科学通报 2021 年 第 66 卷 第 7 期：711 ~ 712
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

蓝宝石雕刻：干法刻蚀辅助激光加工技术

刘学青[1]，陈岐岱[2]，孙洪波[1*]

1. 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;
2. 吉林大学电子科学与工程学院，长春 130012

* 联系人, E-mail: hbsun@tsinghua.edu.cn

Scribing of sapphire by dry-etching-asisted femtosecond laser fabrication

Xue-Qing Liu[1], Qi-Dai Chen[2] & Hong-Bo Sun[1*]

[1] *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[2] *College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*
* Corresponding author, E-mail: hbsun@tsinghua.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2020-1224

硬脆材料主要包括金刚石、蓝宝石、光学玻璃、半导体、高硬度合金、陶瓷等. 这些材料具有抗腐蚀、耐高低温、抗磨损、硬度高、脆性大等特点，在包括特种空间光学窗口、弹药研制、光电器件、消费电子等在内的诸多领域具有广阔的应用前景.

其中，蓝宝石由于其覆盖紫外至中红外的高透过率、超高硬度、良好的热稳定性和化学稳定性等优良的物理、化学和光学性质，已被广泛用于军事、工业、医学和航空航天等领域. 硬脆材料具有优异的光电特性以及稳定的机械化学稳定性，在实际应用中发挥了重要的作用. 从物理性能来看，其表面坚硬、防刮耐磨，因此，玻璃或者强化玻璃常用来制作智能手机的显示屏，蓝宝石可以用来做摄像头的保护镜、手表表面和手机指纹识别模块的盖板等，还适合用于半导体和 LED 的衬底；从化学性能来看，其化学性质稳定，可用来制作电子零部件和电路基板，且由于其抗腐蚀性强可以制作很多化学品、药品和食品的容器.

但正是由于硬脆材料的高硬度高脆性的特点，使得对其进行加工较为困难. 随着时代的飞速发展，各领域对加工的精度、效率以及表面质量的要求不断提升，传统的机械加工已难以满足其要求. 针对如上问题，清华大学孙洪波教授和吉林大学陈岐岱教授团队[1,2]合作提出了一种干法刻蚀辅助飞秒激光加工复合技术，实现了蓝宝石微光学元件的快速精密制备.

1 蓝宝石微光学元件的快速精密制备

虽然蓝宝石晶体已被广泛用于军事、工业、医学和航空航天等领域. 由于传统加工工艺的限制(机械加工精度低、掩膜腐蚀的各向异性导致结构保真度低)，蓝宝石在微纳光学领域的应用受到极大的限制. 近年来，飞秒激光微纳加工技术由于具有真三维加工能力，突破衍射极限的加工精度等优势，已在微电子、微光学、微机电系统、生物传感等领域微纳结构的精密制造中得到验证并实现了越来越广泛的应用[3~5].

利用飞秒激光烧蚀技术能够实现蓝宝石等硬脆材料微纳米结构的制备. 然而对于硬脆材料的加工，通常需要

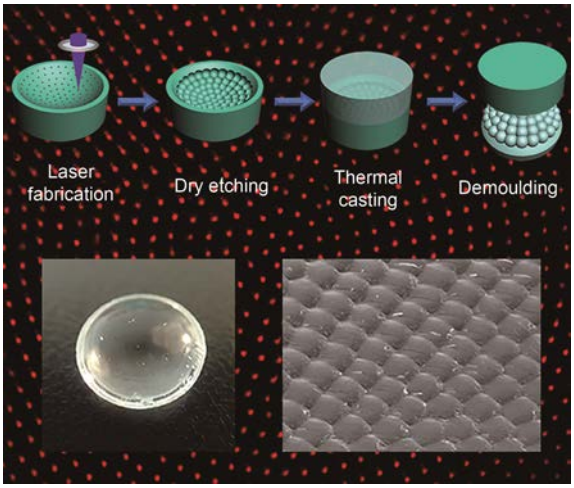


图 1 (网络版彩色)刻蚀辅助激光加工制备蓝宝石复眼模板及高温浇铸转写制备玻璃复眼

Figure 1 (Color online) Etching-assisted femtosecond laser fabrication of sapphire compound eye template and casting replication of glass compound eye

© 2021《中国科学》杂志社

采用高能量密度激光对材料进行烧蚀，加工精度不高且无法实现快速扫描加工. 另外，飞秒激光与蓝宝石晶体相互作用是一个多光子吸收产生库伦微爆炸的过程，制备的蓝宝石表面结构表面粗糙度较大且易碎裂，难以满足光学器件对高表面平滑度的要求.

为实现蓝宝石微光学结构的快速精密制备，本研究团队提出了干法刻蚀辅助飞秒激光加工复合技术. 基本原理是利用低能量的飞秒激光脉冲快速在材料中形成化学改性区，由于脉冲能量的沉积使得改性区具有更高的物理化学活性，从而具有更高的刻蚀速率. 其中，改性区的形貌和体积可以通过飞秒激光的脉冲能量和脉冲数进行调控. 随后利用感应耦合等离子体刻蚀(ICP)刻蚀实现改性区的优先快速去除，并实现结构的逐步平滑成型[6]. 在同样的激光加工参数和刻蚀参数条件下，制备的微透镜尺寸的一致性和均一性能够得到很好的保证.

以具有大视场角的曲面复眼的制备为例，验证了该技术的原理，并研究了相关的加工及刻蚀工艺；搭建了基于振镜和场镜相结合的加工系统，在保证加工精度的前提下极大地提高了加工效率和加工面积. 结合 ICP 刻蚀技术，首次在蓝宝石衬底上实现了厘米级曲面复眼的制备，表面粗糙度仅约 1 nm. 而且与直接飞秒激光烧蚀相比，加工效率提升 2 个数量级.

2 高温浇筑转写技术

由于蓝宝石等硬脆材料本身物理化学性质的稳定性，因此其可作为相当稳定的模板通过浇筑转写的方式实现反结构的高效制备. 本研究团队在之前制备的蓝宝石曲面复眼结构基础上，基于蓝宝石玻璃与 K9 玻璃之间显著的热膨胀系数差异，以蓝宝石凹面复眼为模板，利用高温浇注转写技术首次实现了厘米级 K9 玻璃曲面复眼(由 19 万直径为 20 μm 的子眼紧密排列在曲面上构成)的制备，视场角可达到 90°. 高温浇铸转写技术的关键有两个方面：(1)两种材料之间是否具有较高的熔点或者软化点的差别；(2)经过热处理后，两种材料能否分离. 材料的分离主要依靠材料之间的热膨胀系数差引起的热应力. 因此，对于满足以上两个方面的材料，理论上均可以采用该技术实现微纳结构的快速制备.

总之，利用干法刻蚀辅助激光加工技术，能够有效解决蓝宝石等硬脆材料加工面临的加工效率、表面平滑度、加工精度等问题，为蓝宝石等硬脆材料在微纳光学领域的应用奠定了基础.

推荐阅读文献

1 Liu X Q, Yu L, Yang S N, et al. Optical nanofabrication of concave microlens arrays. Laser Photonics Rev, 2019, 13: 1800272

2 Liu X Q, Yang S N, Yu L, et al. Rapid engraving of artifcial compound eyes from curved sapphire substrate. Adv Funct Mater, 2019, 29: 1900037

3 Malinauskas M, Zukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: From science to industry. Light Sci Appl, 2016, 5: e16133

4 Li Q K, Yu Y H, Wang L, et al. Sapphire-based fresnel zone plate fabricated by femtosecondlaser direct writing and wet etching. IEEE Photonics Technol Lett, 2016, 28: 1290

5 Liu X Q, Bai B F, Chen Q D, et al. Etching-assisted femtosecond laser modification of hard materials. Opto-Electronic Adv, 2019, 2: 190021

6 Liu X Q, Chen Q D, Guan K M, et al. Dry-etching-assisted femtosecond laser direct writing. Laser Photonics Rev, 2017, 11: 1600115