

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

矢量涡旋光场在激光微纳加工中的应用

谢辰, 刘彤炎

引用本文:

谢辰, 刘彤炎. 矢量涡旋光场在激光微纳加工中的应用[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240089.

Xie C, Liu T Y. Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240089.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240089>

收稿日期: 2024-04-17; 修改日期: 2024-08-02; 录用日期: 2024-08-02

相关论文

Robust measurement of orbital angular momentum of a partially coherent vortex beam under amplitude and phase perturbations

Zhao Zhang, Gaoyuan Li, Yonglei Liu, Haiyun Wang, Bernhard J. Hoenders, Chunhao Liang, Yangjian Cai, Jun Zeng
Opto-Electronic Science 2024, 3(1): 240001 doi: [10.29026/oes.2024.240001](https://doi.org/10.29026/oes.2024.240001)

基于飞秒激光的高速双光子刻写技术

杨顺华, 丁晨良, 朱大钊, 杨臻垚, 刘勇, 匡翠方, 刘旭
光电工程 2023, 50(3): 220133 doi: [10.12086/oe.2023.220133](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220133)

基于飞秒激光打印的二氧化钒光谱动态调控结构

朱家琦, 吴世宇, 宋世超, 曹耀宇
光电工程 2023, 50(7): 230095 doi: [10.12086/oe.2023.230095](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230095)

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰
光电工程 2023, 50(8): 230117 doi: [10.12086/oe.2023.230117](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230117)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



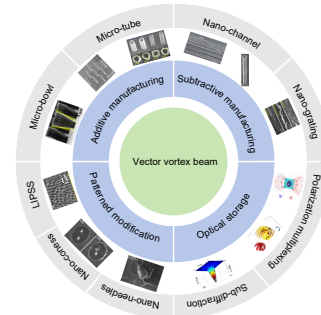
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240089

矢量涡旋光场在激光微纳加工中的应用

谢辰^{1,2*}, 刘彤炎¹¹天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要: 矢量光场领域在过去 20 年出现了众多重要进展。考虑到多篇综述介绍了矢量光场产生方法以及调控技术, 作者仅以矢量涡旋光场为线索总结了其在激光减材、改性以及增材等微纳加工领域的典型应用, 回顾了矢量涡旋光在材料表面和内部的微纳结构加工、光存储以及立体微结构光刻等应用中的部分关键进展。详细介绍了基于定制光场的图案化光致表面周期结构以及立体微结构快速双光子光刻的原理与技术。最后, 总结了矢量涡旋光场在激光微纳加工中的优势与挑战, 展望了其在未来将赋能更多复杂应用。

关键词: 矢量光场; 涡旋光; 激光微纳加工; 激光应用

中图分类号: O436

文献标志码: A

谢辰, 刘彤炎. 矢量涡旋光场在激光微纳加工中的应用[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240089

Xie C, Liu T Y. Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240089

Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining

Xie Chen^{1,2*}, Liu Tongyan¹¹Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: In the past two decades, numerous significant advances have been achieved in the realm of the vector beams. Considering numerous published reviews already covering diverse topics in terms of generating and/or manipulating unprecedented vector beams, we summarize the typical applications of vector vortex beams in the topics of laser micro-nano processing for material modification, subtractive and additive manufactures. This paper reviews part of the critical advances in fabricating micro-nano structures on the surface and inside the materials, optical information storage and rapid fabrication of microstructures with the stereolithography based-on vector vortex beams. Particular cares are focused on the principles and technologies in applications of patterned laser-induced periodic surface structures and rapid two-photon polymerization of three-dimensional microstructures based on customized vector vortex beams. Finally, we summarize the advantages and challenges of vector vortex

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-08-02; 录用日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62275191, 61605142)

*通信作者: 谢辰, xie_chen@tju.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

beams in laser micro-nano processing, and we also anticipate that more vector light fields will enable more complex applications in the future.

Keywords: vector beams; vortex beams; laser micro/nano-machining; laser applications

1 引言

相位与偏振是光场非常重要的两个基本属性^[1]。在相位方面, 1992年, Allen等人仔细研究了螺旋型波前的光场, 并指出形如 $\exp[\pm im\phi]$ 的螺旋波前光场中 (m 为任意整数), 每个光子携带了大小为 $\pm m\hbar$ 的轨道角动量^[2]。而这样的波前将在中心形成一个相位奇点, 导致此处的光强为零。相应地, 光场偏振态的空间分布也可以形成类似的涡旋结构, 形成所谓的矢量涡旋光场。特别地, 自旋角动量 (spin angular momentum, SAM) 和轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 是光场所具备的两类基本角动量。其中, SAM 对应左右旋圆偏振两种状态, 分别携带角动量为 $+\hbar$ 和 $-\hbar$ 。而轨道角动量通常在相位中由螺旋型波前所体现。将一束线偏振光转换成角向或径向偏振光时, 相应的光场可以看作两个轨道角动量分别为 $(m+1)\hbar$ 和 $(m-1)\hbar$ 的左右旋圆偏振光, 即螺旋波前中出现 SAM 与 OAM 的耦合。通常将含有形如 $\exp[\pm im\phi]$ 螺旋波前的光场称为“涡旋光场”, 而矢量涡旋光场 (vector vortex beam) 则是在涡旋光场基础上发展出的一类新型光场。除了具备涡旋型相位外, 还具有包括线偏振、椭圆偏振、径向偏振、角向偏振以及更为丰富的偏振分布模式。矢量化的偏振分布同时也为与偏振相关的激光微纳结构加工带来了新的调控维度。从这一点出发, 本文回顾了包含部分基于线偏振、椭圆偏振、径向和角向偏振光等诸多矢量涡旋光在微纳加工方面的相关进展。具体分为如下几节: 第2节构成本文的重点部分, 主要回顾了矢量涡旋光在激光减材和材料改性方面的进展, 相关工作较多集中在材料表面的微纳结构加工, 其中一个重要方向为激光诱导的表面周期结构 (laser-induced periodic surface structures, LIPSS); 而在涉及材料内部微纳结构加工的小节, 主要介绍了打孔和波导改性等工作; 第2节的最后简要介绍了矢量涡旋光在信息存储领域的应用。

第3节涡旋光的增材加工部分详细介绍了作者团队在涡旋类光场焦散解析与设计方面的最新研究进展。此部分可能为从事激光加工应用的同行们所不熟悉,

因此做了略多说明, 以帮助读者充分理解相关技术。最后一节简要回顾了利用其他矢量光场进行激光微纳加工的工作, 包括阵列型矢量涡旋光场等矢量光场。

2 矢量涡旋光的减材与改性加工

目前最为常见且被广泛研究的矢量涡旋光场, 主要为几种具有轴对称矢量电场分布的柱矢量光。产生这类光场最简单的一类方法是将一类快轴取向呈现空间结构化分布的偏振调控器件与光场相互作用, 光场的正交偏振态即按照特定的模式发生偏转, 合成形态各异的矢量光场, 这通常伴随着自旋-轨道角动量之间的耦合^[3]。这类小型体器件常基于液晶 (如: q 波片) 或材料局部微纳结构的双折射管理 (如: s 波片) 来制造, 能够方便高效地产生矢量涡旋光场。此外, 基于可编程的硅上液晶空间光调制器 (liquid crystal on silicon spatial light modulator, LCoS-SLM) 可以构造一类产生任意矢量分布与位相分布的方案, 能够在不同的矢量光场之间灵活切换。上述基于 q 波片、s 波片以及 LCoS-SLM 的方案在过去的十余年中广泛用于金属和半导体等材料的激光烧蚀研究中。其中, 发明于 2006 年的 q 波片^[4] 可由夹在两片玻璃板之间环绕某点沿角向环绕分布的液晶分子而构成。这类器件因具有使用简单、转化高效、结构紧凑、性能稳定、免维护以及工作波长范围宽等诸多优点, 在矢量涡旋光场的加工研究中最广为使用。图 1 展示了一种基于 q 波片而实现的矢量涡旋光的产生与调控方案^[5], 其中的 VR 代表涡旋延迟器即为一种 q 波片器件, 它可将线偏振光转化为 1 阶柱矢量涡旋光, 而更高阶的矢量涡旋光可通过简单级联相应器件而产生。而基于 LCoS-SLM 的方案一般较为复杂而多样^[6], 但也因为提供了更高的灵活性与可编程等优势, 成为部分加工研究的选择。另一类更为前沿而复杂的矢量光产生方式即是利用“超构材料”, 基于这样的设计已经能够在极薄的基底上通过诸如“悬链光”^[7-8] 等新型微纳单元制造产生多自由度矢量涡旋光场的超表面器件^[9-11]。另外, 关于矢量涡旋光产生和测试方面的详细内容, 可参阅专题综述^[12]。

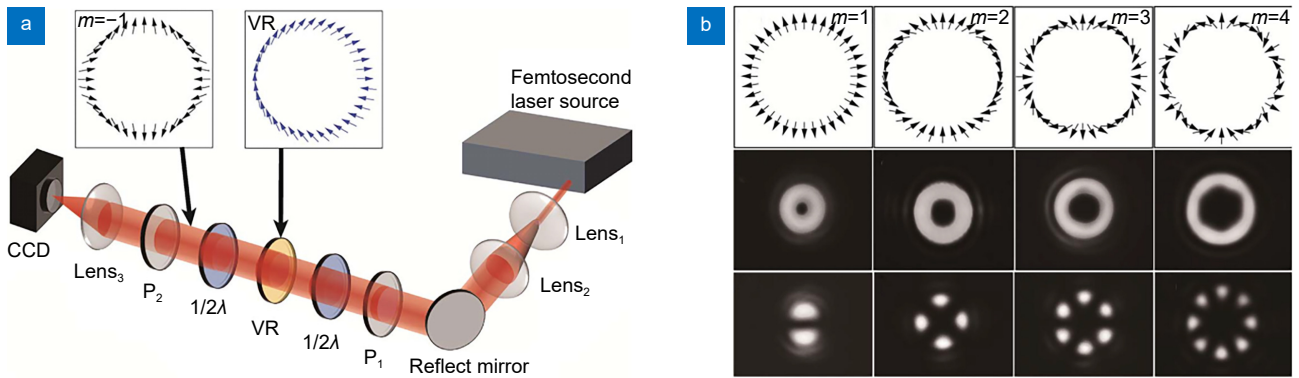


图 1 通过偏振调控器件涡旋延迟片 (VR) 产生的矢量涡旋光^[6]。(a) 实验装置; (b) 不同阶矢量涡旋光
Fig. 1 Vector vortex beams generation with vortex retarders (VR)^[6]. (a) Setup; (b) Vector vortex beams of different orders

2.1 材料表面的微结构加工

本世纪初, 矢量光场的相关理论与技术经历了一轮快速发展, 使其能够在实验中较方便的实现^[13]。因此, 各类矢量光场也很快被应用于激光加工。而相关的应用也确实带来了更多意外的新奇结果, 而这一方面因为矢量光场提供了一种超精细结构化场分布的可能, 一方面也因为已有研究发现多种材料中均可烧蚀出与偏振相关的光致表面周期结构 (LIPSS)。LIPSS 的具体产生机制众说纷纭, 一类粗略而准确的图像常被用以描述相关机制: 当加工激光与物质相互作用时, 微小的表面粗糙结构通过不同效应引起局部表面散射光, 而 LIPSS 结构可以认为是这类散射电磁波与后续加工光场相干迭加后在材料表面出现随空间调制的再吸收作用结果。LIPSS 可以由多种类型的连续波或脉冲型激光加工, 通常横跨加工激光波长为中心的多种尺度。激光波长对 LIPSS 的加工十分重要, 而脉冲宽度也是决定 LIPSS 尺度分布的重要因素。此外, 采用飞秒激光作为烧蚀激光的方案, 能够加工出周期尺寸远小于波长的 LIPSS (约小于半波长), 而这样的结构也被称为高频 LIPSS (high-spatial frequency LIPSS, HSFL)。而目前获得的实验结果中, 多为周期尺寸接近波长的结构 (约在波长与半波长之间), 这样的结构通常被称为低频 LIPSS (low-spatial frequency LIPSS, LSFL)。而 LIPSS 结构与加工光的偏振也有一定关联: 常见金属材料的低频 LIPSS 取向通常与光场偏振方向垂直, 而高频 LIPSS 的取向多与光场偏振方向平行; 而对于多数常见的半导体材料, 低频 LIPSS 的取向多与光场的偏振方向垂直, 而高频 LIPSS 的取向与加工光场偏振方向之间既可能垂直也可能平行; 常见电介质材料的低频 LIPSS 取向大多与光场偏振方向平行, 而其高频 LIPSS 取向则多与光场偏振方向垂

直。另外, 利用激光进行材料表面结构化的研究结果显示, 在上述 LIPSS 结构之外还存在一类始终与偏振方向平行且周期通常为微米量级的周期结构。虽然在过往的研究历史中, 该结构偶尔也被称为 LIPSS, 但目前更广泛的共识将该结构单独定义为沟槽 (grooves), 并且也常将 LIPSS 称为“涟漪” (ripples), 以便对两种结构进行区分。LIPSS 常年受到重视的一个重要原因是其机制中可能涉及到的表面等离元基元 (surface plasmonic polariton, SPP) 在超衍射光刻中发挥了更大作用^[14], 基于 SPP 的相关技术甚至使用 365 nm 波长实现了 22 nm 单次曝光成像的光刻分辨率^[15]。矢量涡旋光相比传统高斯光束可获得更为丰富的偏振分布, 基于这类光场通过单步曝光方式即可快速加工出更为丰富而取向可控的周期化表面结构图案。

随着超短 (皮秒或飞秒) 脉冲激光器的广泛商业化, 越来越多的研究者开始采用皮秒乃至飞秒激光开展飞秒激光微纳加工的研究。在 21 世纪初的十余年中, 多个课题组将钛宝石飞秒激光器广泛应用于相关研究。如图 2 所示, 2010 年, 澳大利亚国立大学的团队将紧聚焦的线偏振飞秒涡旋光场首次用于玻璃的表面烧蚀研究, 制作出高质量百纳米宽的微环缝结构^[16]。同一研究团队很快发现矢量光场的空间偏振分布也可以被“记录”在玻璃表面, 产生与局部偏振方向垂直取向的亚波长纳米纹理^[17]。根据相应纳米周期结构的特征, 相关结果应归类为飞秒激光在电介质材料内产生的高频 LIPSS。

2010 年, 台湾和日本的联合研究团队在硅材料表面利用径向和角向偏振的飞秒激光加工出与偏振分布相关的类周期结构, 在低激光通量区域形成了取向垂直于偏振方向、周期约 600~700 nm 的 LIPSS; 而在高激光能流区域形成了取向平行于偏振方向、周期

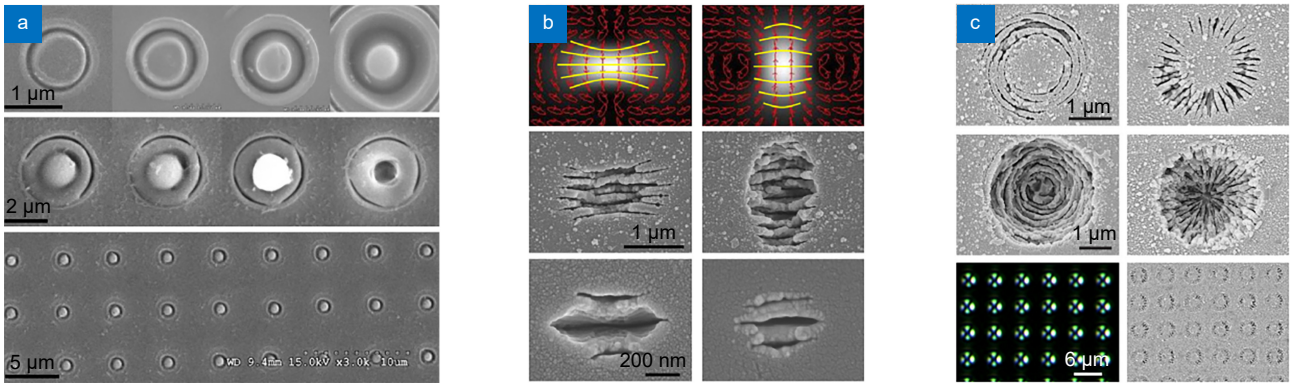


图 2 紧聚焦涡旋飞秒光场在玻璃材料的加工结果。(a) 利用线偏振激光烧蚀加工的百纳米宽微环缝结构^[16]；利用 (b) 混合偏振态和 (c) 径向与角向偏振态激光在熔石英玻璃表面加工的偏振敏感结构^[17]

Fig. 2 Machining results on glass with tightly focused vortex beams. (a) Annular rings ablated by linearly polarized beams^[16]; Polarization-sensitive structures produced on fused silica glass with (b) mixed and (c) radially- or azimuthally-polarized beams^[17]

约 2~3 μm 的沟槽^[18]。随后，多个课题组也利用飞秒矢量涡旋光在硅表面开展了微纳结构的加工研究^[19-22]。2011 年，澳大利亚国立大学的团队进一步采用了矢量涡旋光场开展了硅表面微结构的烧蚀研究，通过仅改变具体的光场矢量偏振特性获得了显著不同的烧蚀微结构特征^[19]。同年，南开大学的研究团队通过精确控制矢量飞秒光场的曝光能量在硅表面加工出全区域内与偏振垂直的“涟漪”型 LIPSS^[20]。2015 年，那波里费德里科二世大学的团队使用不同矢量涡旋光场在硅晶圆表面进行表面结构化加工研究，图 3 展示了加工结果中典型的两类微纳结构^[21]：在绝大多数靠近中心的高通量区域，所获得的沟道取向与局部偏振方向

一致；而在边沿的低通量区域（图 3 中黄色框）则出现了一条充满低频 LIPSS 的环带，其取向垂直于局部偏振方向。该工作还系统研究了两类微纳周期结构的形成机制中，在 Sipe-Drude 模型中引入有效光通量概念后，仿真结果能够较好对应实验中低频 LIPSS 向更高周期沟槽微结构的过渡演化过程。这一研究也表明，通过有效控制光斑内的局部光场激发水平即可获得形态与尺度多样的材料表面微纳结构分布。2017 年，西北工业大学的课题组在相关研究中亦发现随着涡旋拓扑荷数的改变，矢量涡旋光束的焦场呈现出可控的偏振态和强度分布变化，致使生成 LIPSS 的取向和形貌发生有序变换，为表面微结构的制备提供了新的操

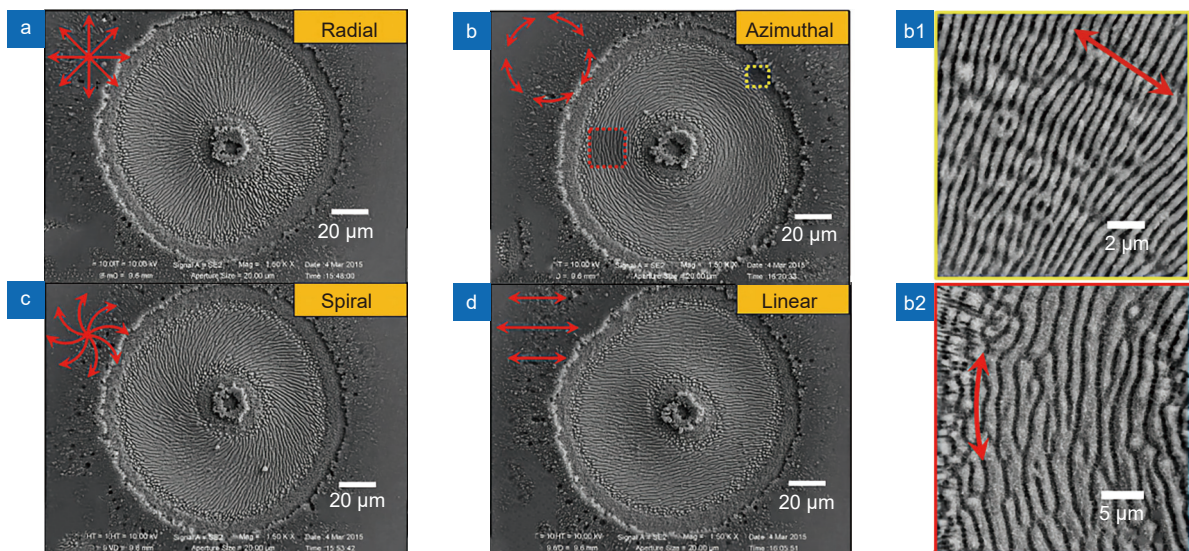


图 3 多种不同偏振形态矢量涡旋光在硅晶圆上加工 LIPSS 的表面形态^[21]。(a) 径向偏振；(b) 角向偏振；(c) 螺旋线偏振；(d) 线偏振。插图 (b1) 和 (b2) 分别放大了 (b) 中标注的低频 LIPSS 边沿区域和靠近中心充满沟道的区域

Fig. 3 LIPSS imprinted on Silicon wafer with different vector vortex beams of various polarization state^[21]. (a) Radial; (b) Azimuthal; (c) Spiral; (d) Linear. Insets (b1) and (b2) show the zoom-in LSFLs in the peripheral regions and the grooves in the internal region marked in (b)

控维度^[22]。但同时也有研究者指出, 对于采用径向和角向偏振的飞秒涡旋型光场的硅晶圆表面打孔应用时, 这些与偏振相关的 LIPSS 也会出现在于孔的边缘区域, 因此对钻孔质量有负面影响^[23]。上述基于钛宝石飞秒激光脉冲针对硅材料的研究中, 低频 LIPSS 的主要形成机制为: 硅表面的先遣脉冲首先诱导出极其微小的表面粗糙分布, 所激发出的表面等离子激元进一步辐射电磁波, 其与后续脉冲进行干涉后不断巩固加强沿既有粗糙表面的空间调制化吸收分布, 最终形成了与相应局部偏振方向垂直的 LIPSS。

此外, 曼彻斯特大学和南开大学的相关研究团队也基于超短脉冲激光系统分别在不锈钢^[24-28]和铜^[29]等金属表面利用矢量涡旋光场研究了形态多样的 LIPSS。2012 年, 曼彻斯特大学的团队基于纯相位液晶空间光调制器 (SLM) 设计了可以灵活产生径向和角向偏振涡旋光场的偏振模式转换装置。之后, 利用不锈钢材料的 LIPSS 与矢量光场局部偏振态之间的确定关系, 该团队又对上述装置的偏振模式转换有效性进行了验证, 并发现径向和角向偏振光场在聚焦后出现了偏振模式的互换^[24]。2013 年, 该课题组在利用 532 nm 波长的 10 ps 超快激光, 并采用两台纯相位 SLM 构建了能够同时调控矢量偏振态与波前相位分布的装置。所研制的光场调控装置可以灵活方便的生成单点或多焦点矢量偏振的涡旋波前光场, 这个方案也首次在不锈钢材料 LIPSS 的并行加工中进行了应用演示^[25]。同年, 该课题组又基于上述装置演示了与运动系统协同的动态矢量偏振模式控制, 并首次在基于 LIPSS 的扫描图案加工应用中进行了演示^[26]。2015 年, 利物浦大学的团队又利用 1064 nm 波长的 10 ps 近红外超快激光, 基于纯相位 SLM 与 S 波片构建了能够产生包括径向、角向和多种迭加偏振态的多种矢量光场的调控装置, 并由此在抛光不锈钢样品表面产生了包括 OAM 的径向和角向取向以及多种螺旋线取向的 LIPSS^[27]。2021 年, 曼彻斯特大学的团队舍弃了液晶空间光调制器, 基于飞秒钛宝石系统在 316 不锈钢表面尝试了更接近于工业工况的激光表面织构化实验^[28]。采用径向和角向等偏振模式未出意外的加工出常规低频 LIPSS, 并且边缘区域还出现了尺寸约 30 nm 的粒状结构, 其周期大致分布于 90~180 nm 之间, 这说明在所模拟的工业工况中通过改进对光与物质互作用的控制能力能够实现定制化的复杂表面织构化结构。在其他金属方面, 南开大学的研究团队于 2012 年基于

自主设计的任意矢量光场产生装置, 在铜薄膜上研究了飞秒激光诱导的 LIPSS。研究表明不同拓扑荷的矢量涡旋光场能够实现不同的矢量偏振分布, 一个典型的例子为拓扑荷为+1 和-1 的矢量涡旋光场能够分别产生圆形和方形的整体 LIPSS 形貌^[29]。在应用层面, 希腊的研究者于 2017 年进一步开展尝试性工作: 他们利用柱矢量光场在 Ni 金属薄膜上激发的 LIPSS, 制作了鲨鱼皮与荷叶超疏水等仿生微纳结构^[30]。虽然利用矢量涡旋光激发 LIPSS 已出现十余年, 但类似研究仍在其他材料中被不断尝试。2024 年最近的一项工作中, 日本的研究团队利用矢量涡旋光场首次在钨样品上烧蚀出 LIPSS 结构^[31]。

除 LIPSS 结构之外, 涡旋光场也可以加工出其他结构。2010 年, 日本的一个联合团队在金属钼表面通过纳秒涡旋激光加工出微针结构^[32]。该团队后续的工作又由此加工了纳米螺旋针结构^[33]。更为细致的理论与实验表明, 该螺旋结构的手性特征主要由轨道角动量决定, 而自旋角动量仅能起到辅助性作用, 二者共同确定了螺旋频率^[34]。而在硅材料中, 来自加拿大的团队使用矢量涡旋光与高斯光场的相干迭加, 还制作出了如图 4(b) 所示空间位置可控的微纳锥结构^[35]。

2.2 材料内部的微结构加工

作为激光加工的重要领域, 材料钻孔方面较早就出现了应用矢量光场的报道。2008 年, 德国斯图加特 (Stuttgart) 大学与通快激光 (TRUMPF) 合作的一项工作中采用了二氧化碳激光器输出的百微秒脉宽径向和角向偏振光在钢材中进行了钻孔实验^[36]。2010 年, 斯图加特大学的团队又报道了采用皮秒径向和角向偏振光在钢材中的钻孔效果^[37], 研究结果显示出了不同矢量光场所钻孔道形貌的独特性: 从通孔的加工质量来看, 两种矢量光场的主要特征没有显著区别; 而加工盲孔时, 角向偏振光的方案显示出更长更窄的孔道特征。进一步详细对比后, 该团队认为径向偏振更适于在薄工件上加工大尺寸孔径, 而角向偏振则更适于在厚工件中加工高长径比的孔道。

另一种更为独特的贝塞尔涡旋光束在近年也被激光加工领域的研究者广泛采用, 因其继承了零阶贝塞尔光场的无衍射特性, 能够在远超过同尺寸高斯光束瑞利距离的长度上保持几乎恒定的横向光强分布。贝塞尔光场这种独特的几何结构在加工领域极具吸引力, 近十余年内已陆续在玻璃^[38-39]、蓝宝石^[40]以及硅^[41]等材料中通过超快激光实现了如图 5(a) 所示的高长径比

微纳孔道的快速加工。高阶贝塞尔涡旋超短脉冲激光被发现可以激发丰富的非线性传输行为，而通过锥形光场的参数即可调控这些非线性行为，利用定制的飞秒高阶贝塞尔涡旋光束，研究人员实现了图 5(b) 所示的单管波导结构的快速加工^[42]。之后，立陶宛的研究团队利用超快矢量偏振的贝塞尔涡旋光场重复了上述工作^[43]，也取得了类似结果。这项工作中，矢量贝塞尔涡旋光由高斯光束经圆锥透镜和 S 波片产生，偏振片产生了轴对称多瓣光场，同时在加工应用中进行了对比。最新的一项有趣工作中，法国的研究团队利用径向偏振的贝塞尔涡旋光在蓝宝石内部引起的多种复

合效应加工出如图 5(d) 所示的直径约 800 nm 的纳米柱，高度可达 15 μm ^[44]。这项工作中，径向或角向偏振的飞秒涡旋型贝塞尔光贯穿蓝宝石样品，激光能量增加将可以在材料内部激发出高长径比的纳米管状等离子体结构。由于管内压力与温度也会随光通量增加而急剧升高，管内材料最终受到挤压而从样品表面的烧蚀开孔处逃逸。此外，管内柱状材料在脱离原位时的物态也会随激光通量不同而呈现多样性，并通过不同流体动力学形成长直形态的纳米柱、顶部扰动变形的光滑纳米柱 (高粘性液态材料挤出) 以及断续水流状的纳米柱等多种形态结构。

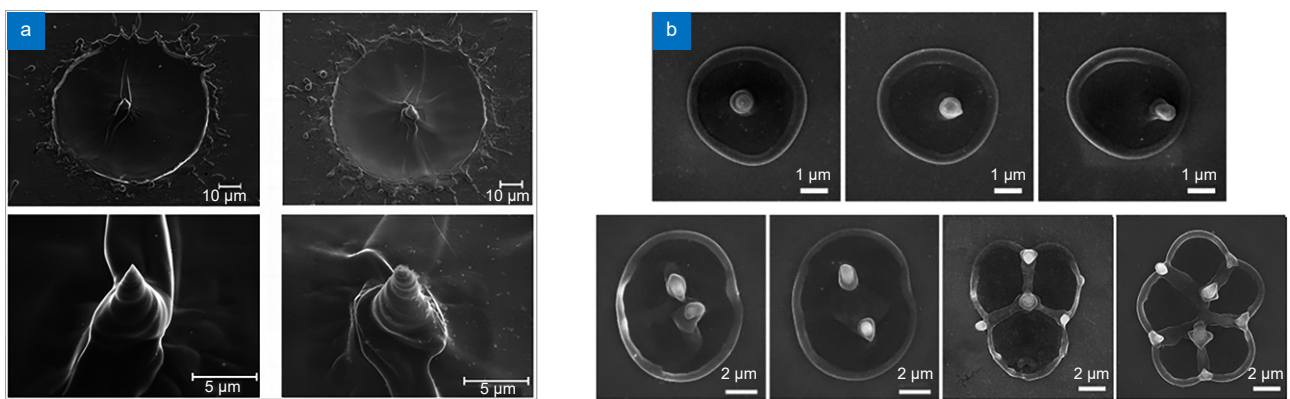


图 4 矢量涡旋光所加工的 (a) 钽金属表面纳米螺针^[34] 和 (b) 硅表面的纳米锥^[35]
 Fig. 4 Twisted nanoneedles on (a) Tantalum sheet^[34] and (b) nanocones on Silicon surface^[35]

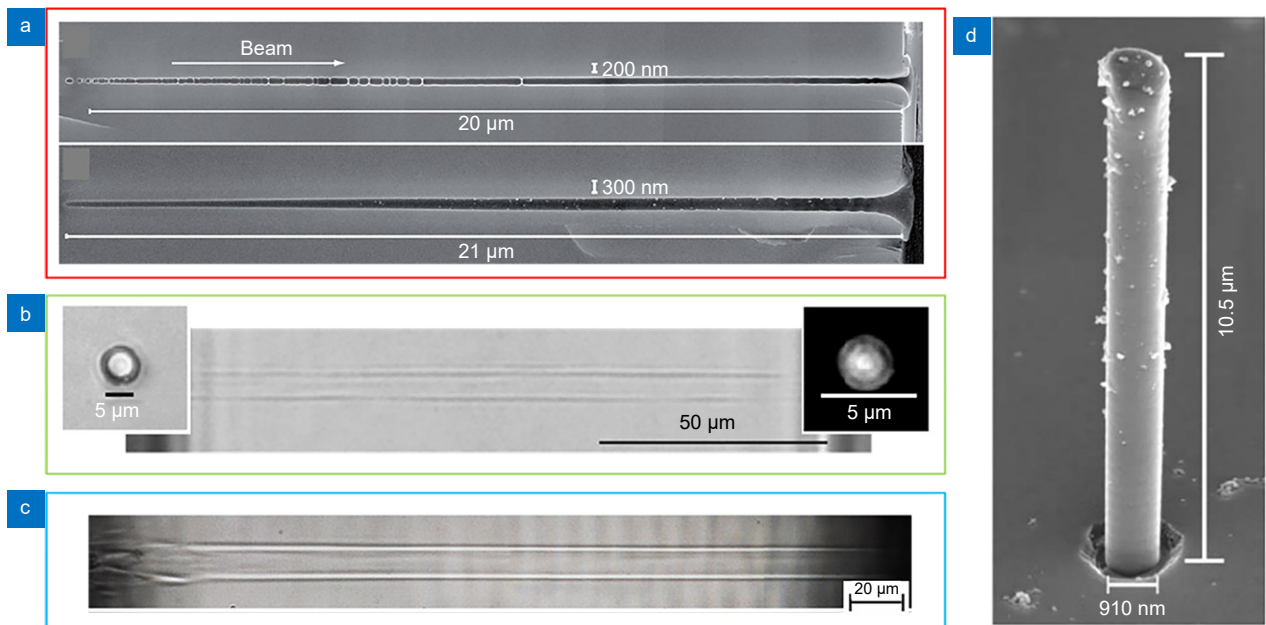


图 5 超快贝塞尔光场的加工结果。(a) 玻璃内的微纳孔道^[38]; (b) 贝塞尔涡旋光在玻璃内加工的波导^[42]; 矢量贝塞尔涡旋光加工结果: (c) 中空管状波导^[43]; (d) 矢量贝塞尔涡旋光在蓝宝石表面加工的垂直站立纳米棒^[44]
 Fig. 5 Machining results with ultrafast Bessel beams. (a) Nanochannels in glass^[38]; (b) Waveguiding tubes fabricated by Bessel vortex beams^[42]; (c) Vector Bessel vortex beams; ^[43] (d) Nanorods by vector Bessel vortex beams^[44]

此外, 标量贝塞尔光还被广泛应用于材料结构化处理中, 如玻璃切割^[45]、刻印纳米光栅结构^[46]、Bragg光栅制造^[47]。出于对物质赋予手性的好奇心, 更复杂的三维矢量偏振的贝塞尔光束也被用于刻印手性纳米光栅的加工探索中^[48]。在这项工作中, 研究人员首先利用高斯光制作了一个无源的空间变化双折射片, 并以此调控零阶贝塞尔光的轴上偏振场方向, 令其在50 μm的轴向距离内偏转90°。之后, 利用此三维偏振结构化的矢量贝塞尔光场在玻璃内刻印了如图6所示的“扭转纳米光栅”。

2.3 基于光的信息存储应用

信息存储的具体技术形式众多, 光盘形式的存储介质是其中的重要技术之一, 其信息储存密度依赖于所能烧蚀凹坑结构的排布密度。而特定矢量光束在紧聚焦下具有更加局域化的纵向电场分布, 甚至配合更先进的光学技术可产生直径突破衍射极限的光斑, 减小存储单元的尺寸, 再配合超精密机械扫描移动机构, 进而大幅提高存储密度。2024年的一项最新工作中, 研究人员借助于最新的材料与光学技术, 仅用一块直径约12 cm的光盘就存储了超过1拍比特(Pbit, petabit)的数据^[49]。这项工作中, 研究人员开发了一种基于特殊光胶薄膜的透明存储介质, 并利用近场光学技术在其中刻写了100层的平面数据。研究人员进一步展望了该堆叠型光存储技术可能制作艾比特(exabit)级别的单盘介质。

而在基于逆法拉第效应的光磁存储方面, 一类广泛被研究的方案希望采用柱矢量光在磁光介质内创造出超分辨的磁化结构。2009年, 国内学者对不同径

向偏振光束的光强分布进行了计算, 发现两个相应的高阶模TEM₁₁和TEM₂₁有利于近场光学数据存储的应用, 而更高阶模式TEM₃₁、TEM₄₁和TEM₅₁模式由于过强的旁瓣则不利于光存储应用^[50]。其中, R-TEM₁₁光束可将光斑尺寸相对R-TEM₀₁光束缩小27.6%, 而焦深增加2.64倍。而随着多维光存储技术的发展, 激光的偏振性质被广泛应用于储存维度复用。而紧聚焦矢量光场为光磁存储提供了一种更为局域化的磁化结构。2013年, 顾敏教授团队在理论层面研究了紧聚焦角向偏振涡旋光场在光磁材料中的亚衍射极限轴向磁化^[51]。相关研究还发现, 该光场在材料内引起的磁化分布, 能够带来15%的光斑宽度的缩减。2014年, 该团队还理论研究了由角向偏振光和环形涡旋二元滤波器所产生的超长光针结构, 该结构在光磁介质中通过逆法拉第效应能够产生具有亚波长直径和20倍长径比的纯轴向磁化针型结构^[52]。2017年, 太原理工大学等单位组成的联合团队基于4π紧聚焦光学系统在理论上设计了一种产生超分辨轴向长磁化链式结构的方案, 该结构由两个对向传输的角向偏振涡旋光场在磁光材料内加工而成, 相关结果有望用于多层磁光数据存储^[53]。2023年, 太原理工和南昌大学等单位组成的联合团队, 还在理论上研究了一种基于角向偏振的圆形艾利涡旋光场实现超长的轴向磁化结构方案, 对应的磁针结构长径比可达177^[54]。而这类方案中, 也可以设计出其他磁化结构。2022年, 哈工大领导的研究团队提出了一种有效且简单易行的方案产生扭转磁化结构。该方案将两束角向偏振高斯涡旋光场在磁化材料中交叉紧聚焦耦合后,

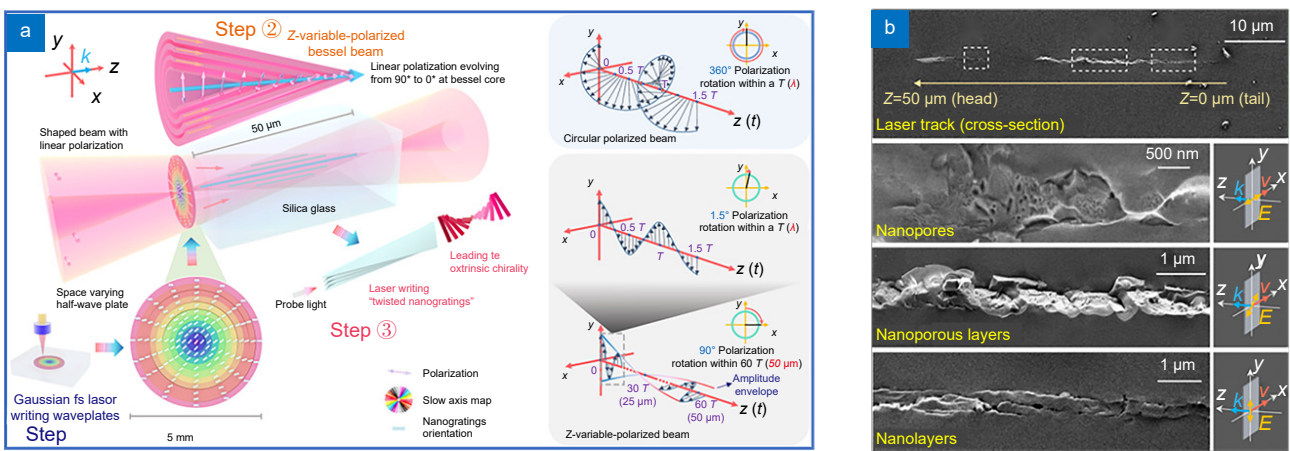


图6 (a) 三维偏振结构化贝塞尔光场与“扭转纳米光栅”刻写的概念示意图; (b) 加工结构的电镜图^[48]

Fig. 6 (a) Schematics of 3D structurally polarized Bessel beams generation and twisted nanograting inscribing; (b) The SEM of inscribed microstructures^[48]

以干涉机制产生相应的亚衍射极限扭转结构(图7), 并通过调节光场参数实现不同扭转极化结构之间的互相切换^[55]。

随着多维光存储技术的发展, 激光偏振也开始被广泛用作一个独立的储存维度^[56-57]。通常, 这类光存储方案通过在玻璃内以飞秒激光加工出纳米光栅而引入人为的双折射来提供另一个数据存储维度。由于矢量光束具有复杂的空间结构化偏振态分布, 因此它也具有潜在更高的信息承载能力。另一类以纳米结构为聚集体的存储方案也可以通过不同矢量光的偏振复用来提高存储能力。2012年, 李向平等人通过高数值孔径物镜叠加径向和角向偏振光束, 实现了任意的3D偏振矢量光束的构建, 产生的单一矢量光束可以对金纳米棒的任意方向进行选择性地激发和熔化, 提高了光存储的加密复杂度^[58]。2020年, 暨南大学的团队利用金纳米棒对于径向和旋向偏振柱矢量光束的不同响应作为信息储存复用的新自由度, 在单个信息单元内实现了30路二进制信息复用的高密度光信息存储^[59]。

3 涡旋光的增材加工

3.1 涡旋类光场的焦散

在几何光学的图像中, 光场被看作无数条几何光线。而复杂光场的光线总会形成一些立体的线或面, 令所有的光线均与这些线或面相切, 这样的线或面即是焦散(caustic)。在针对涡旋光场的焦散解析与设计方面, Michael Berry 爵士在2008年针对理想涡旋类光场进行了焦散的解析, 直观揭示了涡旋光场这一庞

大“家族”在焦散理论中的直观几何图像^[60]: 其初始垂轴面上任一同心圆发出的波矢量会构成一个双曲面, 而所有这些双曲面的包络线构成了涡旋类光束的焦散光。本文作者在大量微纳加工与表征实验中发现, 相比于如图8(a)所示的中空管呈现无衍射传输的理想贝塞尔涡旋光, 实验上所产生的贝塞尔涡旋光场具备独特的传输特征: 在成形后的传输初始阶段会产生一段逐渐发散的“扩束”阶段, 之后才会过渡到近似的无衍射传输阶段。这样的发散性过渡阶段由于仅在微尺度下更为显著, 因此未被广泛关注。而在2015年针对常用的实验贝塞尔涡旋光束开展了大量的解析与实验表征之后, 作者发现初始平面上所有同轴双曲面的束腰集合与相应轴向焦散高度贴合^[61]: 如图8(b)所示, 相关解析结果高度还原了这一段无衍射传输前的过渡阶段。虽然涡旋光的基本图像未发生改变, 但这项工作解析了实验所用贝塞尔涡旋光更为精细且符合实际的焦散图像。

之后, 本文作者团队在2021年期间在此基础上进一步扩展, 针对近十余年出现的突然自会聚涡旋光场, 开发了一种能够从初始平面的涡旋全息图精确解析突然自会聚涡旋光场全局焦散的方法^[62]。而这种光场的全局焦散可以从式(1)的一元二次方程中精确解析(其中各参数的具体定义, 请参阅文献[62-63]):

$$\begin{cases} A(z-z_w)^2 + B(z-z_w) + C = 0 \\ A = (LVN)^{-2} \frac{R'}{R}, \quad B = \frac{z_w'}{L^2}, \quad C = -\frac{R'}{R} \end{cases} \quad (1)$$

实际上, 本文作者团队的后续研究表明: 上述解析结果的普适性更高, 可应用于更为一般的各类轴对称涡旋型光场^[63]。图9列出了利用文献[63]中的普适

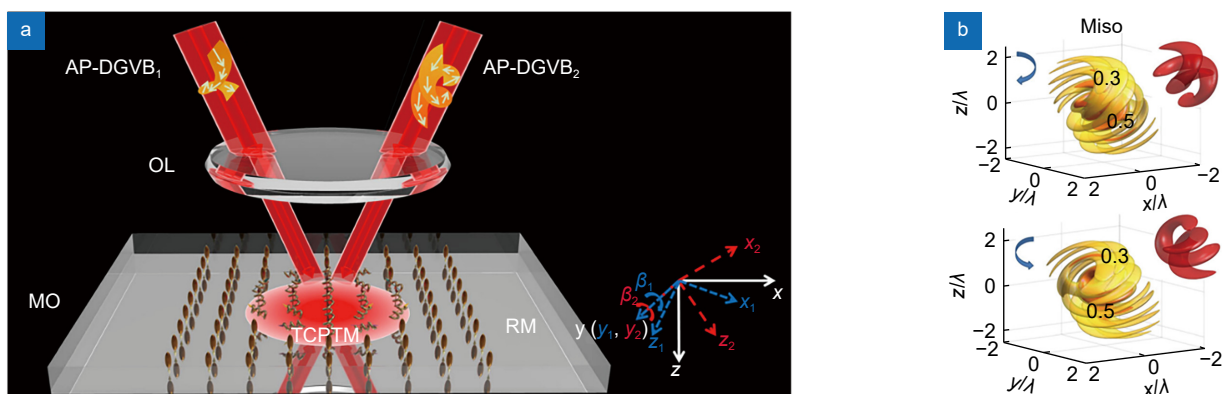


图7 矢量高斯涡旋光产生可控扭转磁化结构^[55]。(a) 紧聚焦双交叉角向偏振高斯涡旋光产生亚微米磁化结构的示意图; (b) 相应光诱导扭转3D磁化体的仿真结果

Fig. 7 Twisted magnetization structures induced by vector Gaussian vortex beams^[55]. (a) Schematic of magnetization generation at subdiffraction-limited scale; (b) Simulation of the light-induced twisted 3D magnetizations

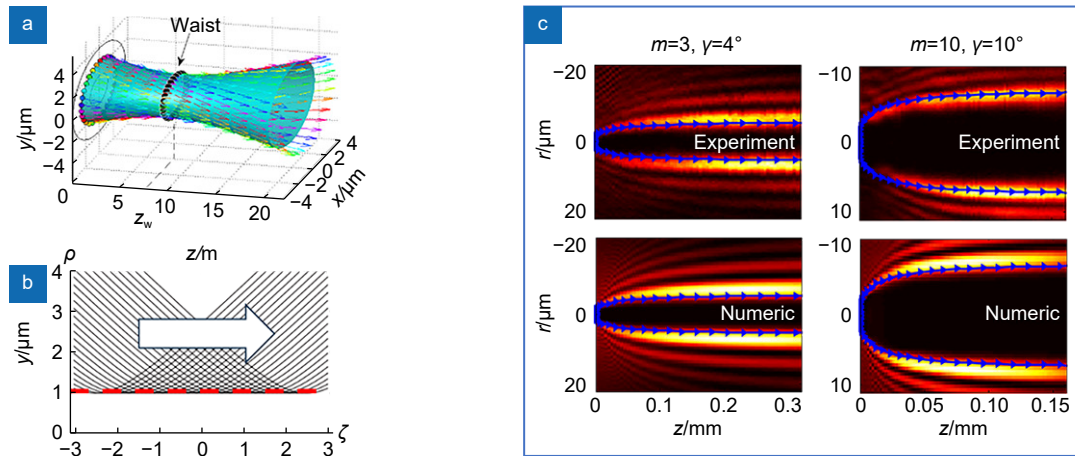


图 8 不同理论中的贝塞尔涡旋光场焦散。(a) 由任一同心圆上出发的波矢构成的任一双曲面；(b) 理想无衍射场的圆柱型焦散(红色虚线为 Berry 的解析结果^[60])，箭头为传输方向；(c) 实验产生的贝塞尔涡旋光场(蓝色虚线为文献[61]的解析焦散)
 Fig. 8 Caustics of Bessel vortex beams in different theories. (a) Any hyperboloid formed by the rays emitting from a circle in the initial plane; (b) Ideal nondiffracting tubular caustics as deduced in Berry's work^[60] (red dashed line); (c) Expanding tubular caustics (blue lines) in reference [61]

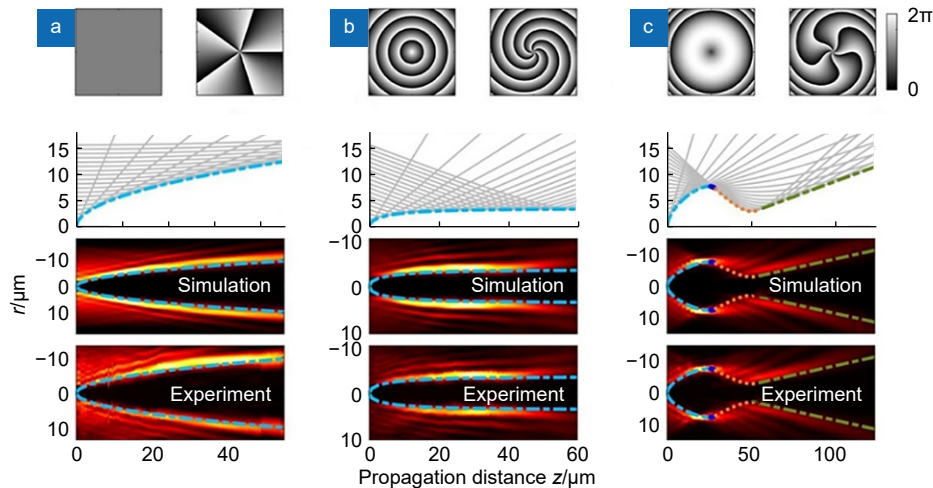


图 9 三种轴对称涡旋类光场及全局焦散解析^[63]。(a) 普通涡旋光；(b) 贝塞尔涡旋光；(c) 抛物线涡环透镜产生的涡旋光
 Fig. 9 Globally analytical caustics of axially symmetric vortex beams^[63]. (a) Vortex beams; (b) Bessel vortex beams; (c) Vortex beams generated from parabolic vortex toroidal lens

解析方案对不同涡旋光场的全局焦散解析结果。由图中彩色虚线所示，相应的解析结果在实验和数值仿真上均完美再现了不同形貌中空微管的形貌。上述方程的解包括了两支解 $\{z_1\}$ 和 $\{z_2\}$ 的集合：

$$z_1 = z_w - \frac{B - \Delta}{2A}, \quad z_2 = z_w - \frac{B + \Delta}{2A}. \quad (2)$$

对许多常见的涡旋光束(如：涡旋光、贝塞尔涡旋光)而言，上述其中一支解的集合即能够刻画其中空管的全局焦散。但该工作还列出了一个特殊的例子——由抛物线环面透镜产生的涡旋光场：由图 9 (c) 中所示，该光场的焦散需要结合上面一元二次方程中的两支解的集合，才能完全刻画全局的中空管状焦散。这说明该工作的解析方案适用于各类轴对称涡旋型光场。

此外，由于上述焦散解析结果能够完美复现全局焦散，人为设计的更多轴对称涡旋光场的特殊性也可由此揭示。在此工作之前，由初始寄主光迭加涡旋相位而产生的相应涡旋光，直观上被认为其中空焦散轨迹与初始寄主光轨迹的变化趋势一致。但作者的这篇工作举出了两个反例：选取了类贝塞尔光和突然自会聚光两种寄主光场，其原本的焦散轨迹沿轴向呈现单调变化(图 10 列 3 中的紫色线)。但对于迭加了涡旋相位的相应涡旋光场，焦散的横向尺寸沿轴向出现了极值点(图 10 列 3 中的局部放大图)，这与单调变化的寄主光焦散轨迹走势截然不同。此外，该工作也为 2015 年针对贝塞尔涡旋光焦散的近似解析结果^[61]

提供了更为清晰的解析图像：双曲面束腰集合与中空管焦散的意外高度重合仅是该最新精确解析结果应用于贝塞尔涡旋光场的一个数学近似。

上述由已知初始平面全息图来解析光场焦散的工作只解决了结构光场调控中的“正问题”，而如何根

据预先设定的焦散轨迹来反向求解所需的初始平面全息图则更具有挑战性，且这类“逆问题”也更令人感兴趣。目前，本文作者团队在傍轴近似下，对一些限制性略高的轴对称涡旋光解决了这类“逆问题”^[63]。

图 11 展示了利用相关解析方法所设计的部分轴对称

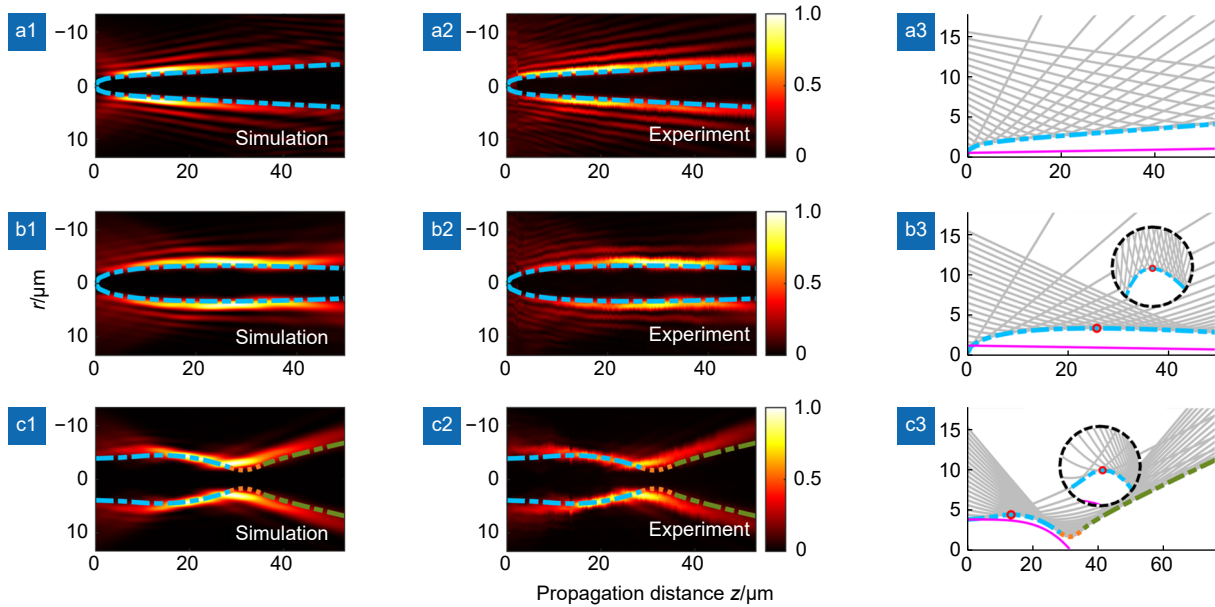


图 10 不同光场在迭加轨道角动量后的焦散或轨迹的对比^[63]。(a) 和 (b) 类贝塞尔涡旋光；(c) 突然自会聚涡旋光。列 1、2 分别代表在纵剖面内光强分布的仿真、实验结果；列 3 展示了迭加轨道角动量前后的全局焦散差异

Fig. 10 Comparison of different light fields with and without vortices^[63]. (a) and (b) Bessel-like beams; (c) Abruptly autofocusing vortex beams. Column 1 and 2 represent, respectively, the intensity profiles along propagation in simulations and in the experiments; Column 3 illustrates the differences between the global caustics of the abruptly autofocusing vortex beams with and without the OAM

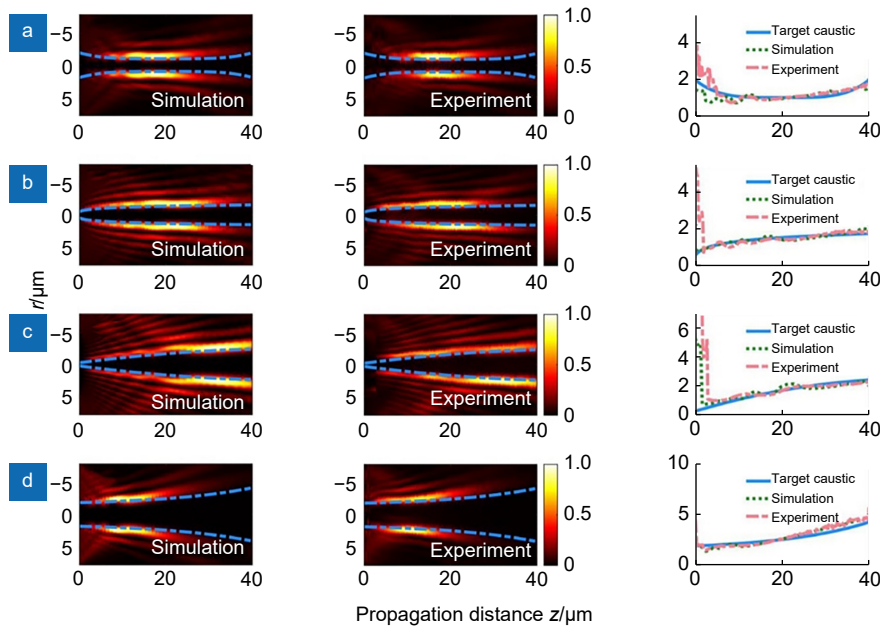


图 11 基于“逆问题”所设计的中空管型的涡旋光场^[63]。(a) 四次方；(b) 对数线；(c) 抛物线；(d) 指数曲线

Fig. 11 Vortex beams designed by solving the inverse problem^[63]. (a) Quartic; (b) Logarithmic; (c) Parabolic; (d) Exponential tubular profiles

涡旋光场, 可以看出它们的空管形状均与预先设定的焦散轨迹高度重合。上述关于涡旋光场的焦散解析与定制能够为激光高效加工提供了一个新思路: 将激光能量沉积于定制化焦散曲面上, 即可通过尽可能减少机械扫描的方式快速提升立体微纳结构的加工速率。相关构想已经在多个双光子聚合增材制造应用中得到了验证。

3.2 涡旋类光场的双光子聚合加工

2012年, 欧洲的研究者在双光子聚合增材制造中也尝试使用了超快涡旋光, 并通过轴向扫描方式实现了微管结构的相对快速加工^[64-65]。之后, 中科大的研究者也利用涡旋光参数调控或动态全息图辅助机械扫描实现了多形态微管结构的加工^[66-69]。相比于传统的逐点加工方式, 上述方案将制作速率提升了2个数量级^[67]。本文作者团队近期也将3.1节中焦散定制的研究成果应用于双光子聚合制造技术, 尝试了无扫描单次曝光快速加工立体微结构单元: 分别采用贝塞尔涡旋光和突然自会聚涡旋光束, 通过单次曝光工艺快速加工了空心微柱^[70]和立体微碗^[71]等结构单元, 所加工的微碗结构如图12(d)所示, 其形貌与所预先设计的抛物线焦散目标结构光场轮廓(图中黄线)高度贴合。相关结果显示了该无机械移动的立体结构单元一次成型方案能够进一步提高加工的效率, 大幅缩短

加工时间。

4 其它矢量光场的微纳加工

随着液晶空间光调制器被广泛应用于光场调控领域, 其相应的调控技术也随之快速发展。图13展示了西北工业大学团队于2018年开发的一套基于单一空间光调制器的光场调控系统^[72]。该系统实现了偏振的椭圆度、取向与分布的调控, 并且还能够同时叠加调控相位和振幅, 生成多样化的矢量光场。得益于此类矢量光场调控技术上的探索, 目前, 实验中可生成的矢量光场种类远不限于本文所介绍的涡旋类光场, 一个例子即是“万花筒”形状的矢量光场^[73]。南开大学的团队利用基于液晶空间光调制器的矢量光场装置在硅^[20]和铜^[29]表面尝试了LIPSS结构加工之后, 又于2013年继续设计了阵列型柱矢量光, 并在硅晶圆的浅表开展了激光烧蚀实验^[74-75]。相关方案中, 研究者结合液晶空间光调制器特殊设计了矢量光场阵列, 产生了如图14所示的可控多焦点图案。之后, 该团队的研究者又在此基础上开发了无机械运动的定制化微结构加工方案^[76-77], 这给相应的加工应用带来了更大的灵活性。该类方案基于特定矢量化光场产生可精准调控的多焦点光场, 通过进一步在加工过程中调控

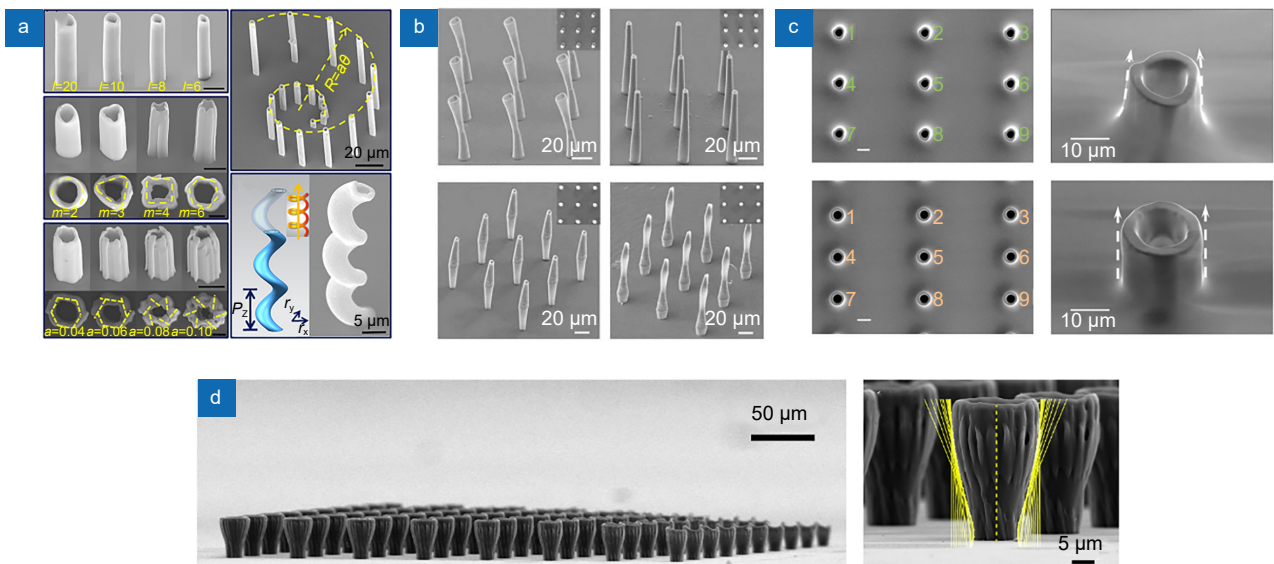


图12 涡旋光双光子聚合加工实现的微管结构。(a) 轴向聚焦涡旋光场扫描加工实现的均匀管径微管^[67]; (b) 由动态全息图辅助轴向扫描聚焦涡旋光方案实现的管径分布可控微管^[69]; (c) 无扫描贝塞尔涡旋光场单次曝光成型的圆柱微管^[70]; (d) 突然自会聚涡旋光场单次曝光成型的曲线微碗^[71], 侧面贴合的抛物线型焦散曲线由黄色线突出显示

Fig. 12 Polymer microtubes fabricated with different vortex beam-based schemes. (a) Uniform tube size enabled by scanning the focused vortex beams^[67]; (b) Controllable tube profiles by dynamic hologram-assisted axial scan of the focused vortex beams^[69]; (c) Cylindrical microtubes fabricated by Bessel vortex beams^[70]; (d) Bowl-shaped microstructures fabricated by abruptly autofocusing vortex beams with tailored parabolic caustics highlighted by the yellow rays^[71]

焦点轨迹即可加工任意曲线。在相关工作中, 研究者基于该方案展示了在铌酸锂晶圆浅表内部通过光致折射率改变所加工的多种二维微结构, 包括蜂巢网格与圆环嵌套阵列、多边形与螺旋扇叶^[76]、微椭圆以及汉字“南”与复杂四边形栅格图案等^[77]。2020年, 南方科技大学的团队设计了一类独特的混合偏振矢量光场, 并将其与激光加工参数的协同在 SiC 表面加工出了如图 15 所示包含 LIPSS 结构的微纳多尺度结构^[78]。

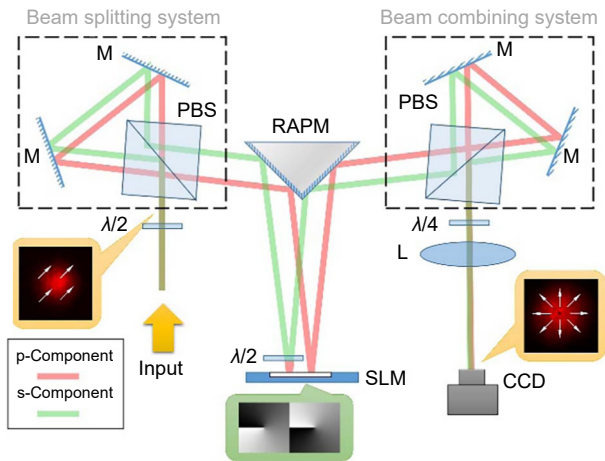


图 13 基于单一液晶空间光调制器产生任意矢量光场的装置示意图^[72]

Fig. 13 Schematics of the setup to generate arbitrary vector beams with a single liquid crystal spatial light modulator^[72]

5 结论

本文回顾了近十余年内利用矢量涡旋激光进行微纳加工的部分国内外进展。主要介绍了矢量涡旋光在材料表面和内部的微纳结构加工、面向信息存储的应用以及采用涡旋光的双光子聚合加工等几方面, 其中较详细回顾了由矢量涡旋光场在不同材料材料表面和内部的微纳结构加工以及定制化涡旋光的双光子增材制造等方向的研究进展。矢量涡旋光由于结合了矢量偏振特性与螺旋波前, 无论在产生调控技术还是光与物质相互作用方面, 均引入了值得探索的自由度。由于矢量涡旋光主要作为一类结构化光场工具, 其相关应用散布在众多截然不同的领域。限于笔者的精力与阅历, 仅摘取了其中部分工作。文中回顾的工作虽然仅仅是各微纳加工细分方向的初步尝试, 但矢量涡旋光已经在赋能光物理与应用以及微纳加工效率提升等方面初露锋芒。

但既有研究工作仍具有一些局限性。一方面, 目前的进展多集中于采用矢量涡旋光场做出各细分方向的首次发现或首个技术报道, 因此仅采用比较常见的矢量涡旋光场开展了初步的材料处理研究; 另一方面, 上述“首发”类工作较少致力于优化调控所使用矢量涡旋光场的参数以提升相关加工结构的质量, 而相关

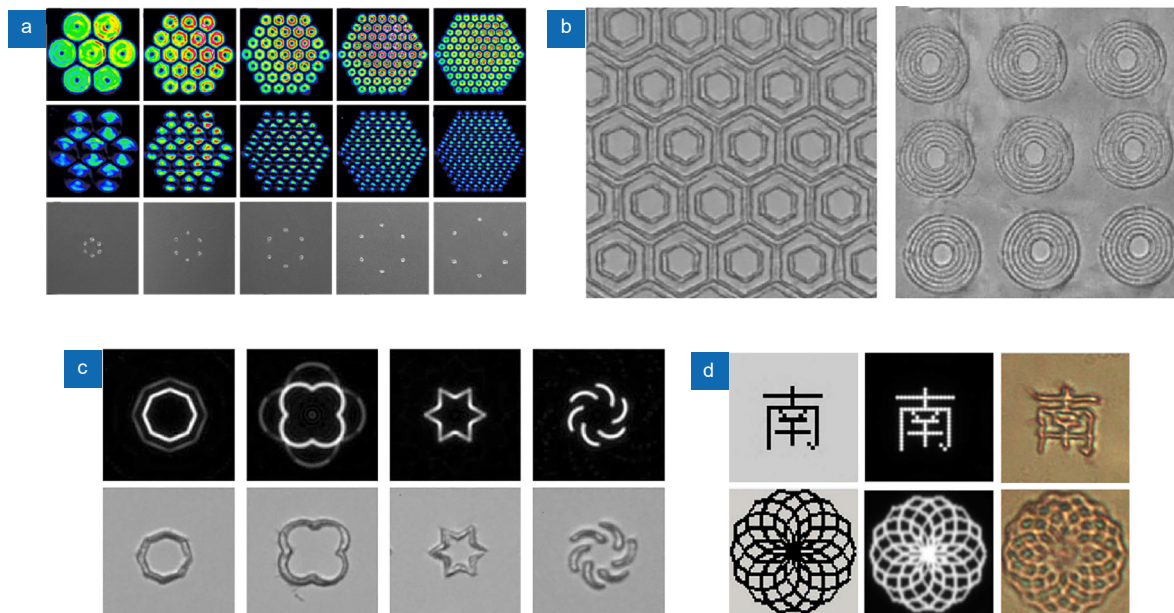


图 14 (a) 在铌酸锂上利用矢量光阵列加工的多焦点阵列结构^[75]; (b) 动态矢量多焦点轨迹控制下所加工的周期嵌套结构; (c) 多边形与螺旋扇叶结构^[76]; (d) 汉字“南”和复杂四边形栅格图案^[77]

Fig. 14 (a) Patterns fabricated on LiNbO₃ with vector beam arrays^[75]; (b) Dynamically trajectory assisted fabrications of periodic nested microstructures; (c) Polygonal and spiral fan-leaf-like structures^[76]; (d) Chinese character “Nan” and irregular quadrilateral grid structures^[77]

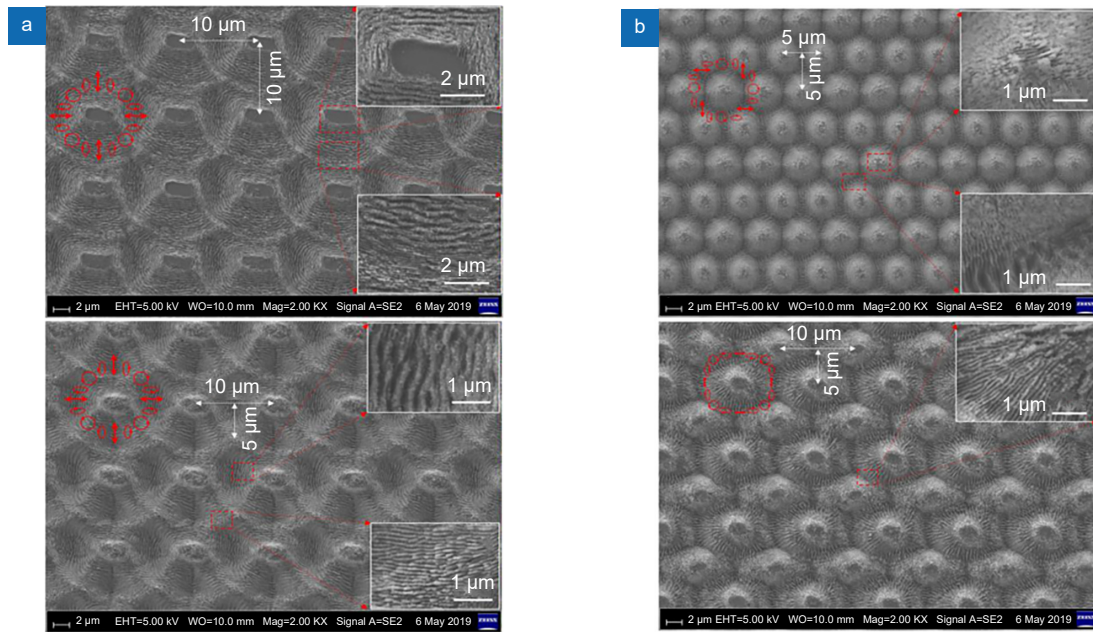


图 15 利用独特设计的矢量光在 SiC 表面所加工的多尺度微纳结构^[78]。(a) 径向杂化矢量光; (b) 螺线杂化矢量光
Fig. 15 Multi-scaled micro/nano-structures fabricated on SiC surface with specially designed vector beams^[78].
(a) Radial-hybrid vector beams; (b) Spiral-hybrid vector beams

工作目前仍需要比较专门而复杂的知识和技术来实现。未来随着新型矢量光场不断被开发, 具有更复杂特征与新特性的结构光“家族”分支将不断涌现。同时, 针对包括矢量涡旋光场在内复杂矢量结构光场的调控技术手段仍在不断完善与商业化, 未来众多高品质矢量光场将进入更多非光学光电专业的应用领域, 进而激发出更为丰富的应用场景。因此, 结合具体应用场景开发独特新型矢量光场的应用领域将具有广阔空间, 等待各行业的从业人员携手进一步探索。

参考文献

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Phys Rev A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [3] Forbes A, de Oliveira M, Dennis M R. Structured light[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(4): 253-262.
- [4] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Pancharatnam-Berry phase optical elements for wave front shaping in the visible domain: Switchable helical mode generation[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(22): 221102.
- [5] Zhang Y Q, Dou X J, Yang Y, et al. Flexible generation of femtosecond cylindrical vector beams (Invited paper)[J]. *Chin Opt Lett*, 2017, 15(3): 030007.
- [6] Zheng S J, Lin X, Huang Z Y, et al. Light field regulation based on polarization holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(11): 220114.
郑淑君, 林杲, 黄志云, 等. 基于偏光全息的光场调控研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(11): 220114.
- [7] Guo Y H, Pu M B, Ma X L, et al. Advances of dispersion-engineered metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, 44(1): 3-22.
郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 等. 电磁超构材料色散调控研究进展[J]. *光电工程*, 2017, 44(1): 3-22.
- [8] Luo X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. *Adv Mater*, 2019, 31(4): 1804680.
- [9] Pu M B, Guo Y H, Li X, et al. Revisitation of extraordinary young's interference: from catenary optical fields to spin-orbit interaction in metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3198-3204.
- [10] Wang D Y, Liu F F, Liu T, et al. Efficient generation of complex vectorial optical fields with metasurfaces[J]. *Light Sci Appl*, 2021, 10(1): 67.
- [11] Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(8): 230117.
柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(8): 230117.
- [12] Fu S Y, Gao C Q. Generation and mode recognition method of vectorial vortex beams[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, 43(15): 1526001.
付时尧, 高春清. 矢量涡旋光束的生成与模式识别方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1526001.
- [13] Brown T G, Zhan Q W. Focus issue: unconventional polarization states of light[J]. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10775-10776.
- [14] Luo X G, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(23): 4780-4782.
- [15] Gao P, Yao N, Wang C T, et al. Enhancing aspect profile of half-pitch 32 nm and 22 nm lithography with plasmonic cavity lens[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106(9): 093110.
- [16] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W, et al. Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3417-3419.
- [17] Hnatovsky C, Shvedov V, Krolikowski W, et al. Revealing local field structure of focused ultrashort pulses[J]. *Phys Rev Lett*,

- 2011, **106**(12): 123901.
- [18] Shen W C, Cheng C W, Yang M C, et al. Fabrication of novel structures on silicon with femtosecond laser pulses[J]. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2010, **5**(3): 229–232.
- [19] Hnatovsky C, Shvedov V G, Shostka N, et al. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(2): 226–228.
- [20] Lou K, Qian S X, Wang X L, et al. Two-dimensional microstructures induced by femtosecond vector light fields on silicon[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(1): 120–127.
- [21] Nivas J J J, He S T, Rubano A, et al. Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q-plate[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 17929.
- [22] Cheng H C, Li P, Liu S, et al. Vortex-controlled morphology conversion of microstructures on silicon induced by femtosecond vector vortex beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **111**(14): 141901.
- [23] Allegre O J, Li Z Q, Li L. Tailored laser vector fields for high-precision micro-manufacturing[J]. *CIRP Ann*, 2019, **68**(1): 193–196.
- [24] Allegre O J, Perrie W, Edwardson S P, et al. Laser microprocessing of steel with radially and azimuthally polarized femtosecond vortex pulses[J]. *J Opt*, 2012, **14**(8): 085601.
- [25] Allegre O J, Jin Y, Perrie W, et al. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(18): 21198–21207.
- [26] Jin Y, Allegre O J, Perrie W, et al. Dynamic modulation of spatially structured polarization fields for real-time control of ultrafast laser-material interactions[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(21): 25333–25343.
- [27] Ouyang J, Perrie W, Allegre O J, et al. Tailored optical vector fields for ultrashort-pulse laser induced complex surface plasmon structuring[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(10): 12562–12572.
- [28] Ghosal A, Allegre O J, Liu Z, et al. Surface engineering with structured femtosecond laser vector fields[J]. *Results Opt*, 2021, **5**: 100179.
- [29] Lou K, Qian S X, Ren Z C, et al. Self-formed two-dimensional near-wavelength microstructures on copper induced by multipulse femtosecond vector optical fields[J]. *J Opt Soc Am B*, 2012, **29**(9): 2282–2287.
- [30] Skoulas E, Manousaki A, Fotakis C, et al. Biomimetic surface structuring using cylindrical vector femtosecond laser beams[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 45114.
- [31] Kawaguchi H, Yasuhara R, Yang H T, et al. Femtosecond vector vortex laser ablation in tungsten: chiral nano-micro texturing and structuring[J]. *Opt Mater Express*, 2024, **14**(2): 424–434.
- [32] Omatsu T, Chujo K, Miyamoto K, et al. Metal microneedle fabrication using twisted light with spin[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(17): 17967–17973.
- [33] Toyoda K, Miyamoto K, Aoki N, et al. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures[J]. *Nano Lett*, 2012, **12**(7): 3645–3649.
- [34] Toyoda K, Takahashi F, Takizawa S, et al. Transfer of light helicity to nanostructures[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**(14): 143603.
- [35] Rahimian M G, Jain A, Larocque H, et al. Spatially controlled nano-structuring of silicon with femtosecond vortex pulses[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 12643.
- [36] Ahmed M A, Voß A, Vogel M M, et al. Radially polarized high-power lasers[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7131**: 713111.
- [37] Kraus M, Ahmed M A, Michalowski A, et al. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(21): 22305–22313.
- [38] Bhuyan M K, Courvoisier F, Lacourt P A, et al. High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97**(8): 081102.
- [39] Bhuyan M K, Velpula P K, Colombier J P, et al. Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser Bessel beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**(2): 021107.
- [40] Rapp L, Meyer R, Giust R, et al. High aspect ratio micro-explosions in the bulk of sapphire generated by femtosecond Bessel beams[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 34286.
- [41] He F, Yu J J, Tan Y X, et al. Tailoring femtosecond 1.5- μm Bessel beams for manufacturing high-aspect-ratio through-silicon vias[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 40785.
- [42] Xie C, Jukna V, Milián C, et al. Tubular filamentation for laser material processing[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 8914.
- [43] Baltrukonis J, Ulčinas O, Orlov S, et al. High-order vector Bessel-gauss beams for laser micromachining of transparent materials[J]. *Phys Rev Appl*, 2021, **16**(3): 034001.
- [44] Belloni V V, Hassan M, Furfaro L, et al. Single shot generation of high-aspect-ratio nano-rods from sapphire by ultrafast first order Bessel beam[J]. *Laser Photonics Rev*, 2024, **18**(3): 2300687.
- [45] Mishchik K, Beuton R, Caulier O D, et al. Improved laser glass cutting by spatio-temporal control of energy deposition using bursts of femtosecond pulses[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(26): 33271–33282.
- [46] Cheng G, Rudenko A, D'Amico C, et al. Embedded nanogratings in bulk fused silica under non-diffractive Bessel ultrafast laser irradiation[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(26): 261901.
- [47] Zhang G, Cheng G, Bhuyan M, et al. Efficient point-by-point Bragg gratings fabricated in embedded laser-written silica waveguides using ultrafast Bessel beams[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(9): 2161–2164.
- [48] Lu J F, Hassan M, Courvoisier F, et al. 3D structured Bessel beam polarization and its application to imprint chiral optical properties in silica[J]. *APL Photonics*, 2023, **8**(6): 060801.
- [49] Zhao M, Wen J, Hu Q, et al. A 3D nanoscale optical disk memory with petabit capacity[J]. *Nature*, 2024, **626**(8000): 772–778.
- [50] Zhang Y J, Bai J P. Improving the recording ability of a near-field optical storage system by higher-order radially polarized beams[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(5): 3698–3706.
- [51] Jiang Y S, Li X P, Gu M. Generation of sub-diffraction-limited pure longitudinal magnetization by the inverse Faraday effect by tightly focusing an azimuthally polarized vortex beam[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(16): 2957–2960.
- [52] Wang S C, Li X P, Zhou J Y, et al. Ultralong pure longitudinal magnetization needle induced by annular vortex binary optics[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(17): 5022–5025.
- [53] Yan W C, Nie Z Q, Zhang X R, et al. Magnetization shaping generated by tight focusing of azimuthally polarized vortex multi-Gaussian beam[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(7): 1940–1946.
- [54] Nie Z Q, Ning Z B, Liu X F, et al. Creating multiple ultra-long longitudinal magnetization textures by strongly focusing azimuthally polarized circular Airy vortex beams[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(12): 19089–19101.
- [55] Liu X F, Yan W C, Liang Y, et al. Twisting polarization-tunable subdiffraction-limited magnetization through vectorial beam coupling[J]. *Adv Photonics Res*, 2022, **3**(1): 2100117.
- [56] Zijlstra P, Chon J W M, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. *Nature*, 2009, **459**(7245): 410–413.
- [57] Gu M, Li X P, Cao Y Y. Optical storage arrays: a perspective

- for future big data storage[J]. *Light Sci Appl*, 2014, **3**(5): e177.
- [58] Li X P, Lan T H, Tien C H, et al. Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**(1): 998
- [59] Xian M C, Xu Y, Ouyang X, et al. Segmented cylindrical vector beams for massively-encoded optical data storage[J]. *Sci Bull*, 2020, **65**(24): 2072–2079
- [60] Berry M V, McDonald K T. Exact and geometrical optics energy trajectories in twisted beams[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2008, **10**(3): 035005.
- [61] Xie C, Giust R, Jukna V, et al. Light trajectory in Bessel-Gauss vortex beams[J]. *J Opt Soc Am A*, 2015, **32**(7): 1313–1316.
- [62] Xiao N, Xie C, Jia E S, et al. Caustic interpretation of the abruptly autofocusing vortex beams[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(13): 19975–19984.
- [63] Xiao N, Xie C, Courvoisier F, et al. Caustics of the axially symmetric vortex beams: analysis and engineering[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(16): 29507–29517.
- [64] Mills B, Kundy D, Farsari M, et al. Single-pulse multiphoton fabrication of high aspect ratio structures with sub-micron features using vortex beams[J]. *Appl Phys A*, 2012, **108**(3): 651–655
- [65] 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]. *J Micromech Microeng*, 2012, **22**(6): 065022
- [66] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Two-photon polymerization of cylinder microstructures by femtosecond Bessel beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **105**(4): 041110
- [67] Yang L, Qian D D, Xin C, et al. Direct laser writing of complex microtubes using femtosecond vortex beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(22): 221103
- [68] Yang L, Qian D D, Xin C, et al. Two-photon polymerization of microstructures by a non-diffraction multifoci pattern generated from a superposed Bessel beam[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(4): 743–746
- [69] Ji S Y, Yang L, Zhang C C, et al. High-aspect-ratio microtubes with variable diameter and uniform wall thickness by compressing Bessel hologram phase depth[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(15): 3514–3517
- [70] Jia E S, Xie C, Xiao N, et al. Two-photon polymerization of femtosecond high-order Bessel beams with aberration correction[J]. *Chin Opt Lett*, 2023, **21**(7): 071203.
- [71] Jia E S, Xie C, Yang Y, et al. Abruptly autofocusing vortex beams for rapid controllable femtosecond two-photon polymerization[J]. *Materials*, 2023, **16**(13): 4625.
- [72] Liu S, Qi S X, Zhang Y, et al. Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(4): 228–233.
- [73] Pan Y, Gao X Z, Zhang G L, et al. Spin angular momentum density and transverse energy flow of tightly focused kaleidoscope-structured vector optical fields[J]. *APL Photonics*, 2019, **4**(9): 096102.
- [74] Lou K, Qian S X, Ren Z C, et al. Femtosecond laser processing by using patterned vector optical fields[J]. *Sci Rep*, 2013, **3**(1): 2281.
- [75] Cai M Q, Tu C H, Zhang H H, et al. Subwavelength multiple focal spots produced by tight focusing the patterned vector optical fields[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(25): 31469–31482.
- [76] Cai M Q, Li P P, Feng D, et al. Microstructures fabricated by dynamically controlled femtosecond patterned vector optical fields[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(7): 1474–1477.
- [77] Cai M Q, Wang Q, Tu C H, et al. Dynamically taming focal fields of femtosecond lasers for fabricating microstructures[J]. *Chin Opt Lett*, 2022, **20**(1): 010502
- [78] Zheng J, Huang J X, Xu S L. Multiscale micro-/nanostructures on single crystalline SiC fabricated by hybridly polarized femtosecond laser[J]. *Opt Lasers Eng*, 2020, **127**: 105940.

作者简介



【通信作者】谢辰(1985-), 男, 博士, 副教授, 过去十余年中在中法两国从事超快激光技术与应用等领域的研究, 主要研究方向为非线性光学、超快光纤激光器、结构光场调控及材料处理等。

E-mail: xie_chen@tju.edu.cn



刘彤炎(2000-), 男, 硕士研究生, 从事超快结构光场产生与微纳加工等研究。

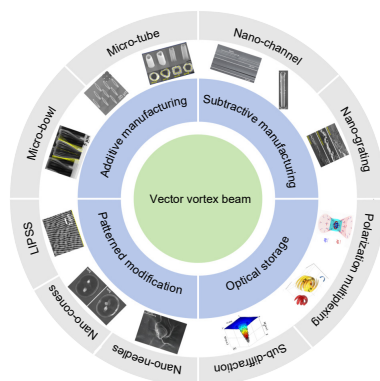
E-mail: liutongyan_0724@tju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining

Xie Chen^{1,2*}, Liu Tongyan¹



Schematic of the advances in this review.

Overview: The optical vortex beams are specially-structured light fields with helical wavefronts expressed as $\exp(im\phi)$, where m represents the topological charge with ϕ defined as the azimuthal angle. Further, the concepts of vector vortex beams are naturally developed with their polarization states varying across the fields. Simultaneously, richer application scenarios are expected from vortex beams due to their phase singularities and additional degrees of freedom in the angular momentum and/or polarization states. This article reviews the major advances in laser material processing with vector vortex beams since the beginning of this century. Typical fabricating schemes for additive, subtractive manufactures and material modifications are summarized. In section 2, the advances in the subtractive and material modifications are categorized into three sub-sections as: microstructure imprinted on the surface, microstructures inscribed inside the material and the applications in the optical storage. As numerous techniques to generate these novel beams were available in 2000s, vector vortex beams were soon applied to imprint laser-induced periodic surface structure (LIPSS) patterns due to the well-known relations of LIPSS with local polarization states of laser beams. In subsection 2.1, we survey the works on LIPSS induced by vector vortex beams on the surfaces of glass, silicon and metals, i.e. three common materials of dielectric, semiconductor and conductor. Commercially available ultrafast Ti:Sapphire lasers delivering femtosecond pulses are mostly employed in these activities due to the possibility to induce multiscale micro/nanostructures. Besides, several works to induce vortex-related microstructures are also included. In subsection 2.2, advances in hole drilling with either expected or unexpected concomitant results by Bessel beams are reviewed. Since applying the novel vector vortex beams in the optical storage is a related cutting-edge topic but still in development, simulations and conception advances in this topic are surveyed in subsection 2.3. Section 3 is devoted to the related works on additive fabrications. The concept and recent advances in optical caustics of vortex beams are briefly introduced in subsection 3.1. Compared with the 3D point-by-point scanning scheme, further applications based on flexibly shaped vortex beams reviewed in subsection 3.2 are presented to significantly accelerate the fabricating speed by more than two orders of magnitudes. Miscellaneous works with other vector beams are introduced in section 4. Finally, we discuss the limitations of the current advances and we envision that the applications of vector vortex beams will be further developed through richer collaborations of professionals in various fields.

Xie C, Liu T Y. Applications of vector vortex beams in laser micro-/nanomachining[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240089; DOI: 10.12086/oe.2024.240089

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62275191, 61605142)

¹Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

* E-mail: xie_chen@tju.edu.cn