飞秒激光“双三维”纳米加工制备智能微纳器件

马卓晨^{1,2}, 张永来¹, 孙洪波^{1,2*}

1. 吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室, 长春 130012;

2. 清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: hbsun@tsinghua.edu.cn

Femtosecond laser “dual 3D” nanofabrication of smart micro/nanoactuators

Zhuo-Chen Ma^{1,2}, Yong-Lai Zhang¹ & Hong-Bo Sun^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: hbsun@tsinghua.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2020-0757

智能材料被认为是继天然材料、合成高分子材料、人工设计材料之后的第四代材料, 它可将环境刺激信号转化为机械响应行为, 因此对于开发诸如智能微型机器人和机电系统等具有重要意义^[1-4]。目前, 基于智能材料的刺激响应器件已成为材料科学、纳米技术和信息领域多学科交叉的研究前沿和热点, 其发展主要依赖智能材料的优化及器件的设计与制造两个方面^[5-9]。然而, 相比于智能材料的飞速发展, 智能材料的微纳结构加工技术目前还不成熟, 因此, 现有的智能驱动器件的研制还依赖于传统的多层沉积和二维图案化加工工艺, 靠异质材料对环境刺激的响应差异实现可控驱动。这种器件设计和制造方式不仅没有发挥智能材料的优势, 还严重限制了三维智能响应器件的发展。针对材料智能化和三维成型难题, 本课题组^[10]报道了一种飞秒激光“双三维”加工技术, 能够基于单一的光聚合物材料体系实现任意三维微纳结构的制备和刺激响应驱动, 相关结果发表在 *ACS Nano*。

该工作提出的所谓“双三维”加工指的是对器件的三维构型以及材料内部三维交联密度的程序化调控。在利用飞秒激光制备微纳器件外部三维构型轮廓的同时, 程序化调控结构内部材料的物性。具体原理是利用飞秒激光可程序化加工的特点, 通过编程实现激光加工时扫描的点线面间距纳米尺度的调控, 靶向性地对结构内部的三维空间交联网络密度进行非均匀构建, 这样就能实现三维微纳结构的内部材料物性任意三维调控。通过对微纳结构内部材料特性非均匀性的设计与剪裁一步制备具

有刺激响应特性的三维智能微纳器件。飞秒激光加工的技术特点为飞秒激光“双三维”智能制造提供了可行性, 有望发展成为先进的智能制造技术。飞秒激光“双三维”加工, 一方面可以解决现有加工技术与智能材料之间“兼容性”的难题, 实现各种智能材料的器件化制备; 另一方面, 也可以一步实现单一材料的智能化与器件化, 彻底解决双层/多层刺激响应型智能器件的稳定性差等缺点。除此之外, 飞秒激光三维可设计加工、高精度、高空间分辨率等优点允许微纳米尺度三维智能器件的制备与集成, 直接贡献于三维微纳机器人、智能生物芯片、智能仿生系统等智能器件的开发。

利用这一巧妙的加工设计方法, 我们制作了包括智能花瓣、微型响应阀门和智能机械手等装置。其中智能花瓣的内外层交联密度不同, 因此在溶剂刺激的时候内外层应力不同, 从而造成类似花瓣的开放和闭合形态。而制作微型响应阀门时, 阀门从中间到外部的交联密度梯度减小, 因此阀门的中间会可控实现开启和关闭, 具有阀门控制流体或粒子通过的效果。在这些研究的基础上, 我们设计了类似人手指的机械手结构。手指的内层激光交联密度很低, 相对地, 其外层交联密度逐渐增大。这样, 机械手就会在外界环境刺激下, 实现握紧和放开。进一步利用飞秒激光易于集成的优势, 将机械手加工在直径 200 μm 的光纤上, 通过对光纤的操作, 实现了对机械手的大范围精确定位, 为实现其抓取释放功能提供技术支持; 进而完成了对微球的定向抓取、搬运、释放等一系列动作, 实现了作为“手”

的基本功能。

该工作利用飞秒激光“双三维”纳米加工技术,实现了用于 3D 智能微纳器件的可设计制造和灵活集成。通过编程控制激光聚焦的体素分布,使得能在纳米尺度空间调节光聚合物的交联网络密度,赋予这些结构特定的刺激响应特性,并且能够使用不同的溶剂进行可逆驱动。基于这一

基本设计原则,很容易地制造出可以控制操作以执行可预测变形的智能微纳机器人。更重要的是,飞秒激光双光子加工还允许各种微执行器与已有设备或器件的灵活集成,从而展示了开发复杂传感和驱动系统的潜力。相信在不久的将来,这种飞秒激光智能加工技术可广泛应用于加工各类智能材料,有助于 3D 微纳机器人的研究和应用。

推荐阅读文献

- 1 Gladman A S, Matsumoto E A, Nuzzo R G, et al. Biomimetic 4D printing. *Nat Mater*, 2016, 15: 413–418
- 2 Huang L, Jiang R, Wu J, et al. Ultrafast digital printing toward 4D shape changing materials. *Adv Mater*, 2017, 29: 1605390
- 3 de Marco C, Pané S, Nelson B J. 4D printing and robotics. *Sci Robot*, 2018, 3: eaau0449
- 4 Wang X, Guo X, Ye J, et al. Freestanding 3D mesostructures, functional devices, and shape-programmable systems based on mechanically induced assembly with shape memory polymers. *Adv Mater*, 2018, 30: e1805615
- 5 Liu J, Erol O, Pantula A, et al. Dual-gel 4D printing of bioinspired tubes. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 8492–8498
- 6 Kuang X, Wu J, Chen K, et al. Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials. *Sci Adv*, 2019, 5: eaav5790
- 7 Erol O, Pantula A, Liu W Q, et al. Transformer hydrogels: A review. *Adv Mater Technol*, 2019, 4: 1900043
- 8 Xu W, Kwok K S, Gracias D H. Ultrathin shape change smart materials. *Acc Chem Res*, 2018, 51: 436–444
- 9 Xu W, Qin Z, Chen C T, et al. Ultrathin thermoresponsive self-folding 3D graphene. *Sci Adv*, 2017, 3: e1701084
- 10 Zhang Y L, Tian Y, Wang H, et al. Dual-3D femtosecond laser nanofabrication enables dynamic actuation. *ACS Nano*, 2019, 13: 4041