

# 飞秒激光制备微光学元件及其应用

曹小文<sup>1</sup>, 张雷<sup>1</sup>, 于永森<sup>2\*</sup>, 陈岐岱<sup>2</sup>

<sup>1</sup>吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025;

<sup>2</sup>吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012

**摘要** 近年来,微光学元件的制备与应用受到人们的广泛关注。微光学元件体积小、重量轻及制造成本低,并且易于与微机电系统相集成,能够实现普通光学元件难以实现的功能,在光纤通信、信息处理、航空航天、生物医学、激光技术、光计算等领域,突显出重要的应用价值。飞秒激光因其超短的脉冲宽度和超高的瞬时功率,能够实现超高精度的微纳加工,轻松突破衍射极限。飞秒激光加工技术对材料没有选择性,加工过程也非常灵活,可以进行任意复杂结构的加工,丰富了微光学元件的制备种类。飞秒激光还能在现有结构或系统上进行集成加工,极大扩展了微光学元件的应用。简要概述了微光学元件的优点及一些常用的制备方法,同时对飞秒激光加工技术进行了简单概括,对近年来飞秒激光制备各种微光学元件的实验和应用研究进行了综述,最后对微光学元件未来的研究方向进行了预测和展望。

**关键词** 激光制造; 微光学元件; 飞秒激光; 微纳加工; 集成光学

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0102004

## Application of Micro-Optical Components Fabricated with Femtosecond Laser

Cao Xiaowen<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Yu Yongsen<sup>2</sup>, Chen Qidai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract** Fabrication and application of micro-optical components are attracting broad attention in recent years. Micro-optical components have important applications in the fields of optical fiber communication, information, aerospace, biomedicine, laser technology, and optical computing, because they can achieve function that the ordinary optical components are hard to realize for their small size, light weight, low cost and ease to integrate with micro-electromechanical systems. Femtosecond laser can achieve micro/nano fabrication with ultra-high precision due to their ultrashort pulse width and ultrahigh pick power, which breaks the diffraction limit easily. Femtosecond laser can process almost any materials flexibly with arbitrary complex structures, which enriches the fabrication of micro-optical components. Further, the femtosecond laser processing can be carried out on the existing structure or system, which greatly expands the application of micro-optical components. A brief overview of the advantage and common fabrication methods of micro-optical components is given and the femtosecond laser processing technology briefly is summarized. Then, the experimental and applied research of micro-optical components fabricated with femtosecond laser are reviewed. Finally, some prospects and forecasts about the research of micro-optical components are given.

**Key words** laser manufacturing; micro-optical components; femtosecond laser; micro/nano fabrication; integrated optics

**OCIS codes** 230.3990; 140.7090; 230.4000

**收稿日期:** 2016-09-05; **收到修改稿日期:** 2016-10-12

**作者简介:** 曹小文(1990—),男,博士研究生,主要从事飞秒激光加工方面的研究。E-mail: xw2015@outlook.com

**导师简介:** 张雷(1970—),男,博士,博士生导师,主要从事智能精密制造方面的研究。E-mail: zhanglei@jlu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: yuys@jlu.edu.cn

# 1 引 言

随着现代工业与科学技术的发展,人们已经逐步进入到信息化时代。信息技术的快速发展要求一个完整的信息系统能在尽可能小的空间内实现尽可能多的功能,这就要求实现各种功能的器件尽可能地小,向小型化、微型化方向发展。微光学元件具有体积小、重量轻、设计制造灵活、制造成本低,并易于实现阵列化和批量化生产等优点,能够实现普通光学元件难以实现的功能,在光纤通信、信息处理、航空航天、生物医学、激光技术、光计算等领域具有重要的应用价值。

随着研究的不断深入,人们提出了很多微光学元件的制备方法,主要有半导体光刻工艺法<sup>[1]</sup>、单点金刚石车削<sup>[2]</sup>、电子束刻蚀<sup>[3-4]</sup>、飞秒激光直写<sup>[5]</sup>等。半导体光刻工艺需要用到掩模板,利用紫外光曝光,通过显影将微结构转移到光刻胶上。这种方法工艺成熟,适合大批量制作,平均成本低。缺点是加工的结构只能是平面的,加工多阶结构时需要多次套刻,对准精度要求高,成本急剧上升。单点金刚石车削加工的表面粗糙度小,一般表面粗糙度都在 10 nm 以下,适合加工任意回转形貌的结构。加工的精度取决于刀头和机床,对机床的精度要求高,加工材料有所限制,加工结构的尺寸不能太小。电子束刻蚀分为扫描式和投影式,扫描式不需要掩模板,对准、拼接均由计算机自动控制,加工精度极高。缺点是设备复杂、成本昂贵、单次曝光面积小、制作大尺寸结构时间太长。投影式加工速度快,但掩模制备困难。两种方式都需要在真空中进行,极大地限制了其适用范围。

飞秒激光加工是一种无接触、高精度的微纳光电器件加工方法,具有环境要求低、对材料无选择性、加工灵活、精度高等特点,可以在几乎任意材料上实现超衍射极限和高复杂结构加工,极大丰富了微光学元件的制备种类。围绕飞秒激光加工技术,研究者们在各种材料表面、内部制备出了不同类型、不同功能的微光学元件,极大地推动了微光学的发展。本文简要介绍了飞秒激光加工技术,对近年来飞秒激光制备各种微光学元件的实验和应用研究进行了概述,并对微光学元件未来的研究方向进行了预测和展望。

## 2 飞秒激光精密加工技术

### 2.1 飞秒激光的特点

飞秒激光是脉冲宽度为几飞秒到几百飞秒的脉冲激光,与连续激光和长脉冲激光相比,具有超短的脉冲宽度、超高的峰值功率,峰值功率可达  $10^9$  量级。通过物镜聚焦,轻松实现  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> 的功率密度。当能量如此高的飞秒激光与物质相互作用时,会产生各种非线性的光学效应,并且对材料加工没有选择性,包括聚合物、金属、半导体、石英、金刚石等几乎所有材料。飞秒激光脉冲宽度极短,对材料进行烧蚀加工时热影响区非常小,可以实现冷加工。飞秒激光在空间上呈高斯分布,可以通过调节激光的脉冲能量,使中心区域很小一部分达到多光子吸收或烧蚀阈值,实现超高精度的加工。

### 2.2 飞秒激光直写技术

飞秒激光直写技术的加工原理如图 1 所示,主要是通过一些光学元件将飞秒激光聚焦在材料表面或内部,配合三维位移平台,实现任意复杂结构的制备,CCD 实时观察系统主要用来进行焦点对准和对加工过程

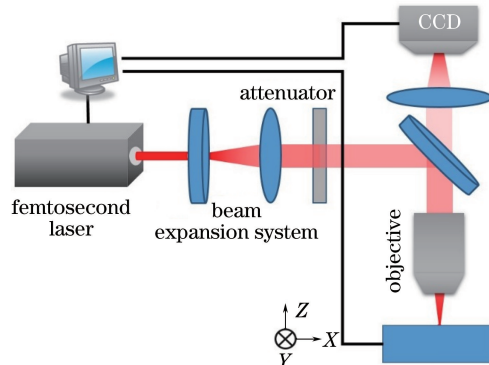


图 1 飞秒激光直写技术加工示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser direct writing

进行实时观察。

飞秒激光直写加工一般包括增加材料的双光子聚合加工和去除材料的烧蚀加工。在双光子加工中,单体聚合物只有在光子密度足够大的激光焦点才能同时吸收两个光子,实现聚合,如图 2 所示。2001 年, Kawata 等<sup>[6]</sup>利用中心波长为 800 nm 的飞秒激光制备了长为 10 μm、高为 7 μm 的纳米牛,首次从实验上实现了突破光学衍射的超精细加工,加工分辨率仅为 120 nm。

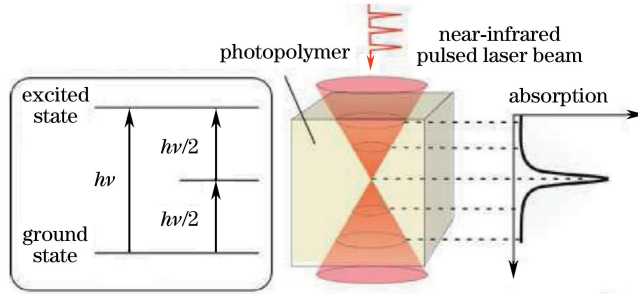


图 2 飞秒激光双光子聚合示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Schematic of femtosecond laser two-photon polymerization

双光子聚合加工中,曝光点的尺寸影响着飞秒激光双光聚合加工的分辨率,单点的尺寸越小,说明加工分辨率越高。它与激光单脉冲能量、激光的脉冲数和聚焦元件的数值孔径等有关,理论上来说,单点的尺寸可以无限小,实现无限高的加工分辨率。但在实际加工中,单个点的尺寸会受很多因素影响,如激光的形状。2002 年, Tanaka 等<sup>[8]</sup>系统地研究了单个点的尺寸随不同激光脉冲能量和脉冲个数的变化规律,最高分辨率达到了 120 nm。2007 年, Tan 等<sup>[9]</sup>通过优化激光的功率和加工速度,实现了直径约为 20 nm 悬空线的加工。2013 年, Gan 等<sup>[10]</sup>利用激发光和抑制光,其中激发光用于激发分子到激发态,抑制光能够抑制激发光的激发作用,使聚合区域变小,并结合新型的光刻胶,加工出了直径为 9 nm 的悬空纳米线,也是目前所报道的最高分辨率。

飞秒激光烧蚀加工与双光子聚合加工不同,它主要是通过去除材料表面或内部微纳米级的部分来实现微纳米结构的构型。飞秒激光烧蚀材料时,电子与声子进行耦合时激光作用就已经结束,因而几乎没有热影响区,能实现高精度、高质量加工,如图 3(a)所示<sup>[11]</sup>。

飞秒激光能量密度分布一般为高斯型,只有当激光能量超过材料的烧蚀阈值时,才能进行烧蚀加工,如图 3(b)所示,烧蚀区域的直径满足以下关系式

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln(F_0/F_{th}), \quad (1)$$

式中  $D$  为烧蚀孔的直径,  $\omega_0$  为焦点的束腰半径,  $F_0$  为归一化的能量密度,  $F_{th}$  为材料的烧蚀阈值。为了提高加工精度,可以适当控制激光的能量密度,使  $F_0$  略大于材料的烧蚀阈值  $F_{th}$ ,使得只有中心极小一部分区域超过材料的烧蚀阈值,实现超衍射极限的加工。2004 年, Joglekar 等<sup>[12]</sup>将飞秒激光聚焦在玻璃表面,加工出线宽约 30 nm 的纳米凹槽。

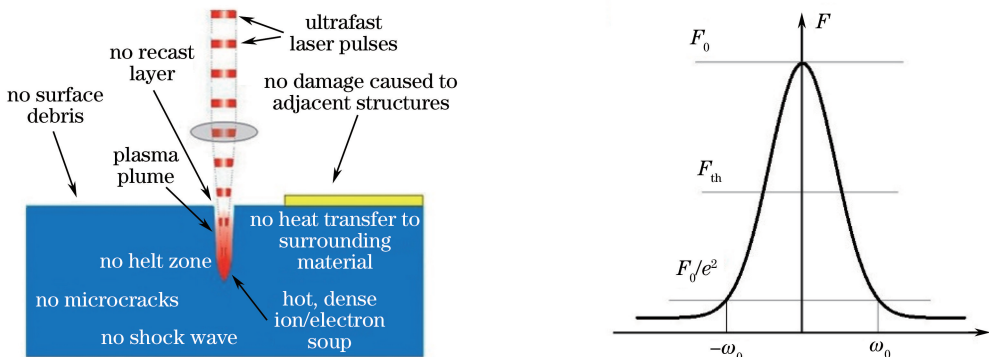


图 3 (a) 超短激光脉冲与材料相互作用; (b) 高斯光束的烧蚀阈值

Fig. 3 (a) Interaction of ultrashort laser pulse and material; (b) ablation threshold with Gaussian beam

由此可见,飞秒激光直写技术可以实现多种材料、多种方式的超精细加工,在微光学元件制备领域具有广泛的应用前景,可为微光学元件的制备提供强有力的支持。

### 3 微光学元件的飞秒激光制备

飞秒激光直写技术作为微光学元件的重要制备方法,具有广泛的应用前景。利用飞秒激光直写技术可以实现常规光学元件微小化,多种材料的飞秒激光直写,并且无需掩模板,具有真三维、设计自由度高、加工精度高等优点。近年来,研究者们已经利用该方法在多种材料上制备出各种类型和功能的微光学元件,主要包括折射型光学元件、衍射型光学元件、波导和光纤光栅、微腔元件等。

#### 3.1 折射元件

透镜是一种很重要的折射元件,也是使用范围最广的光学元件。透镜最基本的功能是用来成像,除此之外,还可用于光束准直、光束整形等方面。随着各种仪器设备向微小型化发展,透镜也由宏观走向微观。单个微透镜可以将光信号与光纤耦合,实现功能上的集成,同时也是各种微小设备必不可少的部件。在微透镜的加工方面,传统的加工方式已逐渐不适用。飞秒激光具有超高精度的加工能力,同时可以灵活地进行真三维加工,甚至可以在透明材料的内部直接加工,在微透镜的加工领域越来越常用。研究者们对各种材料、表面和内部进行了探索,实现了多种形式微透镜的加工。

2006年,Cheng等<sup>[13]</sup>利用飞秒激光三维加工技术,在光敏玻璃内部加工出微柱透镜和微半球透镜。利用低倍物镜将飞秒激光聚焦在光敏玻璃内部,通过移动样品加工出微柱透镜的轮廓,经过退火——氢氟酸(HF)溶液处理——长时间退火后得到表面光滑的微柱透镜。然后,改用更高倍的物镜加工出表面质量更好的微半球透镜。2010年,Qiao等<sup>[14]</sup>利用飞秒激光在熔融石英芯片内进行微加工,实现微透镜与微流控通道的集成。首先利用物镜将飞秒激光聚焦于石英表面,移动三维位移平台,并使用HF溶液腐蚀掉激光改性区域,实现微透镜和微流控通道的加工,最后利用氢氧焰对微透镜表面进行抛光。通过微透镜和微流控通道的集成,在通道内实现了5倍的放大成像,这一技术在芯片实验室装置的应用上具有巨大潜力。2011年,Qiao等<sup>[15]</sup>将这种微透镜用于生物组织的成像,发现其成像效果可以和同倍数的商用显微镜相媲美,显示出飞秒激光加工微透镜在生物成像和生物传感方面的应用前景。

2015年,Zheng等<sup>[16]</sup>利用飞秒激光的热累积烧蚀技术在PMMA内部加工出腔微球透镜,该腔微球透镜与显微物镜相结合组成反射伽利略微型望远镜,其视场与腔镜距顶面的高度和腔镜的直径有关,最高可达 $350^\circ$ 。可以发现,该腔微球透镜的有效焦距与直径呈线性增加的关系,并随影响区折射率增加而缓慢减小。该项技术与传统的表面加工相比要简单、快速,同时有效焦距和视场等光学参数都可以在很大范围里调控,将来可应用于集成光流控芯片、光机电系统、太阳能电池和微广角传感和成像等领域。

2016年,Antipov等<sup>[17]</sup>利用飞秒激光在单晶蓝宝石的两面各加工一个微凹透镜,实现了X光在二维方向上聚焦,将三个这样的微凹透镜组叠在一起,可以使聚焦的尺寸更小。由于蓝宝石具有优良的热学和光学性能,蓝宝石微透镜将成为聚焦X光的主要元件。

由此看出,利用飞秒激光,可以很容易地在材料表面、内部进行微光学元件的加工。利用飞秒激光加工灵活的优点,集成化加工变得非常简单。除了加工这种固定参数的微透镜之外,研究者们还通过新手段、新材料来实现可调节微透镜的加工。

2015年,Xu等<sup>[18]</sup>利用飞秒激光双光子聚合加工技术加工出具有高曲率的凹凸微透镜(CCML),如图4所示。该透镜不仅具有较高的设计自由度,而且能够显著地改善光学性能,在光束整形和集成光学系统中具有潜在的应用价值。除此之外,凹凸透镜的焦距能够随环境折射率的改变而改变,将来可以应用于微流控通道中,这种透镜的中空结构使其可应用于微反应室中。

2015年,Lu等<sup>[19]</sup>利用相同的加工技术实现了溶剂响应的聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜的加工。利用这种集成的柔性加工技术,将类似的微光学元件与微流控芯片相结合,实现光聚焦、原位观察和光学成像等新功能。通过不同的溶剂调控,可以使微透镜的焦距产生最高160%的改变。这种柔性加工技术和溶剂响应的微透镜集成在新型的微流控和光流控芯片中具有巨大的应用前景。

单个微透镜可实现的功能有限,若将微透镜组成阵列,则可以实现更多的功能,如提高太阳能效率<sup>[20]</sup>、



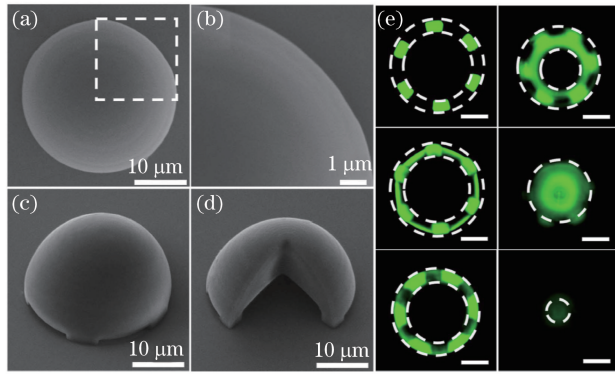


图 4 凹凸微透镜扫描电镜照片和激光共聚焦显微镜照片

Fig. 4 Scanning electron microscopy image and laser confocal microscopy image of concave-convex microlens

人工复眼<sup>[21]</sup>等。

2010年,Chen等<sup>[22]</sup>提供了一种在石英玻璃上快速制备大面积微凹透镜阵列的方法。首先利用高数值孔径的物镜将飞秒激光聚焦于石英表面,加工出直径为数微米的正方形或六边形阵列,随后将样品置于5%的HF溶液中超声腐蚀,数十分钟后形成正方形或六边形排列的微凹透镜阵列。可以发现单个微凹透镜的直径随着腐蚀的进行而增加,而微凹透镜的高度在一段时间之后保持不变。这种加工方式非常快速,能在3h之内,在3mm×3mm范围加工出直径为67.05μm的微凹透镜正方形阵列,或在1.5mm×1.5mm范围加工出直径为30.54μm的微凹透镜六边形阵列。

2012年,Qu等<sup>[23]</sup>结合飞秒激光和化学腐蚀,在石英表面加工出微凹透镜阵列,通过转写,在PDMS上得到微凸透镜阵列。将PDMS加热至120~140℃,用一个直径为5mm的石英小球挤压微透镜阵列,使其呈现三维排列。这种方式非常高效,利用石英作为模具,可以快速制备微透镜阵列。缺点是不够灵活,不适合集成化加工。

2013年,Bian等<sup>[24]</sup>结合飞秒激光烧蚀和化学腐蚀,在石英表面加工出微凹透镜阵列,透镜表面质量非常好,具有良好的光学性能。利用压印技术,将这种微凹透镜阵列转写在聚合物材料上,形成互补的微凸透镜阵列。通过改变激光的功率和脉冲数,可以方便地调节透镜的直径和深度。

2014年,Deng等<sup>[25]</sup>同样结合飞秒激光和化学腐蚀,在BK7玻璃的两面都加工出呈不规则排列、紧密堆积的微凹透镜阵列,实现光束的均匀化。这种加工方式非常高效,不到1h就可以在10mm×10mm的玻璃片两面加工出微结构。可以发现,当两个面的加工方向夹角为60°时,光束的均匀性最好。

2015年,Meng等<sup>[26]</sup>结合飞秒激光和化学腐蚀,在硅表面加工出填充因子为100%的微凹透镜阵列。首先用飞秒激光在硅表面加工出点阵,用腐蚀液(HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH=6:10:9)腐蚀3min,得到表面粗糙度只有56nm的微凹透镜阵列。由于硅的光学特性,这种技术将来可应用于红外光的微传感与微光学系统中。

结合飞秒激光和化学腐蚀,可以在材料表面快速制备出微凹透镜阵列。采用压印转写技术,快速实现微凸透镜阵列制备。这种技术缺点也非常明显,透镜的形貌不可控,一般都只能为球面。腐蚀液需要与材料严格匹配,往往具有非常强的毒性。飞秒激光直写一步成型微透镜阵列能够提供一种非常灵活的加工手段,实现真三维加工,在微透镜制备上应用更加广泛。

2013年,Hu等<sup>[27]</sup>利用空间光调制器(SLM)将飞秒激光调制成多个焦点,一次加工出具有高填充因子的微透镜阵列。多个焦点的并行加工,大大提高了加工效率,将原来需要超过10h的加工时间缩短至20min。

2015年,Tian等<sup>[28]</sup>利用飞秒激光加工出具有不同焦距的、呈六边形排列的微凸透镜阵列。由于微透镜具有不同的焦距,使得在不同位置的物体都能够清晰成像,如图5所示。这种微透镜阵列能够提升光学系统的性能,特别适用于弯曲面的成像。

2014年,Wu等<sup>[21]</sup>利用飞秒激光直接加工出人工复眼结构,如图6所示(标尺分别为40,10,10,5μm),实现无失真宽场成像。加工出的人工复眼具有100%的填充因子,表面粗糙度仅为2.5nm,光学不均匀度小

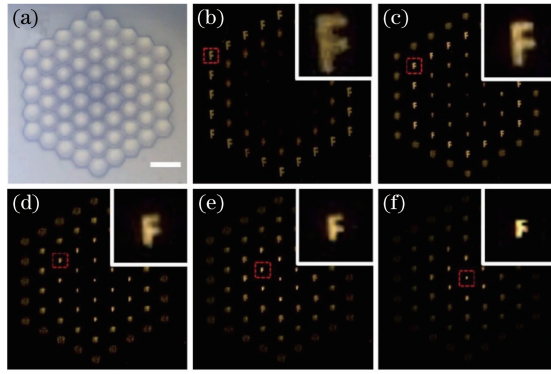


图 5 微透镜阵列在不同位置成像效果

Fig. 5 Imaging effect of microlens array at different positions

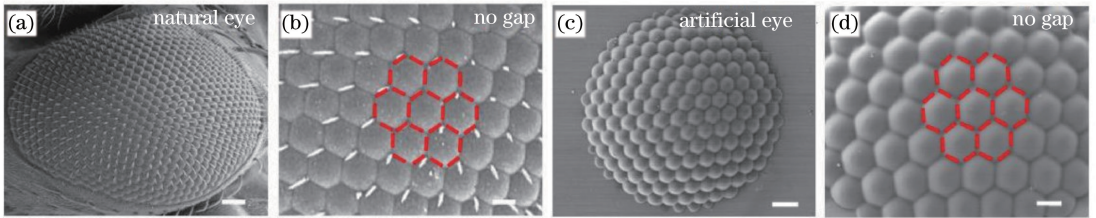


图 6 (a)(b) 自然界中的复眼；(c)(d) 人工复眼

Fig. 6 (a)(b) Natural compound eye; (c)(d) artificial compound eye

于±6%。随着微加工技术的提升,小尺寸、高性能的人工复眼能够和光电微接收器或光学器件集成,大大扩展其应用范围,例如广角通信的天线、集成光路等。

### 3.2 衍射元件

衍射元件中比较常见的是菲涅耳透镜和光栅。菲涅耳透镜是一种非常重要的平面光学元件,和普通透镜不同的是,它是通过衍射来实现光束聚焦和成像功能。传统的光刻工艺对于制作二阶甚至四阶的菲涅耳透镜已经非常成熟,由于加工过程需要掩模板、加工工艺复杂,只适用于大批量的生产。飞秒激光以其高加工精度和加工灵活性,在菲涅耳透镜集成加工方面具有重要应用。

2002年,Bricchi等<sup>[29]</sup>利用聚焦飞秒激光在石英衬底的内部一步加工出菲涅耳透镜,该透镜具有很强的双折射特性,在偏振探测、集成多物镜系统中具有潜在应用价值。

2009年,Kim等<sup>[30]</sup>利用飞秒激光在无纤芯石英光纤端面加工出菲涅耳透镜,能够实现非常好的聚焦效果。菲涅耳透镜的焦距可以通过理论计算精确控制,在端面分别出了焦距分别为580 μm和255 μm菲涅耳透镜。全光纤菲涅耳透镜在自由空间光互连中具有充足的潜力,能直接应用于光通信、生物光子学等领域。

2013年,Kim等<sup>[31]</sup>利用飞秒激光在硬聚合物复合光纤端面加工出菲涅耳透镜,实现多模激光在光纤内整形,这种特性在多模光纤器件和微光学整形中具有巨大的应用潜力。

2015年,Komlenok等<sup>[32]</sup>利用飞秒激光烧蚀,在硅表面加工出适用于太赫兹波段的四阶菲涅耳透镜。经测试,在141 μm激光下的衍射效率为35.9%。实现了飞秒激光加工有效的多阶太赫兹衍射光学元件的目标。

2016年,Li等<sup>[33]</sup>结合飞秒激光烧蚀和化学腐蚀的方法,在蓝宝石表面加工出表面质量非常好的菲涅耳透镜,表面粗糙度仅为12 nm。由于具有高硬度、良好的热学和化学稳定性及高的紫外透射率,蓝宝石菲涅耳透镜在紫外微光学领域具有重要的应用前景。

飞秒激光除了能在常规的聚合物和无机材料表面制备单个菲涅耳透镜之外,也可以和微透镜阵列一样,实现菲涅耳透镜阵列的制备。还能够在特殊材料上,如蛋白质,制备菲涅耳透镜,扩展微光学元件在生物领域的应用。

2011年,Niu等<sup>[34]</sup>利用飞秒激光双光子聚合加工,用SU-8加工出高填充因子的菲涅耳透镜阵列。通过

优化设计和加工参数,六边形排列的非涅耳透镜阵列实现了 100% 的填充因子,如图 7 所示。加工出的高阶非涅耳透镜阵列实现了 75% 的衍射效率,接近理论的最大值。展示了利用飞秒激光集成加工高阶、高填充因子的加工技术,该技术具有良好的柔性和加工准确性。高填充因子的非涅耳透镜阵列在光通信、光互连和集成光路具有广泛应用。

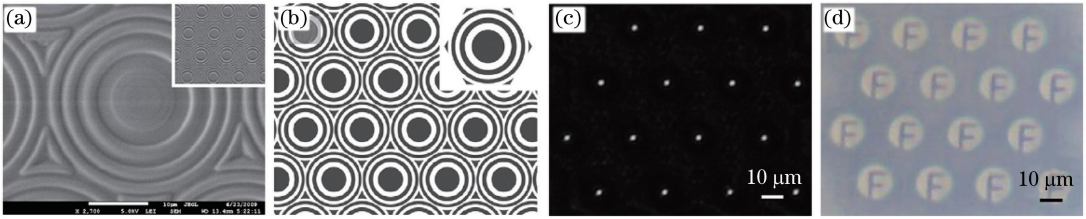


图 7 六边形排列的非涅耳透镜阵列  
Fig. 7 Fresnel lens array with hexagonal

2014 年, Sun 等<sup>[35]</sup>利用飞秒激光聚合加工,用牛血清蛋白在柔性的 PDMS 上加工出非涅耳透镜。加工出的透镜具有非常好的表面质量和三维形貌,具有优良的光学性能;基底和透镜都具有柔性,使其可应用于柔性的微系统中;透镜所用的为牛血清蛋白,具有良好的生物相容性和生物可降解性。这种柔性的蛋白质微光学元件在柔性、可拉伸光子器件和柔性集成光学系统中具有重要的应用前景。

光栅作为一种重要的衍射光学元件,主要可用来进行分束和光谱的分离。精心设计的光栅非常复杂,往往需要较高的加工精度,适合利用飞秒激光进行加工。

2008 年, Chen 等<sup>[36]</sup>利用飞秒激光双光子聚合加工,用 SU-8 负性光刻胶加工出分束分别为  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ ,  $5 \times 5$ ,  $6 \times 6$  的二阶达曼光栅,如图 8 所示,效率分别达到了 36%, 25%, 29%, 52%, 49%。结合合适的傅里叶透镜,加工出来的达曼光栅可应用于集成化系统中。

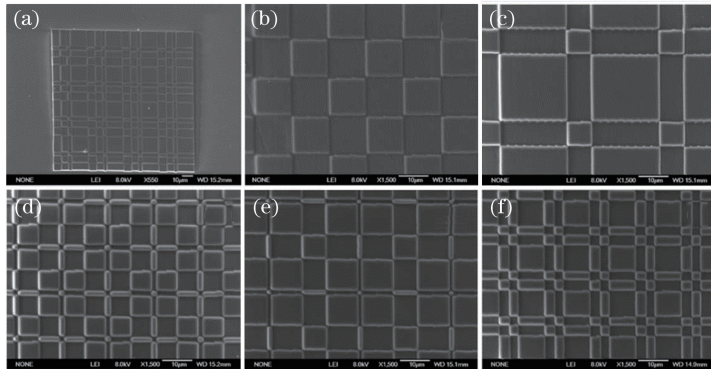


图 8 达曼光栅电镜照片。(a) 原图; (b)  $2 \times 2$ ; (c)  $3 \times 3$ ; (d)  $4 \times 4$ ; (e)  $5 \times 5$ ; (f)  $6 \times 6$   
Fig. 8 Electron microscopy images of Damman gratings. (a) Original image;  
(b)  $2 \times 2$ ; (c)  $3 \times 3$ ; (d)  $4 \times 4$ ; (e)  $5 \times 5$ ; (f)  $6 \times 6$

2010 年, Zhou 等<sup>[37]</sup>利用飞秒激光在石英内部加工出自组装的体光栅,一级衍射效率与激光的脉冲能量和加工速度有关,最高可达 30%。

2014 年, Yu 等<sup>[38]</sup>利用飞秒激光干涉技术,在菌视紫质(BR)薄膜上加工出一维和二维的光栅结构。由于这种材料具有永久的光致双折射和二向色性,所加工出的光栅的衍射效率与入射光的偏振有关,可应用于光通信、光存储等领域。

2016 年, Xiao 等<sup>[39]</sup>利用飞秒激光聚合加工,用 IP-Dip 光刻胶在载玻片表面加工出复杂的二光栅结构,实现太阳光谱中的可见和近红外光的分离。提高飞秒激光的加工精度,能够极大地提升元件的性能,同时能在相同的面积上集成更多的太阳能子电池。

### 3.3 波导和光纤光栅

光波导在光学系统中起着传导光信号的作用,在微光学系统中应用十分广泛。光学信号可以被光波导限制住,并沿特定的路线进行传播。飞秒激光加工灵活,可以加工出任意形状的光波导,特别适合于透明材



料内部、现有器件上集成加工等。

早在1996年,Davis等<sup>[40]</sup>就利用飞秒激光在多种透明材料中加工光波导,包括石英、硼酸盐玻璃、钠钙硅酸盐玻璃和氟化物玻璃。在石英玻璃中,激光照射过部分的折射率增加了0.01~0.035。此后,越来越多的研究人员开始对飞秒激光制备光波导进行研究。

2011年,Fletcher等<sup>[41]</sup>利用飞秒激光,在磷酸锌玻璃内部加工出光波导。通过实验发现,当玻璃中氧磷的原子个数比为3.25(60ZnO-40P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass)时,才能加工出非常连续的光波导,波导处的折射率增加了 $5 \times 10^{-4}$ 。而其他比例的玻璃则会在飞秒激光的作用下产生孔洞缺陷,不适合制作光波导器件。这项工作为光波导的应用找到了一种非常具有吸引力的材料。

2012年,Okhrimchuk等<sup>[42]</sup>利用飞秒激光在YAG:Nd的晶体内部加工出凹陷包层光波导,这种光波导具有非常低的传输损耗,仅仅为0.12 dB/cm。

由于飞秒激光加工非常灵活,除了直写单一的光波导外,更大的优势在于在三维空间加工特殊形状的光波导,实现信号分束等功能。

2010年,Sakakura等<sup>[43]</sup>利用飞秒激光结合空间光调制器在石英内部一次直写出 $1 \times 4$ 的光波导。利用空间光调制器将飞秒激光调制成空间分布的4个焦点,通过不断变换空间4个焦点的位置及一维移动,一次直写出分束波导。这种加工方式降低了对位置精度的高要求及大大缩减了加工时间。

2014年,He等<sup>[44]</sup>利用飞秒激光直写技术,在Bi<sub>12</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>(BGO)晶体内部加工出三维光波导,波导处折射率增加 $5 \times 10^{-3}$ 。这种光波导可以允许4 μm的TE和TM基模光通过,其传输损耗和分束损耗分别为4 dB/cm和0.3 dB,分出来的光束基本均等。通过这种手段,能在BGO晶体内部加工出复杂器件,并应用于中红外光中。

传统的光波导通常在光刻胶或硬质上加工,限制了其在某些领域的应用,如生物领域。蛋白质(及衍生物)是基于生物聚合物形成的,具有良好的生物/环境相容性,基于蛋白质的光波导在生物领域具有重要应用。2016年,Sun等<sup>[45]</sup>利用飞秒激光聚合牛血清蛋白加工出基于蛋白质的多模干涉耦合的光学微分束器(P-MMIs)。牛血清蛋白中加有亚甲基蓝光敏剂,在飞秒激光作用下实现双光子聚合。器件的表面形貌及尺寸精度都非常好,对633 nm光的传输损耗为0.0592 dB/μm。P-MMIs在环境友好型生物聚合物光学、多路高输出光学生物传感、光流控生物芯片中具有巨大的应用前景。

光纤光栅是指光纤表面或内部有光栅的光纤,能实现特定的功能,如温度传感等。早期,人们利用激光干涉的方法在光纤上加工光栅,这种方式加工出的光栅周期固定、无法精准加工。飞秒激光的内部加工特性,使其非常适于光纤光栅的加工,在光纤的表面或内部都可加工,定位准确,周期可调。

2011年,Li等<sup>[46]</sup>利用飞秒激光逐点加工的方式在石英光纤的内部加工出长周期光栅,在1465~1575 nm波段最高实现了20 dB的衰减。这种光纤光栅可用于高温传感,灵敏度达到0.091 nm/°C,并在600 °C的情况下具有良好的稳定性。通过热处理后,这种长周期的光纤光栅变得更加稳定。

2013年,Chen等<sup>[47]</sup>利用飞秒激光结合相位掩模板在非光敏光纤中加工出倾斜的布拉格光栅,在光纤的一端镀上一层金反射镜,在1.4091~1.4230的折射率范围内的最大灵敏度达到了12.276 nm/单位,并且可以在温度高达800 °C的情况下工作。飞秒激光直写倾斜布拉格光纤光栅在物理和化学传感领域,特别是在高温等恶劣环境中具有巨大应用潜力。

2015年,Cui等<sup>[48]</sup>利用飞秒激光在锥形光纤中加工出布拉格光栅,实现弯曲传感,在光纤头部尺寸为57 μm时,其灵敏度达到了0.1196 dB/m<sup>-1</sup>。通过测试,这种布拉格光纤光栅对温度变化不敏感。和传统的混合弯曲光纤光栅相比,这种光纤传感器具有易加工、结构简单和体积小等优点,适用于小曲率变化的测量及集成化系统中。

2016年,Duan等<sup>[49]</sup>利用飞秒激光在扭曲光纤中加工出长周期的光纤光栅,实现扭曲的传感。在扭曲度为-105~0 rad/m的范围内,其灵敏度达到了117.4 pm/(rad/m),线性度为0.9995,分辨率达到0.511 rad/m。

飞秒激光制备的光纤光栅能够对多种物理参数进行探测,如温度、折射率、弯矩和扭矩等。光纤本身物理、化学性质稳定,在一些恶劣环境中的应用更加突出。



### 3.4 微腔元件

微腔主要是指尺寸在几微米到几十微米的微型圆盘,它能够使大量光限制在一个很小的空间里,使光与物质相互作用在其中得到极大增强,在非线性光学、光信号处理、传感等领域具有重要应用价值,是现代光学中不可替代的角色。

2012年, Lin 等<sup>[50]</sup>结合飞秒激光直写技术、化学腐蚀和二氧化碳激光退火,在石英表面加工出高 Q 值的三维回音壁模式微腔,其品质因子高达  $1.07 \times 10^6$ 。由于所加工出的微腔为无源器件,可以在其表面覆盖一些增益介质来实现更高的光学输出。在非平面内加工出高 Q 值的微腔,在基础研究和生物、化学传感应用方面具有重要应用。2013年, Lin 等<sup>[51]</sup>采用同样的方法在掺 Nd 玻璃的表面加工出同样高 Q 值的回音壁模式微激光器,在低至 69 W 的 780 nm 连续激光抽运下就可以获得激光输出。

2015年, Ku 等<sup>[52]</sup>利用飞秒激光双光子聚合加工,在 SU-8 中加工出边缘耦合的回音壁模式光子分子微盘,实现了单模激光的输出。分别加工出两个不同尺寸的微盘,每个微盘都对应一系列成等差排列的激光输出,利用游标原理,实现单波长激光的输出,如图 9 所示,标尺为  $10 \mu\text{m}$ 。通过改变微盘的尺寸,输出激光的波长可以在很大范围内调节。这项工作作为三维光电子的集成开辟了一条新道路。

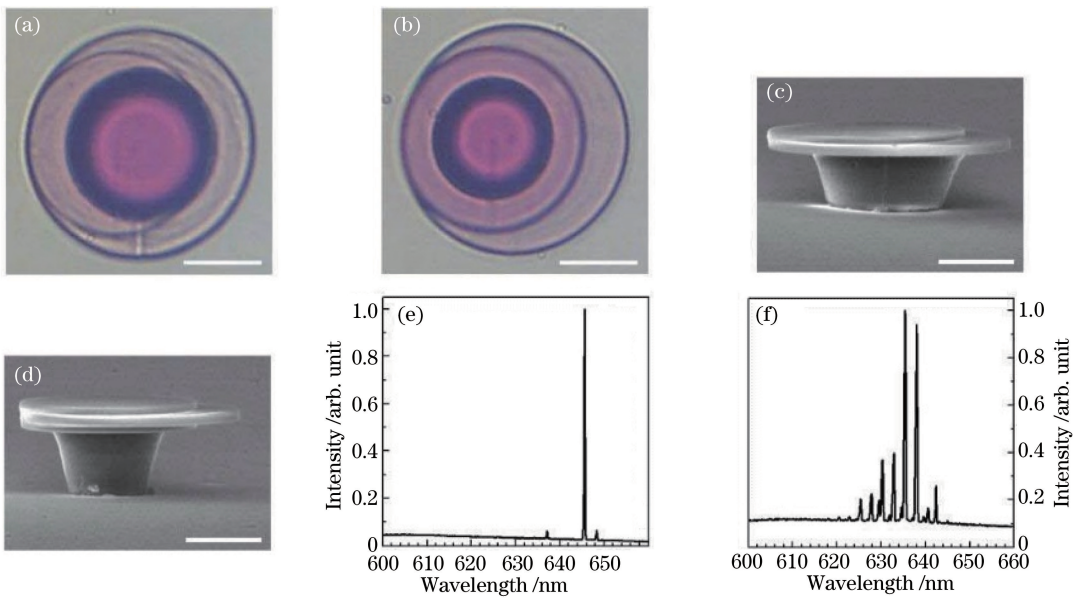


图 9 (a)(c)(e) 二个微盘重叠及其输出光谱; (b)(d)(f) 三个微盘重叠及其输出光谱

Fig. 9 (a)(c)(e) Two microdisks coupled and its spectrum; (b)(d)(f) three microdisks coupled and its spectrum

2016年, Huang 等<sup>[53]</sup>利用飞秒激光直写技术,加工出两盘相切的微腔,并系统研究了输出光与两盘边缘距离之间的关系,当边缘距离为  $-2 \mu\text{m}$  时,实现了单波长激光的输出。

飞秒激光加工精度高,能够直接加工出高品质因子的微盘激光器。因其具有非常高的加工灵活性,非常容易实现微腔与微控或微腔与其他光电器件的集成,在集成光子光电器件中具有重要应用。

## 4 微光学元件的应用

微光学元件因其尺寸微小、结构高度可设计,易于形成阵列、易于与其他系统相集成,能够实现普通宏观光学元件无法实现的功能。如微透镜阵列可实现多焦点并行加工、微透镜与微流控通道集成等。

2011年, Salter 等<sup>[54]</sup>利用飞秒激光结构空间光调制器与微透镜阵列,实现高效的并行加工。并且,空间光调制器可以控制单个激光焦点的开关,实现非周期结构的高效加工。

2013年, Li 等<sup>[55]</sup>利用飞秒激光在垂直腔面发射激光器(VCSEL)表面直接集成加工出双曲面的非球面透镜,通过集成这种精心设计的双曲面透镜,将 VCSEL 的发散角由  $18.16^\circ$  降低到  $0.83^\circ$ ,在远场实现激光器整形,如图 10 所示。这种一次加工成型的技术在聚合物微光学、激光整形和光学系统的小型化、集成化方面具有巨大的潜力。

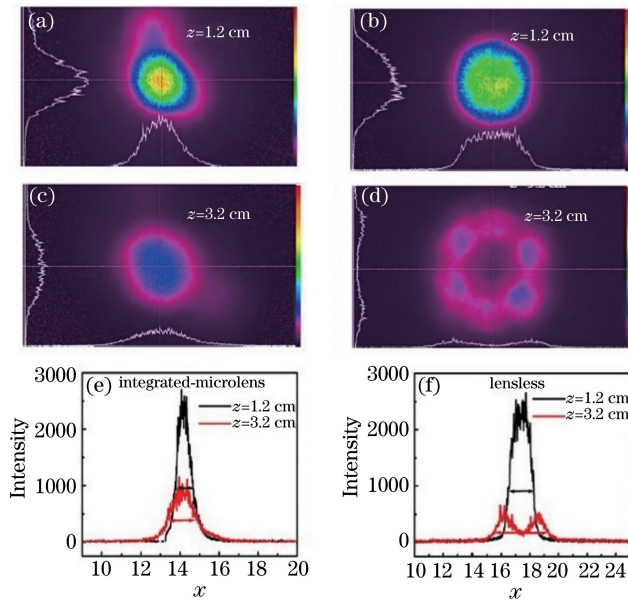


图 10 整形前后的光束质量

Fig. 10 Beam quality after and before shaping

2016 年, Lü 等<sup>[56]</sup>利用飞秒激光双光子聚合加工,在微流控通道中加工一个微透镜,实现微流与光流的集成。利用紫光外曝光技术在盖玻片两侧加工出微流控通道,如图 11(a)、(b)所示。随后利用飞秒激光在其中一个通道内加工一个微透镜,形成光流控通道。当另一个微流控通道内有微米颗粒(如细胞)通过时,可以通过这个集成系统进行实时观察,如图 11(c)、(d)所示。

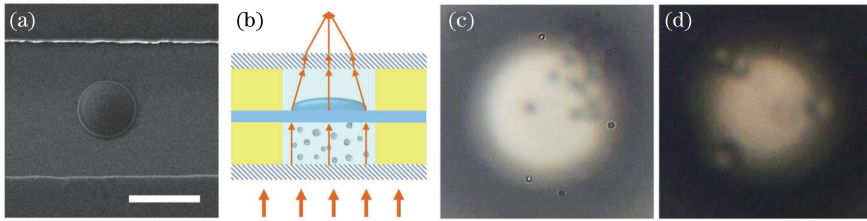


图 11 聚合物小球和细胞在微通道中的图像

Fig. 11 Images of polymer spheres and cells in microchannel

2016 年, Choi 等<sup>[57]</sup>利用飞秒激光直写技术,在硼硅酸内部直接加工出菲涅耳透镜和光波导,实现光学系统的集成,单对菲涅耳透镜-光波导的效率达到了 9%。

除了具有传统的光传导作用之外,光波导在量子光学和波导激光中具有重要应用。飞秒激光具有较高的峰值功率,能够引起较强的非线性效应,适于在透明材料内部进行加工。

在量子光学中,光波导的作用是束缚光子,使之在特定的位置发生耦合,实现特定的量子输出。2011 年, Crespi 等<sup>[58]</sup>利用飞秒激光在硼硅酸盐玻璃内部加工出具有三个定向耦合器(DC)的光波导,实现基于偏振编码的集成光子控制非门。定向耦合器对偏振的敏感与否可以通过其几何参数来选择,而与光波导的物理参数无关,使得复杂量子器件的设计变得简单而灵活。

2014 年, Corrielli 等<sup>[59]</sup>通过改变入射光与物镜轴线的距离,从而调节焦点处光斑形状,在硼硅酸盐内加工出光波导线圈。通过设计,在光的传输过程中任意调节其偏振态,包括经典的和量子态光场,这种对偏振编码信息的集成化处理方式在很多方面具有重要应用,从集成偏振检测到量子密钥分发。

波导激光器是将激光器的工作介质做成波导,限制高阶模,从而实现高质量激光输出。在微光学元件中,常见的波导激光器为平面固体波导激光器。飞秒激光以其灵活、能进行集成加工的优点,在波导激光器的制备上越来越受关注。

2007 年, Della 等<sup>[60]</sup>利用飞秒激光直写技术,在钕镱磷酸盐玻璃加工出 20 mm 的波导激光器,实现

1.5  $\mu\text{m}$ 单纵模激光输出。该激光器最大输出功率为 50 mW,最大转换效率达到 21%。

2009年,Ams等<sup>[61]</sup>利用同样的手段在钼铟铯磷酸盐玻璃加工出波导激光器,输出波长为 1033 nm,功率为 102 mW,转换效率为 17.3%。该激光器在连续工作 50 h后,输出仍保持稳定,证明加工出来的激光器能够长时间稳定工作。

## 5 结束语

微光学元件能够实现很多传统光学元件不能实现的功能,在现代光学领域具有重要应用价值。随着科学技术的发展,人们对微光学元件的要求越来越高。飞秒激光作为一种高精度的加工手段,在微光学元件的制作中显得越来越重要。综述了近年来人们在飞秒激光加工微光学元件方面的研究进展,展示出飞秒激光加工的强大魅力。除此之外,飞秒激光在微光学元件的加工中还存在一些不足。

1) 飞秒激光的加工精度还不够高。经过透镜或物镜聚焦的飞秒激光,其光斑形貌在空间上往往呈椭球状,纵向分辨率要小于横向分辨率。在烧蚀加工中,由于微爆炸等现象存在,表面加工质量比较差,一般需要通过退火<sup>[62]</sup>或化学腐蚀<sup>[33]</sup>来提高表面光学质量。

2) 飞秒激光直写加工效率比较低。一般来说,飞秒激光直写加工是通过逐点串行进行的,加工一个较大尺寸的微光学需要非常长的时间。飞秒激光本身非常昂贵,低效率的加工方式非常不利于批量生产和工业应用。一般提高飞秒激光加工效率有优化扫描方式<sup>[63]</sup>、多焦点并行加工<sup>[64]</sup>、全息干涉<sup>[65]</sup>等。

总的来说,飞秒激光加工具有工艺简单、加工精度高、材料无选择、能够进行集成化加工等优点,在微光学元件的制备中扮演越来越重要的角色。通过优化加工工艺,还可以实现相对高效地加工,为微光学元件的应用发展提供支持。随着技术不断地发展,飞秒激光加工的缺点将会被克服,成为真正高效、高精度的加工手段,为加工高质量的微光学元件打下坚实基础。

## 参 考 文 献

- [1] Revzin A, Russell R J, Yadavalli V K, *et al.* Fabrication of poly (ethylene glycol) hydrogel microstructures using photolithography[J]. *Langmuir*, 2001, 17(18): 5440-5447.
- [2] Cox J A. Application of diffractive optics to infrared imagers[C]. *SPIE*, 1995, 2550: 304-312.
- [3] Pease R F W. Electron beam lithography[J]. *Contemporary Physics*, 1981, 22(3): 265-290.
- [4] Vieu C, Carcenac F, Pepin A, *et al.* Electron beam lithography: resolution limits and applications[J]. *Appl Surf Sci*, 2000, 164(1): 111-117.
- [5] Lin X F, Chen Q D, Niu L G, *et al.* Mask-free production of integratable monolithic micro logarithmic axicon lenses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(8): 1256-1260.
- [6] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, *et al.* Finer features for functional microdevices[J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 697-698.
- [7] Maruo S, Fourkas J T. Recent progress in multiphoton microfabrication[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1-2): 100-111.
- [8] Tanaka T, Sun H B, Kawata S. Rapid sub-diffraction-limit laser micro/nanoprocessing in a threshold material system [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(2): 312-314.
- [9] Tan D, Li Y, Qi F, *et al.* Reduction in feature size of two-photon polymerization using SCR500[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(7): 071106.
- [10] Gan Z, Cao Y, Evans R A, *et al.* Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2061.
- [11] Clark-MXR, Inc. Matching with ultrafast laser pulse[EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.cmxr.com/Education/Short.html>.
- [12] Joglekar A P, Liu H H, Meyhöfer E, *et al.* Optics at critical intensity: applications to nanomorphing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(16): 5856-5861.
- [13] Cheng Y, Tsai H L, Sugioka K, *et al.* Fabrication of 3D microoptical lenses in photosensitive glass using femtosecond laser micromachining[J]. *Appl Phys A*, 2006, 85(1): 11-14.
- [14] Qiao L, He F, Wang C, *et al.* A microfluidic chip integrated with a microoptical lens fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Appl Phys A*, 2010, 102(1): 179-183.

- [15] Qiao L, He F, Wang C, *et al.* Fabrication of a micro-optical lens using femtosecond laser 3D micromachining for two-photon imaging of bio-tissues[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(12): 2988-2991.
- [16] Zheng C, Hu A M, Kihm K D, *et al.* Femtosecond laser fabrication of cavity microball lens (CMBL) inside a pmma substrate for super-wide angle imaging[J]. *Small*, 2015, 11(25): 3007-3016.
- [17] Antipov S, Baryshev S V, Butler J E, *et al.* Single-crystal diamond refractive lens for focusing X-Rays in two dimensions[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(1): 163-168.
- [18] Xu J J, Yao W G, Tian Z N, *et al.* High curvature concave-convex microlens[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2015, 27(23): 2465-2468.
- [19] Lu D X, Zhang Y L, Han D D, *et al.* Solvent-tunable pdms microlens fabricated by femtosecond laser direct writing [J]. *J Mater Chem C*, 2015, 3(8): 1751-1756.
- [20] Karp J H, Tremblay E J, Ford J E. Planar micro-optic solar concentrator[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1122-1133.
- [21] Wu D, Wang J N, Niu L G, *et al.* Bioinspired fabrication of high-quality 3d artificial compound eyes by voxel-modulation femtosecond laser writing for distortion-free wide-field-of-view imaging [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(8): 751-758.
- [22] Chen F, Liu H, Yang Q, *et al.* Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method[J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20334-20343.
- [23] Qu P, Chen F, Liu H, *et al.* A simple route to fabricate artificial compound eye structures[J]. *Opt Express*, 2012, 20(5): 5775-5782.
- [24] Bian H, Yang Q, Chen F, *et al.* Scalable shape-controlled fabrication of curved microstructures using a femtosecond laser wet-etching process[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, 33(5): 2795-2799.
- [25] Deng Z, Yang Q, Chen F, *et al.* High-performance laser beam homogenizer based on double-sided concave microlens [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2014, 26(20): 2086-2089.
- [26] Meng X, Chen F, Yang Q, *et al.* Simple fabrication of closed-packed ir microlens arrays on silicon by femtosecond laser wet etching[J]. *Appl Phys A*, 2015, 121(1): 157-162.
- [27] Hu Y, Chen Y, Ma J, *et al.* High-efficiency fabrication of aspheric microlens arrays by holographic femtosecond laser-induced photopolymerization[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103(14): 141112.
- [28] Tian Z N, Yao W G, Xu J J, *et al.* Focal varying microlens array[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(18): 4222-4225.
- [29] Bricchi E, Mills J D, Kazansky P G, *et al.* Birefringent Fresnel zone plates in silica fabricated by femtosecond laser machining[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(24): 2200-2202.
- [30] Kim J K, Kim J Oh K, *et al.* Fabrication of micro fresnel zone plate lens on a mode-expanded hybrid optical fiber using a femtosecond laser ablation system[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2009, 21(1): 21-23.
- [31] Kim J, Ha W, Park J, *et al.* Micro Fresnel zone plate lens inscribed on a hard polymer clad fiber using femtosecond pulsed Laser[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2013, 25(8): 761-763.
- [32] Komlenok M S, Volodkin B O, Knyazev B A, *et al.* Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation[J]. *Quantum Electron*, 2015, 45(10): 933-936.
- [33] Li Q K, Yu Y H, Wang L, *et al.* Sapphire-based fresnel zone plate fabricated by femtosecond laser direct writing and wet etching[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2016, 28(12): 1290-1293.
- [34] Niu L G, Wang D, Jiang T, *et al.* High fill-factor multilevel fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(3): 777-781.
- [35] Sun Y L, Dong W F, Niu L G, *et al.* Protein-based soft micro-optics fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): e129.
- [36] Chen Q D, Lin X F, Niu L G, *et al.* Dammann gratings as integratable micro-optical elements created by laser micronanofabrication via two-photon photopolymerization[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(21): 2559-2561.
- [37] Zhou K, Guo Z, Ding W, *et al.* Analysis on volume grating induced by femtosecond laser pulses[J]. *Opt Express*, 2010, 18(13): 13640-13646.
- [38] Yu X, Yao B, Lei M, *et al.* Polarization-sensitive diffractive optical elements fabricated in br films with femtosecond laser[J]. *Appl Phys B*, 2014, 115(3): 365-369.
- [39] Xiao T P, Cifci O S, Bhargava S, *et al.* Diffractive spectral-splitting optical element designed by adjoint-based electromagnetic optimization and fabricated by femtosecond 3d direct laser writing [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(5): 886-894.
- [40] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, *et al.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(21): 1729-1731.



- [41] Fletcher L B, Witcher J J, Troy N, *et al.* Direct femtosecond laser waveguide writing inside zinc phosphate glass[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 7929-7936.
- [42] Okhrimchuk A, Mezentsev V, Shestakov A, *et al.* Low loss depressed cladding waveguide inscribed in YAG:Nd single crystal by femtosecond laser pulses[J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 3832-3843.
- [43] Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, *et al.* Fabrication of three-dimensional 1×4 splitter waveguides inside a glass substrate with spatially phase modulated laser beam[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12136-12143.
- [44] He R, Hernández-Palmero I, Romero C, *et al.* Three-dimensional dielectric crystalline waveguide beam splitters in mid-infrared band by direct femtosecond laser writing[J]. *Opt Express*, 2014, 22(25): 31293-31298.
- [45] Sun Y L, Sun S M, Zheng B Y, *et al.* Protein-based multi-mode interference optical micro-splitters [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2016, 28(6): 629-632.
- [46] Li B, Jiang L, Wang S, *et al.* Femtosecond laser fabrication of long period fiber gratings and applications in refractive index sensing[J]. *Opt Laser Technol*, 2011, 43(8): 1420-1423.
- [47] Chen C, Yu Y S, Yang R, *et al.* Reflective optical fiber sensors based on tilted fiber bragg gratings fabricated with femtosecond laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(3): 455-460.
- [48] Cui W, Si J, Chen T, *et al.* Compact bending sensor based on a fiber bragg grating in an abrupt biconical taper[J]. *Opt Express*, 2015, 23(9): 11031-11036.
- [49] Duan J, Xie Z, Wang C, *et al.* Torsion sensing characteristics of long period fiber gratings fabricated by femtosecond laser in optical fiber[J]. *Opt Laser Technol*, 2016, 83: 94-98.
- [50] Lin J, Yu S, Ma Y, *et al.* On-chip three-dimensional high-Q microcavities fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Opt Express*, 2012, 20(9): 10212-10217.
- [51] Lin J, Xu Y, Song J, *et al.* Low-threshold whispering-gallery-mode microlasers fabricated in a Nd:glass substrate by three-dimensional femtosecond laser micromachining[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(9): 1458-1460.
- [52] Ku J F, Chen Q D, Ma X W, *et al.* Photonic-molecule single-mode laser[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2015, 27(11): 1157-1160.
- [53] Huang Q, Zhan X, Hou Z, *et al.* Polymer photonic-molecule microlaser fabricated by femtosecond laser direct writing [J]. *Opt Commun*, 2016, 362: 73-76.
- [54] Salter P S, Booth M J. Addressable microlens array for parallel laser microfabrication[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(12): 2302-2304.
- [55] Li Q S, W L J, Tian Z N, *et al.* Direct integration of aspherical microlens on vertical-cavity surface emitting laser emitting surface for beam shaping[J]. *Opt Commun*, 2013, 300: 269-273.
- [56] Lü Chao, Xia H, Guan W, *et al.* Integrated optofluidic-microfluidic twin channels: toward diverse application of lab-on-a-chip systems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19801.
- [57] Choi J, Ramme M, Richardson M. Directly laser-written integrated photonics devices including diffractive optical elements[J]. *Opt Lasers Eng*, 2016, 83: 66-70.
- [58] Crespi A, Ramponi R, Osellame R, *et al.* Integrated photonic quantum gates for polarization qubits [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 566.
- [59] Corrielli G, Crespi A, Geremia R, *et al.* Rotated waveplates in integrated waveguide optics [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4249.
- [60] Della Valle G, Taccheo S, Osellame R, *et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  single longitudinal mode waveguide laser fabricated by femtosecond laser writing[J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3190-3194.
- [61] Ams M, Dekker P, Marshall G D, *et al.* Monolithic 100 mW Yb waveguide laser fabricated using the femtosecond-laser direct-write technique[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 247-249.
- [62] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K, *et al.* Three-dimensional micro-optical components embedded in photosensitive glass by a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1144-1146.
- [63] Wu D, Chen Q D, Niu L G, *et al.* Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices[J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(16): 2391-2394.
- [64] Kato J, Takeyasu N, Adachi Y, *et al.* Multiple-spot parallel processing for laser micronanofabrication[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(4): 044102.
- [65] Juodkazis S, Mizeikis V, Misawa H. Three-dimensional microfabrication of materials by femtosecond lasers for photonics applications[J]. *J Appl Phys*, 2009, 106(5): 051101.