q M, Gu M. Aspherical microlenses enabled by two-photon direct laser writing for fiber-optical microendoscopy[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(12): 3174-3184.