



Article

摘要: 微管道是微纳领域最基本的模型之一,其结构简单、均匀,应用广泛。本文提出一种利用飞秒贝塞尔光进行激 光直写,结合磁控溅射金属镀层,加工可磁驱动微管道的新方法。利用空间光调制器将飞秒激光调制成飞秒贝塞尔光, 通过高数值孔径的物镜聚焦,配合精密三维压电平台的移动,实现了微管道的拉伸加工;通过后续磁控溅射镍处理后, 微管道具有超顺磁特性,利用外部磁场可以有效实现驱动。本文详细研究了利用空间光调制器产生的飞秒贝塞尔光的 传播和聚焦特性,提出的微管道加工新方法可实现微管道直径、长度、排布的灵活控制,加工效率高;经磁控溅射镍 处理的微管道可以利用外部磁场实现在液体环境下沿特定路径的可控驱动,运动灵敏度高,环境适应性强。这种新的 微管道加工方法具有灵活、可控、高效的优点,所加工的可驱动微管道在无创手术、靶向药物运输、生物成像与传感、 微环境净化等领域具有广阔的应用前景。 关键词: 微管道; 空间光调制; 贝塞尔光; 磁驱动

中图分类号: TN249; TN761

文献标志码: A

# Microtube fabrication based on femtosecond Bessel beam and its flexible driving with external magnetic field

Chen Xin, Liang Yang\*, Zhijiang Hu, Kai Hu, Dongdong Qian, Yanlei Hu,

### Jiawen Li and Dong Wu

Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract:** Microtube, with simple and uniform geometry, is one of the basic structures in micro/nano field. We present a method for the fabrication of magnetic drivable microtubes, by direct femtosecond laser writing combined with magnetron sputtering with metal layer. Femtosecond laser beam is modulated into Bessel beam with spatial light modulator (SLM), and then Bessel beam is focused with a high numerical aperture objective. Microtubes are fabricated by scanning focused femtosecond Bessel beam in a sample anchored on a three dimension stage. Followed by magnetron sputtering a nickel layer, the microtubes exhibit supermagnetic property and can be flexibly driven by external magnetic field. In this study, the propagation and high numerical aperture focusing properties of femtosecond Bessel beams are investigated. Microtubes, with well controlled diameter, length and distribution are efficiently fabricated. Rapid steering of nickel coated microtubes along specific route in fluid environment with ex-

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-11-28 \*E-mail: ygliang@ustc.edu.cn

#### **OEE | Advances**

ternal magnetic field has been realized. The steering of microtubes can be realized in various fluid environments. This method is flexible, controllable and efficient and the fabricated drivable microtubes have a promising applications in noninvasive surgery, targeted drug delivery, bioimaging or biosensing and microenvironment cleaning. **Keywords:** microtube; spatial light modulation; Bessel beam; magnetic driving

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.005

Citation: Opto-Elec Eng, 2017, 44(12): 1180-1186

# 1 引 言

近些年,微纳科学取得了巨大的发展与进步,各 种微纳结构的加工与应用受到了广泛关注。其中,可 驱动微结构具有广阔的应用前景,它们可用于无创手 术<sup>[1,2]</sup>、靶向运输药物<sup>[3,4]</sup>、细胞分离与检测<sup>[5,6]</sup>,以及环 境监测与净化<sup>[7,8]</sup>等方面。简单、均匀的微管道作为微 纳领域最基本的模型自然成为了研究热点。2013 年德 国 Schmidt 课题组证明了含有锋利尖端的管状 Ti /Cr/Fe 结构可以用于猪肝组织的钻孔操作<sup>[1]</sup>;2016 年 美国 Wang 课题组将微管道表面携带肠溶衣在胃肠道 中完成定向给药<sup>[3]</sup>;2013 年瑞士 Nelson 课题组利用生 物兼容材料钛实现了人肾脏 239 细胞的分离运输<sup>[6]</sup>; 2016 年德国 Sánchez 课题组利用石墨烯吸收液体中的 重金属离子,实现了环境的净化<sup>[7]</sup>。

目前已有多种制造微管道的方法,如自卷曲制造 法<sup>[9,10]</sup>、静电纺丝法<sup>[11]</sup>、激光直写法<sup>[12]</sup>、模板沉积制造 法<sup>[13,14]</sup>等。其中,自卷曲制造法利用表面张力梯度使 材料发生自卷曲形成微管道,该方法可大批量加工微 管道,但加工工艺复杂;静电纺丝是利用高分子流体 静电雾化的特殊形式,固化成纤维后冷冻切割形成微 管道,该方法制造工艺复杂,加工结构单一;激光直 写法可以利用激光在光敏材料上加工各种形貌的微管 道,此方法可以得到各种形状的微管道,但加工效率 非常低,难以实现大批量加工;模板沉积制造法利用 多孔氧化铝或聚合物模板,沉积金属或聚合物层,形 成微管道,其优点在于可实现管道批量制造,但是管 道尺寸无法控制。

微结构具有多种驱动方式,包括化学驱动<sup>[13,14]</sup>、 光驱动<sup>[15]</sup>、电驱动<sup>[16]</sup>、超声驱动<sup>[17]</sup>以及磁驱动<sup>[18,19]</sup>等。 化学驱动、光驱动、电驱动和超声驱动会受到环境的 严格限制,运动轨迹不易控制,且不适合应用于人体 环境。磁驱动具有无接触、驱动轨迹可控、无污染、 系统简单等优点,因此常被用来实现微结构的运动。

本文提出了一种磁性可驱动微管道新的加工方 法。首先在传统飞秒激光双光子聚合加工的基础上, 引入空间光调制器(spatial light modulator, SLM)。SLM 是通过电信号驱动,改变像素化的液晶单元中液晶分 子的旋向,使入射光束经过 SLM 后,相位发生改变, 以此方式调制光场的相位分布,从而使调制后的光场 在特定区域呈现一定的光场分布。利用 SLM 的灵活性 将飞秒激光调制成贝塞尔光<sup>[20,21]</sup>,聚焦贝塞尔光场得 到的环形光在材料内部扫描,可以实现微管道结构的 高效加工,而且管道高度、分布可灵活控制。得到的 微管道或微管道阵列组合经过磁控溅射镍处理后,利 用外部磁场可以灵活驱动,完成预设的运动轨迹。这 种可驱动的微管道组合在无创手术、靶向药物运输、 生物成像与传感、微环境净化等领域具有广阔的应用 前景。

# 2 加工系统与原理

#### 2.1 贝塞尔光场计算与仿真

飞秒激光直写在微纳加工方面的技术已非常成 熟。在飞秒激光的作用下,光敏聚合物发生双光子吸 收作用,该方法可加工真三维结构,热影响小,加工 分辨高,但是加工效率非常低。因此,如何提高飞秒 激光的加工效率成为了研究热点。

本文利用 SLM 将激光调制为环形贝塞尔光束代 替传统的单焦点,通过 *Z*向扫描即可实现微管道的加 工而无需单点扫描。这种方法不仅可以保持非常高的 加工分辨率,同时还大大提高了加工效率。另外,由 于贝塞尔光场的参数可控,因此所加工的微管道结构 参数可实现灵活控制。

在本文中,利用 SLM 调制飞秒激光相位得到了飞 秒贝塞尔光。传统方法中,常用锥透镜产生贝塞尔光 束<sup>[22]</sup>,直接利用锥透镜可以得到零阶贝塞尔光,利用 锥透镜与螺旋相位板组合可以得到任意阶贝塞尔光。 本文采用全息相位图加载至 SLM 代替传统的锥透镜 与螺旋相位板组合,大大简化了光学系统,调制得到 了各阶次贝塞尔光。利用 SLM 给高斯分布入射飞秒激 光束叠加一个如式(1)所示的相位因子,即可将入射光 束调制成高阶贝塞尔光场。

### OEE | Advances

$$T_n(r,\theta) = \exp(in\theta) \exp\left(-\frac{i2\pi r}{r_0}\right), \qquad (1)$$

式中: $r, \theta$ 为全息相位平面极坐标系自变量; $r_0$ 为可 变常数;n表示n阶贝塞尔光。

SLM 表面是像素化的微小相位调制单元。为了计 算方便,进行直角坐标系与极坐标系的转换,可得  $r^2 = (i^2 + j^2) \Delta^2$ 。*i*,*j*分别为像素点的横纵坐标, $\Delta$ 为像素单元。利用菲涅尔衍射积分,可计算得到传播 方向上的光场强度分布可表示为

$$E(\rho, \psi, z) = \frac{\exp(ikz)}{ikz} \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \exp\left[in\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \times \int_{0}^{E} \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \exp\left(-\frac{i2\pi r}{r_0}\right) J_n\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr, \quad (2)$$

式中: $\rho, \psi$  为观察面极坐标;  $J_n$  为 n 阶第一类贝塞尔函数。

利用上述公式可由 MATLAB 生成如图 1(a)所示 *n*=20,*n*=480 的贝塞尔光全息相位图,将此全息图加 载在空间光调制器上即可调制得到飞秒贝塞尔光,但 此时得到的飞秒贝塞尔光束中心包含有 0 级光,因此 需要在全息相位图上叠加一个闪耀光栅将 0 级光偏 出,得到需要的+1 级衍射光。图 1(b)、1(c)分别展示 了飞秒激光通过 SLM 被调制为贝塞尔光的仿真计算 图与实际测量图,通过对比可以看出仿真计算与实际 测量结果一致。仿真详细展示了飞秒激光经过 SLM 后,被调制的飞秒贝塞尔光在光轴截面中光场强度呈 贝塞尔函数分布,调制得到的高阶贝塞尔光主瓣直径 为 4 mm,可以看出能量主要集中在贝塞尔光主瓣, 而旁瓣上分布的能量非常低。

飞秒贝塞尔光束是通过油镜(*NA*=1.35)聚焦后形 成环形光场用于微管道结构的加工。为了详细分析微 管道结构的加工结果,并且指导微管道加工参数,有 必要对聚焦光场的特性进行详细分析。针对高数值孔 径物镜聚焦,采用 Debye 矢量衍射理论进行计算。如 图 1(d)所示,即为聚焦贝塞尔光的焦面场强分布计算 结果,光场强度呈贝塞尔函数分布,所得到的聚焦贝 塞尔光场直径为 12 μm。聚焦光场在传播方向上的光 强分布如图 1(e)所示,能量主要集中在焦面上 0 到 3 μm 的位置,脱离这个范围后光场强度会迅速下降以 至于在加工时无法达到聚合物交联阈值。根据上述光 场强度分布,可采用拉伸焦面位置的方式加工微管道。

#### 2.2 飞秒激光加工系统

实验采用图 2(a)所示加工系统,本次加工所用激 光波长为 800 nm,脉冲频率为 80 MHz,脉冲宽度为 150 fs。高斯飞秒激光束经扩束器、反射镜射入 SLM(像 素点数 1080×1920,灰度级 256,像素单元 8 μm),利 用计算机在 SLM 上加载设计好的相位图,如图 2(d) 所示,即为加载在 SLM 上的飞秒贝塞尔光全息图,该 全息图由两部分组成:贝塞尔相位板与闪耀光栅。由 于 SLM 是衍射光学器件,经过调制会产生多个衍射 级,为避免0级衍射光斑对加工质量造成干扰,特在



图 1 贝塞尔光全息相位图与光强分布. (a) n=20, r<sub>0</sub>=480 贝塞尔光全息图. (b) 飞秒贝塞尔光光强分布计算仿真图. (c) 飞秒贝塞尔光光强分布实测图. (d) 聚焦后飞秒贝塞尔光焦面光强分布图. (e) 聚焦后飞秒贝塞尔光在传播方向上的光强分布图.

Fig. 1 The phase diagram and intensity distribution of Bessel beams. (a) n=20,  $r_0=480$  Bessel beam hologram. (b) Intensity distribution simulation of femtosecond Bessel beam. (c) Measurement of light intensity distribution of Bessel beam. (d) Microscopic distribution of light intensity of femtosecond Bessel beam. (e) The intensity distribution of the Bessel beam along the propagation direction.

#### DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.005

### **OEE | Advances**



图 2 飞秒贝塞尔光加工系统示意图与工艺流程图. (a) 飞秒贝塞尔光全息加工示意图. (b) 微管道后处理工艺流程图. (c) 微管道放大示意图. (d) 加载 SLM 上的全息相位图:贝塞尔相位板叠加闪耀光栅.

Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond Bessel beam processing system and flow chart of microtubes fabrication procedure. (a) Schematic diagram of femtosecond Bessel beam fabrication system. (b) Flow chart of microtubes post-treatment process. (c) Enlarged image of microtubes. (d) Hologram loaded on SLM: Bessel hologram and Blazed grating.

空间光调制器上叠加闪耀光栅将杂散能级偏出,再配 合孔径光阑即可滤除杂散光能级,这样有效避免了杂 散衍射光的干扰,大大提高了结构加工质量。此后, 贝塞尔光再经反射镜进入物镜(放大倍数 60×,数值孔 径 1.35),并配合三维可移动压电平台在光刻胶(SZ 2080)内完成扫描加工,得到如图 2(c)所示的微管道结 构样品。加工后的样品放入丙酮溶液中进行显影处理, 30 min 后取出样品,得到设计的微管道。随后工艺流 程如图 2(b)所示,先利用磁控溅射机对样品进行镀镍 处理,溅镍处理时真空度达到 5×10<sup>-4</sup> Pa,使溅射的镍 层更加均匀,溅镍厚度为 80 nm。随后将溅射好的样 品转移至广口瓶中进行超声处理,超声功率 70 W,时 间 5 min,微管道在超声作用下脱离基底,形成微管 道悬浊液,随后利用微升移液器将微管道悬浊液转移 至干净培养皿,最后利用柱型磁铁进行后续磁控驱动。

# 3 实验过程与结果

3.1 微管道加工

飞秒激光经 SLM 调制为均一性优良、无衍射的贝 塞尔环形光束,非常适合加工微管道。调制好的贝塞 尔环通过大数值孔径的油镜聚焦在光刻胶(SZ2080)内 进行加工,计算机程序控制加工路径与周期,可加工 出不同形状与组合的微管道。

如图 3 所示,实验中采用 *n*=20,*r*<sub>0</sub>=480 的贝塞尔 环配合高精度三维平台拉伸加工微管道,计算机程序 控制扫描高度为 50 μm,功率为 90 mW,扫描速度为 50 μm/s。图 3(a)是通过该贝塞尔光加工得到的 3×3 微 管道阵列,每两个管道之间的间距为 60 μm,每个管 道的加工时间仅仅需要 1 s,加工效率非常高,因此非 常适合进行大面积管道阵列的加工。图 3(b)为图 3(a) 中管道的单个放大图,此管道高 50 μm,直径 12 μm。 计算机程序可以调整管道高度与排布。拉伸得到的管 道表面光滑,加工效率和质量都非常高。此种加工方 法不仅可以加工单个管道,还可以通过计算机程序实 现复杂管道组合的加工,图 3(b)、3(c)分别为 1×2、2×2 型微管道组合,通过计算机程序控制 12 μm 管道的周 期排布得到。

通过图 3 的 SEM 图片可以看出,由于飞秒贝塞尔 光的无衍射性与焦面光强均一性,利用其加工的微管 道表面光滑,无明显的毛刺现象,而且加工可控性高、 效率高、结构均匀性好,和以往的方法相比,该方法 在加工大批量微管道方面具有非常明显的优势。

通过计算机程序控制,可以加工高度不同的微管 组合形成火箭式微管道。图 4(a)和 4(b)分别为 5 管型 与 9 管型的微火箭的俯视图,图 4(d)和 4(e)分别为 5 管型与 9 管型的微火箭的  $45^{\circ}$ 视图。5 管型微火箭由高 为 30  $\mu$ m、60  $\mu$ m 的微管道组合形成,9 管型微火箭则 由高为 25  $\mu$ m、40  $\mu$ m、70  $\mu$ m 的微管道组合形成。以 往自卷曲法、模板沉积法都很少可以得到复杂的微管 道组合,而利用飞秒贝塞尔光加工可以简单高效地得 到任意微管道组合,此方法在加工多样性上具有非常 大的优势。



图 3 贝塞尔光全息加工结构 SEM 图. (a) 贝塞尔管道阵列图. (b) 单个贝塞尔管道放大图. (c), (d) 分别为 2×1、2×2 型, 高 50 µm 微管道.

Fig. 3 SEM images of Bessel light holographic processing structure. (a) SEM image of Bessel microtube arrays. (b) Enlarged image of single Bessel microtube. (c), (d) SEM image of 2×1 and 2×2 type, microtubes with 50 µm height, respectively.



图 4 飞秒贝塞尔光全息加工复杂结构 SEM 图. (a), (b)分别为 5 管微火箭、9 管微火箭俯视图. (d), (e)分别为 45°视 图. (c), (f)分别为 5 管微火箭、9 管微火箭阵列.

Fig. 4 SEM images of complex structure fabricated by femtosecond Bessel beam. (a), (b) Top view of 5 tubes microrocket, 9 tubes microrocket and (d), (e) 45° captured images of 5 tubes microrocket, 9 tubes microrocket. (c), (f) Microrockets arrays.

#### DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.12.005

利用飞秒贝塞尔光加工效率高的优势,图 4(c)、 4(f)分别加工了 5 管微火箭、9 管微火箭的阵列,SEM 图可以看出,阵列结构中,微管道组合都具有非常好 的一致性和可重复性。目前,单个管道包裹药物运输 已经实现,但运输效率不高。在未来,飞秒贝塞尔光 加工得到的微管道组合具有多个管道口,可能实现多 药物一次运输,大大提高了药物运输的效率与多样性。

#### 3.2 微管道驱动

飞秒贝塞尔光可以高效加工高质量的微管道及其 各种组合。这种微管道要发挥其功能,就必须实现对 其进行驱动。得到的微管道采用磁控溅射镍处理,管 道表面溅射了一层 80 nm 的镍金属薄膜,此时管道可 通过外部磁场驱动。溅镍后的微管道样品放入超声机 超声处理 5 min,得到微管道悬浊液,随后利用微移 液器将微管道悬浊液转移至干净小培养皿中,在蒸馏 水环境中,微管道组合在外部磁场下可灵活运动。

接着对微管道的可驱动性进行了实验测试,测试 装置如图 5(a)所示,由四部分组成:计算机、倒置荧 光显微镜、三维移动平台、柱型磁铁。微管道样品置 于荧光显微镜上通过 CCD 进行观察,柱型磁铁提供

### OEE | Advances

实现微管道驱动的磁场。驱动过程中柱型磁铁 N 极与 样品距离 1 cm ,经高斯计测量驱动磁场强度为 20 mT , 管道运动速度可达 100 µm/s。如图 5(b)所示,微管道 在磁场的作用下,在蒸馏水环境中可灵活地按照特定 轨迹运动,形成了"NANO"型的轨迹。微管道驱动 可控性主要由外部磁场梯度所决定,其运动液体环境、 光信号、电信号、热信号的变化均不会对其驱动性能 产生影响。图 5(c)~5(j)即为不同时刻微管道运动到的 位置,可以看出微管道在外部磁场的作用下,不仅可 以实现各种直线运动,还可以灵活的进行弧形与转弯 运动。相比其他驱动方式,这是一种轨迹灵活可控、 无接触式的驱动方式,在生物医学领域,特别是人体 环境中具有非常重要的应用前景。在运动过程中,管 道组合中各独立微管道之间未发生任何相互影响,微 管道组合具有和单个管道一致的驱动速度、灵活性。 以往的工作已经实现对溅镍处理的 ABFs 进行驱动, 并且完成了药物、细胞运输的工作,在运输过程中, 溅镍层对运输物质及载体均无污染<sup>[23,24]</sup>。因此,未来 这些溅镍的微管道不仅可以用于体外的细胞分离、环 境监测与净化,还可以用于体内靶向药物运输、无创 手术等领域。



图 5 磁驱动系统示意图与微管道在外部磁场作用下的运动轨迹. (a) 磁驱动系统示意图. (b) 微管道完成"NANO" 型运动轨迹. (c)~(j) 不同时刻微管道所在位置.

Fig. 5 Magnetic drive system diagram and the trajectory of microtube under external magnetic field. (a) Magnetic drive system diagram. (b) Microtube complete "NANO" type trajectory. (c) $\sim$ (j) The location of microtube at different time.

### OEE | Advances

#### 2017年,第44卷,第12期

### 4 结 论

本文提出了一种新型的复杂微管道高效加工方 法,利用飞秒贝塞尔光聚焦加工得到复杂的微管道组 合及阵列,相比于其他加工方法,此方法加工结构灵 活可控、生产效率高、无污染;经磁控溅射镍处理, 微管道可磁控,其运动灵敏、稳定,运动轨迹具有可 设计性,并且可以在人体环境中运动,证明了在靶向 药物运输、细胞转移、生物成像与传感等方面的可行 性,具有巨大的应用前景。

### 基金项目

国家自然科学基金(51675503,61475149, 51405464,61675190,51605463);"中央高校基本科研 业务费专项资金资助"(WK2480000002);中国博士后 科学基金(2016M590578,2016M602027);中国科学院 仪器工程(YZ201566);"青年千人计划"项目。

# 参考文献

- Xi Wang, Solovev A A, Ananth A N, *et al.* Rolled-up magnetic microdrillers: towards remotely controlled minimally invasive surgery[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(4): 1294–1297.
- 2 Kagan D, Benchimol M J, Claussen J C, *et al.* Acoustic droplet vaporization and propulsion of perfluorocarbon-loaded microbullets for targeted tissue penetration and deformation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, **124**(30): 7637–7640.
- 3 Li Jinxing, Thamphiwatana S, Liu Wenjuan, *et al.* Enteric micromotor can selectively position and spontaneously propel in the gastrointestinal tract[J]. ACS Nano, 2016, **10**(10): 9536–9542.
- 4 Gao Wei, Kagan D, Pak O S, et al. Cargo-towing fuel-free magnetic nanoswimmers for targeted drug delivery[J]. Small, 2012, 8(3): 460–467.
- 5 Yang Liang, Ji Shengyun, Xie Kenan, *et al.* High efficiency fabrication of complex microtube arrays by scanning focused femtosecond laser Bessel beam for trapping/releasing biological cells[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8144–8157.
- 6 Kim S, Qiu Famin, Kim S, et al. Fabrication and characterization of magnetic microrobots for three-dimensional cell culture and targeted transportation[J]. Advanced Materials, 2013, 25(41): 5863–5868.
- 7 Vilela D, Parmar J, Zeng Yongfei, et al. Graphene-based microbots for toxic heavy metal removal and recovery from water[J]. Nano Letters, 2016, 16(4): 2860–2866.
- 8 Zhao Guanjia, Sanchez S, Schmidt O G, et al. Poisoning of bubble propelled catalytic micromotors: the chemical environment matters[J]. Nanoscale, 2013, 5(7): 2909–2914.
- 9 Solovev A A, Mei Yongfeng, Bermúdez Urena E, et al. Catalytic microtubular jet engines self-propelled by accumulated gas

bubbles[J]. Small, 2009, 5(14): 1688–1692.

- 10 Solovev A A, Xi Wang, Gracias D H, et al. Self-propelled nanotools[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1751–1756.
- 11 Sitt A, Soukupova J, Miller D, et al. Microscale rockets and picoliter containers engineered from electrospun polymeric microtubes[J]. Small, 2016, **12**(11): 1432–1439.
- 12 Stankevicius E, Gertus T, Rutkauskas M, et al. Fabrication of micro-tube arrays in photopolymer SZ2080 by using three different methods of a direct laser polymerization technique[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(6): 065022.
- 13 Sattayasamitsathit S, Kou Huanhuan, Gao Wei, et al. Fully loaded micromotors for combinatorial delivery and autonomous release of cargoes[J]. Small, 2014, 10(14): 2830–2833.
- 14 Gao Wei, Dong Rengfeng, Thamphiwatana S, *et al.* Artificial micromotors in the mouse's stomach: A step toward *in vivo* use of synthetic motors[J]. ACS Nano, 2015, 9(1): 117–123.
- 15 Solovev A A, Smith E J, Bof Bufon C C, et al. Light-controlled propulsion of catalytic microengines[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2011, 50(46): 10875–10878.
- 16 Sharma R, Velev O D. Remote steering of self-propelling microcircuits by modulated electric field[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(34): 5512–5519.
- 17 Balk A L, Mair L O, Mathai P P, et al. Kilohertz rotation of nanorods propelled by ultrasound, traced by microvortex advection of nanoparticles[J]. ACS Nano, 2014, 8(8): 8300–8309.
- 18 Tottori S, Zhang Li, Qiu Famin, et al. Magnetic helical micromachines: fabrication, controlled swimming, and cargo transport[J]. Advanced Materials, 2012, 24(6): 811–816.
- 19 Servant A, Qiu Famin, Mazza M, et al. Controlled in vivo swimming of a swarm of bacteria-like microrobotic flagella[J]. Advanced Materials, 2015, 27(19): 2981–2988.
- 20 Lin Peiqiu, Wang Hui, Pang Hui. Scanning three-dimensional image with kinoform based on liquid crystal spatial light modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(3): 138–143.

林培秋, 王辉, 庞辉. 基于液晶空间光调制器的相息图扫描三维成像[J]. 光电工程, 2010, **37**(3): 138-143.

21 Rao Shenglong, Wu Peichao, Zhang Chenchu, et al. Energy-controllable femtosecond laser fabrication based on spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102008.

饶生龙,吴培超,张晨初,等.基于空间光调制器的能量可控飞秒 激光加工[J]. 中国激光,2017,44(1):0102008.

- 22 Bhuian B, Winfield R J, O'Brien S, et al. Pattern generation using axicon lens beam shaping in two-photon polymerisation[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 841–844.
- 23 Mhanna R, Qiu Famin, Zhang Li, *et al.* Artificial bacterial flagella for remote-controlled targeted single-cell drug delivery[J]. *Small*, 2014, **10**(10): 1953–1957.
- 24 Ding Yun, Qiu Famin, Solvas X C I, et al. Microfluidic-based droplet and cell manipulations using artificial bacterial flagella[J]. *Micromachines*, 2016, 7(2): 25.