

超快激光加工玻璃材料:机理、应用与展望

王心田 宋章宇 秦穆洋 袁昊 卜凡高 龚伟 刘国红 李臻贇 王磊 于颜豪 陈岐岱

Ultrafastlaser processing of glass materials: mechanisms, applications, and prospects

WANG Xin-tian, SONG Zhang-yu, QIN Mu-yang, YUAN Hao, BU Fan-gao, GONG Wei, LIU Guo-hong, LI Zhen-ze, WANG Lei, YU Yan-Hao, CHEN Qi-dai

引用本文:

王心田, 宋章宇, 秦穆洋, 袁昊, 卜凡高, 龚伟, 刘国红, 李臻贇, 王磊, 于颜豪, 陈岐岱. 超快激光加工玻璃材料:机理、应用与展望[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0047

WANG Xin-tian, SONG Zhang-yu, QIN Mu-yang, YUAN Hao, BU Fan-gao, GONG Wei, LIU Guo-hong, LI Zhen-ze, WANG Lei, YU Yan-Hao, CHEN Qi-dai. Ultrafastlaser processing of glass materials: mechanisms, applications, and prospects[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0047

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

垂直端面光波导形状缺陷的激光补偿

Laser compensation of optical waveguide shape defects on vertical end face

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 869 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0220>

角度复用的光学加密超表面的超快激光嵌套加工方法研究

Angle-multiplexed optically encrypted metasurfaces fabricated by ultrafast laser induced spatially selective-modified nanograting structures

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 889 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0228>

具有高防冰性能的飞秒激光加工无涂层超疏水金属表面

High anti-icing performance of coating-free superhydrophobic metal surfaces via femtosecond laser processing

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1506 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0013>

不锈钢表面高质量微陷阱结构的激光辅助水射流加工

Laser-assisted water jet machining of high quality micro-trap structures on stainless steel surfaces

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1476 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0004>

氮化镓光波导的损耗特性分析与工艺优化

Loss characteristics analysis and process optimization of GaN optical waveguide

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 477 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0188>

基于光线场追迹的国产3D可视化衍射光波导仿真模块研究

Domestic 3D visualization diffractive waveguide simulation module based on ray-field tracing

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 756 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0002>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-21

超快激光加工玻璃材料:机理、应用与展望

王心田¹, 宋章宇¹, 秦穆洋¹, 袁昊¹, 卜凡高¹, 龚伟¹, 刘国红²,

李臻³, 王磊¹, 于颜豪^{1*}, 陈岐岱¹

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子全国重点实验室, 吉林 长春 130012;

2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012;

3. 清华大学精仪系, 北京 100080)

摘要:超快激光凭借高峰值功率和超短脉冲宽度,能够通过非线性吸收在透明玻璃内部实现高精度、局域化能量沉积,从而诱导折射率变化、纳米光栅、微空洞等多种微改性结构,并伴随近焦点区域的应力分布调制与元素迁移。这种独特的加工机制为玻璃材料内部三维微纳制造提供了重要基础。本文从超快激光与玻璃材料相互作用机理出发,系统梳理了不同改性类型及其对应工艺窗口,进一步总结了其在片上光子学器件制备、高精度切割、光波导写入、应力波片构筑、微通道加工以及 Burst 模式加工等方面的研究进展。最后,文章分析了当前技术在加工一致性、机理认知和产业化落地方面面临的瓶颈,指出反向工程对于优化工艺设计的重要意义,并展望了人工智能技术在复杂参数寻优与加工智能化中的应用潜力。

关键词:超快激光加工;玻璃材料;光波导;纳米光栅;微器件

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2026-0047 CSTR:32171.14.CO.2026-0047

Ultrafastlaser processing of glass materials: mechanisms, applications, and prospects

WANG Xin-tian¹, SONG Zhang-yu¹, QIN Mu-yang¹, YUAN Hao¹, BU Fan-gao¹, GONG Wei¹,

LIU Guo-hong², LI Zhen-ze³, WANG Lei¹, YU Yan-Hao^{1*}, CHEN Qi-dai¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,

Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

3. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100080, China)

* Corresponding author, E-mail: yanhao_yu@jlu.edu.cn

Abstract: Ultrafast lasers, owing to their high peak power and ultrashort pulse duration, enable highly precise and localized energy deposition inside transparent glass through nonlinear absorption. This process can induce a variety of micro-modifications, including refractive index changes, nan gratings, and microvoids,

收稿日期:2026-03-23; 修订日期:xxxx-xx-xx

基金项目:国家重点研发计划 (No. 2024YFB4505100); 国家自然科学基金 (No. U2541221, No. 62571213, No. 62175086)

Supported by

and is often accompanied by stress-field modulation and elemental migration in the near-focus region. Such a unique processing mechanism provides an important foundation for three-dimensional micro/nanofabrication inside glass materials. Starting from the interaction mechanism between ultrafast lasers and glass, this paper systematically reviews different types of material modification and their corresponding processing windows, and further summarizes recent progress in applications such as on-chip photonic device fabrication, high-precision cutting, optical waveguide writing, stress-based waveplate fabrication, microchannel processing, and burst-mode ultrafast laser machining. Finally, the paper analyzes the current bottlenecks in processing consistency, mechanistic understanding, and industrial implementation, highlights the importance of inverse engineering for process optimization, and discusses the potential of artificial intelligence technique in complex parameter optimization and intelligent laser processing.

Key words: ultrafast laser processing; glass materials; optical waveguides; nanograting; microdevices

1 引言

玻璃材料兼具宽光学透过窗口、优异的化学与热稳定性、可大尺寸成形与低成本等优势,是 21 世纪光子学与集成光学^[1-3]、微流控与生物芯片^[4-5]、精密封装与互连等方向的关键基底材料。然而玻璃材料普遍具有硬脆性,难以依赖传统的机械加工方式实现高深宽比或亚微米级结构加工;同时鉴于其多为宽禁带透明材料,常规激光对其加工面临耦合效率低、热影响区大,损伤区控制难等问题。超快激光(脉宽为几十飞秒到几皮秒级)凭借超高的峰值功率与瞬态非线性吸收,在紧聚焦后能够将玻璃中价带的电子电离,以此为基形成等离子体,进而对后续能量实现吸收与屏蔽,从而在玻璃材料内部或表面可控地诱导不同的亚微米级改性结构^[6]。

随着上世纪 80 年代锁模技术的日渐成熟,超快激光器逐渐可以实现几十飞秒级的稳定脉冲^[7],随后在 90 年代逐渐有学者利用其在玻璃内部制备不同类型的改性结构,这些结构也展现出了不俗潜力^[8-10]。20 世纪 10 年代前后,超快激光加工的结构质量也日益提高,与理论呈螺旋上升的趋势,主流的理论包括光波导和纳米光栅的形成机制已经趋于完善,相应地,其附近的应力调制理论也逐渐成熟。近 10 年来,作为交叉学科的研究热点,Burst 模式的超快激光加工与以卤素玻璃内部钙钛矿晶体直写为代表的飞秒激光晶体直写发生了爆炸式的产出。2025 年左右,随着 AGI(广义人工智能)的问世以及 AI 全方位的发展,飞秒激

光直写技术也有望被人工智能技术赋能,实现新的突破。

为了便于展开飞秒激光和玻璃材料作用的过程、机理与应用,本文沿用在玻璃材料超快激光加工领域学界主流的改性种类^[11]。包括正折射率变化(Type I);以纳米光栅为代表的负折射率变化结构(Type II);微空洞(Type III)和微裂纹(Type IV);以及一些中间态结构,例如介于 Type I 和 Type II 的随机分布微纳米孔(Type X),同时,超快激光同样能导致元素的迁移与晶体析出,利用这些改性成分的微调,飞秒激光直写技术已经有了一系列较为成熟的应用,例如光波导^[12-13],光存储^[14-18],微流控通道^[19-20],超表面^[21-23],相位器件^[24-27]等,图 1 展示了超快激光在玻璃材料中的不同改性类型及对应的应用。

本文以不同改性类型为主线并以此为基础延伸,同时补充了近年的研究热点,旨在揭示超快激光加工玻璃材料领域内研究者对不同的改性类型及其应用、加工方式及机理的认识过程并提出展望,各章节内容如下:第一部分为引言,第二部分介绍超快激光主流改性种类随激光参数的变化,以及超快激光作用于玻璃材料后时间尺度上的机理。第三章介绍了不同改性种类的机理、应用和其加工方法,包括 Type I 型光波导,Type II 型纳米光栅(在此补充 Type X,一种介于前两种改性结构之间的类型),Burst 模式的加工方式,应力波片,微通道的制备以及特殊组分玻璃中的析晶和元素迁移。最后一部分为总结与展望。

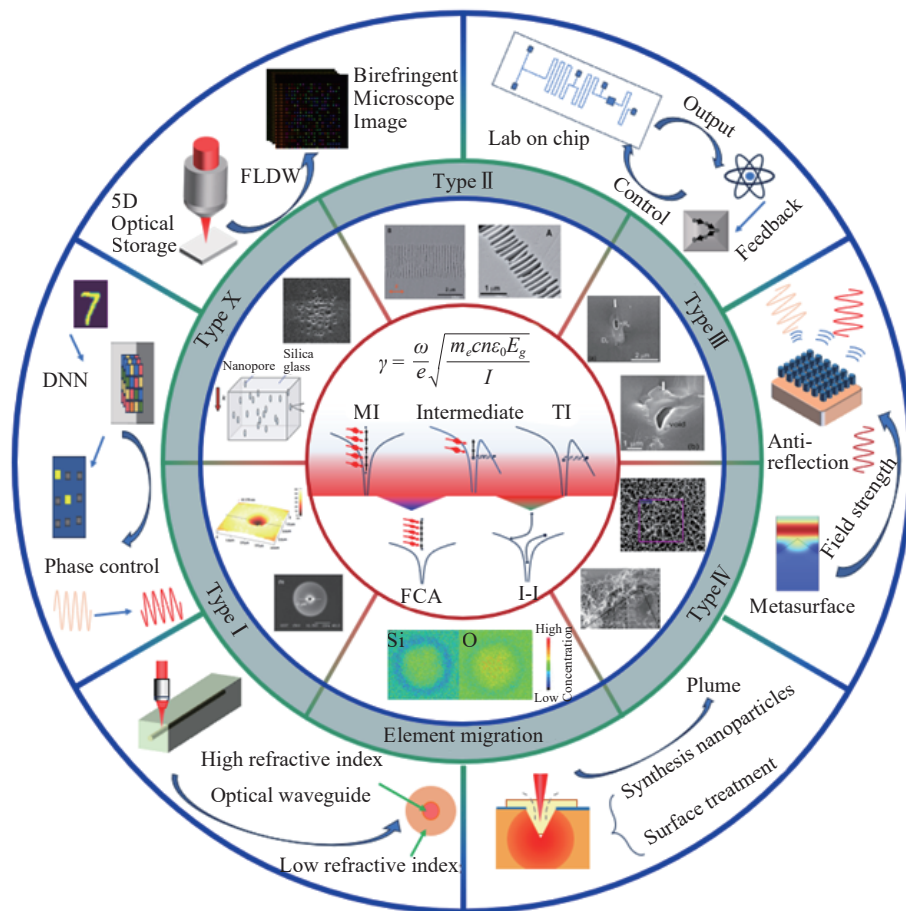


图 1 超快激光在玻璃材料中的电离方式, 各种改性种类的示意图及应用^[31-36]

Fig. 1 Ionization mechanisms of ultrafast lasers in glass materials; schematic illustration of various types of modifications and their applications^[31-36]

2 超快激光改性玻璃的机理

早期的超快激光加工玻璃材料研究通常以熔融石英为材料, 其网络稳定, 杂质含量低, 热膨胀系数小, 化学稳定性强, 同时带隙大, 在近红外几乎无本征线性吸收, 使得能量沉积主要为电子对光子的非线性吸收, 这令其有清晰的损伤阈值和高加工精度, 适合作为超快激光改性的基底, 鉴于熔融石英中超快激光与其作用机理的普适性, 本文的主线将以熔融石英为主要对象展开。随着材料技术的发展, 研究者在石英玻璃中加入金属元素, 例如碱金属元素能够降低 T_g (玻璃化转变温度, 玻璃态进入粘弹性的过冷液体态的一个温度区间), 令玻璃更容易加工成形; 而碱土金属能令玻璃更加稳定, 耐腐蚀; 铝元素能够作为网络形成体提升网络强度, 加强玻璃本身和所加工出结构的稳定性, 如图 2(e) 所示。关于超快激光与硅酸盐玻璃作用导致的元素迁移将在 3.1 章节展开,

而以玻璃中超快激光直写钙钛矿为代表的析晶机理将在 3.6 章节展开。

玻璃中没有大量的自由电子, 因而要通过光致电离激发自由电子, 对于窄带隙材料, 单光子能量足以令价带电子跃迁到导带, 而对于宽禁带材料 (例如熔融石英的 9 eV) 单个光子的能量不足以激发电子跃迁, 此时的自由电子产生方式主要是多光子电离和隧穿电离 (图 2(a) 能级图), 根据 L.V.Keldysh 于 1965 年提出的光致电离理论^[28] 可以通过参数 γ 来对两种电离的发生条件进行区分。参数 $\gamma \ll 1.5$ 时, 隧穿电离 (TI) 占主导, $\gamma \approx 1.5$ 时两种电离方式同时存在, 而在 $\gamma \gg 1.5$ 时, 多光子电离 (MI) 占主导 (图 1 中心圈), 而超快激光加工多数处于这两种情况的混合状态。从激光脉冲开始作用的时间尺度来说, 几十 fs 之后光致电离产生足够载流子, 非线性激发态的电子会通过声子介导的线性吸收进一步吸收能量 (FCA), 直到获得足够动能激发其他价带电子, 此时将发生雪

崩电离 (I-I), 雪崩电离在脉宽 100 fs 以上时开始显著。这些电离方式产生与激光共振的等离子

体, 并对后续脉冲能量产生反射和吸收^[29], 以在玻璃中实现不同类型的改性^[30], 如图 2(b,c,d) 所示。

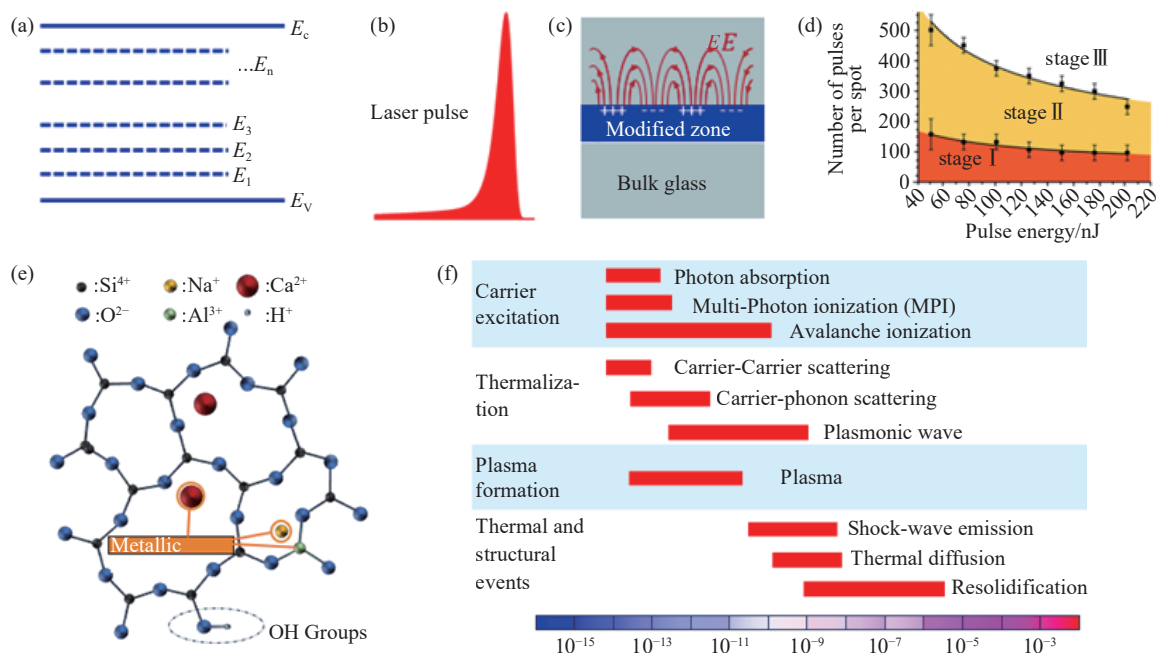


图 2 超快激光与玻璃材料作用机理 (a)玻璃材料的能带(b, c)飞秒激光脉冲及其改性区(d)改性种类随脉冲数及能量的变化^[45](e)硅酸盐玻璃网络结构示意图(f)超快激光脉冲与玻璃材料作用后时间尺度上的现象 Figure 2. Interaction mechanisms between ultrafast lasers and glass materials: (a) energy-band diagram of glass; (b, c) a femtosecond laser pulse and its modified region; (d) evolution of modification types with pulse number and energy^[45]; (e) schematic of the silicate glass network structure; (f) phenomena on different time scales following the interaction of an ultrafast laser pulse with glass.

关于超快激光烧蚀的研究自上世纪就开始, 1995 年, Stuart 等人^[37]用不同脉宽激光进行了熔融石英表面的烧蚀实验, 发现以 20 ps 为分界, 长脉冲对材料的作用倾向于焦耳热扩散主导, 而短脉冲倾向于等离子体导致的一系列非线性效应。图 2(f) 展示了单脉冲下飞秒激光加工中涉及的若干相关物理过程的时间尺度, 在皮秒尺度内, 电子就通过电子-声子耦合将能量传递给晶格, 在几纳秒的时间尺度内, 产生冲击波^[38-40], 而在微秒尺度内产生热扩散, 对于飞秒激光, 其脉宽甚至小于电子-声子散射的时间尺度, 脉冲在热扩散未开始时就已经结束, 因此能够实现冷加工^[41-42], 将热扩散作用最小化, 提供了极高的加工精度。

按激光参数分类, 大致可以将脉宽较短(几十 fs), 能量较小时产生的局部致密化结构归为一类。超快激光导致的快速淬火等效果会令玻璃材料的局部密度增大, 原子之间的极化增强, 同时造成原子级的缺陷, 这种缺陷一般称之为色心, 图 3(b)

展示了石英玻璃中色心的种类。致密化和色心分别通过 Clausius-Mossotti 关系^[43]和 Kramers-Kronig 关系^[44]影响改性区的折射率, 由于这种结构通常导致折射率升高, 因此可以用于制备光波导 (Type I), 如果是硅酸盐玻璃, 其元素迁移还能提供更多的折射率调控可能。随着脉冲能量增大, 脉冲时间变长同时脉冲密度升高, 会形成负折射率的纳米光栅 (Type II), 鉴于其超高的热稳定性和刻蚀选择比等特性, 具有永久光存储, 微通道制备等潜力(两种改性的参数空间之间存在 Type X 改性, 其具有高透过性与双折射特性)。在激光能量增加到一定程度后, 焦点处迅速发生多重电离, 产生接近固体密度的等离子体, 随后冲击波将周围致密化, 而将焦点处抽空形成微空洞 (Type III)^[9, 33]。对于 Type IV 的研究尚且较少, 一般可以认定为是微裂纹, 例如在高频率且能量略大于周期性纳米光栅的条件下扫描产生的网络状结构, 或许能够利用其制备多孔毛细管等。

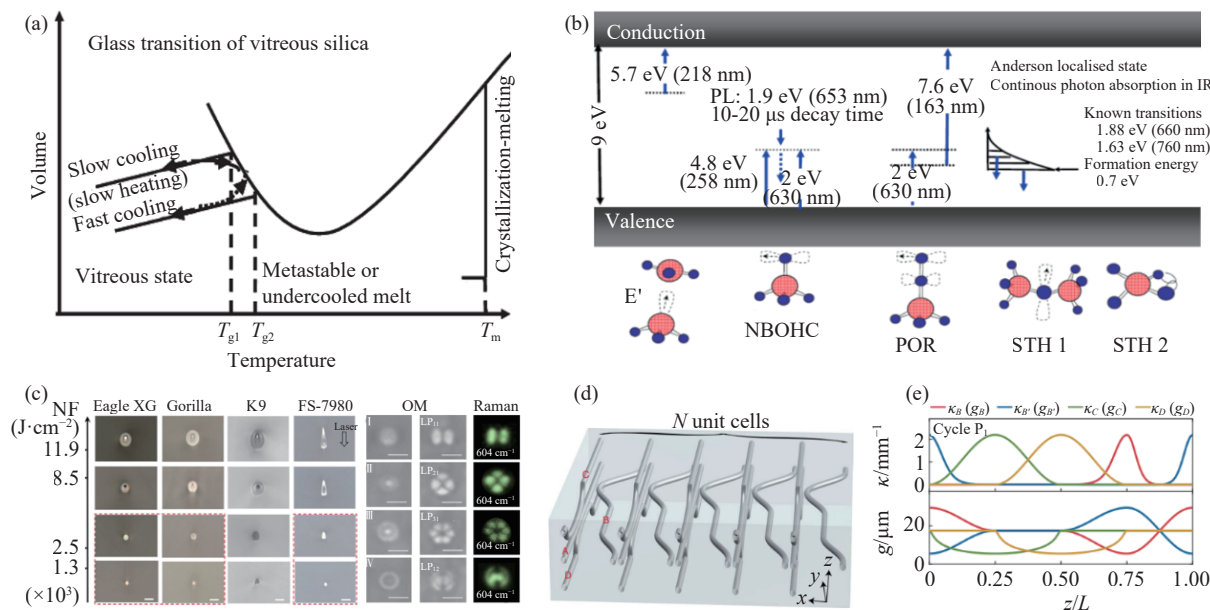


图3 波导折射率变化的机理及样式(a)石英玻璃淬火与密度变化^[65](b)色心的种类^[66](c)各种玻璃中制备的光波导及其端面形貌^[60, 62](d)路径样式可调节的波导及其在拓扑光子学上的应用^[63]

Fig. 3 Mechanisms and profiles of refractive-index modification in waveguides: (a) quenching and density change in silica glass^[65]; (b) types of color centers^[66]; (c) optical waveguides fabricated in various glasses and their end-face morphologies^[60, 62]; (d) waveguides with tunable path geometries and their applications in topological photonic^[63].

3 超快激光与玻璃材料不同改性种类的机理、应用和其加工方法

3.1 Type I(光波导)

光波导是 Type I 类型改性的主要应用出口(表1从时间尺度上展示了人们对超快激光加工玻璃光波导的认知过程),其温和改性窗口相对较小,鉴于近红外激光单光子能量较小,不容易在焦前发生吸收,比较好在透明材料的体内进行可控的改性,因此主流的波导制备手段是用近红外激光进行。1996年, Davis 等人^[8]试图用非紫外波段的激光诱发多光子电离,实现玻璃内部三维光路写入的可能,并在多种玻璃中写入了无色、透明、线性的损伤结构。经微偏偏仪测量后,发现其中产生了折射率改变,改性区折射率变化 Δn 达到了 10^{-2} 足以制备光波导。作者通过 UV 光谱(紫外光谱), ESR(电子自旋共振)等表征手段获取了其色心形成的信息并给出了其折射率改变的猜想:局部融化和快速淬火,局部致密化或是玻璃化学结构的重排。随后,该研究团队又在不同玻璃块体中加工出了三维光波导,成为超快激光加工领域的里程碑^[10]。2002年, Streltsov 等人^[46]系统研究了飞秒激光在玻璃中诱导折射率改变的机

制,通过控制温度否定了高温是折射率变化的主要成因,通过热退火和应力测量得出色心和致密化也并非折射率的主要贡献,因此,作者猜测折射率改变的主要贡献来自一个不同的结构性变化。然而,其对于应力双折射的测量有所局限,如果致密化区域很小,亦或是有周围膨胀区域的影响,那么其测得的宏观应力值就会偏低,从而会低估实际的致密化影响,此外,由于拉曼光谱技术的不成熟,也难以通过此方法表征出改性区密度变化量。2006年, Saliminia 等人^[31]在石英玻璃中获得了超 6×10^{-3} 折射率变化量的改性区并通过多种表征手段强力证明了致密化是飞秒激光在熔融石英中诱导折射率升高的原因——拉曼光谱中显示三元环和四元环结构数量增加,这是致密化的标志。交叉偏振下同样也观察到四叶草状应力图案,直接证明了致密化区域对周围的压缩应力。随着退火温度的逐渐升高,色心在 400°C 时就消失,折射率变化量损失约 10%,而直到升高温度到 800°C 后,致密化结构和折射率的改变量几乎都消失。这也正如目前学界主流观点,致密化为光波导折射率增大的主要贡献,而色心的贡献较小。关于其致密化的成因,2011年, Bressel 等人^[47]在 GeO_2 和 SiO_2SiO_2 玻璃中利用微爆炸挤压周边

材料诱导出致密区域,并重点讨论了密度变化的机制,特别是假设温度在其中扮演的关键角色。鉴于超快激光带来的快速冷却,两种玻璃都在高假设温度下冷却,GeO₂激光改性区的拉曼光谱和静水压致密化的样品变化一致,而SiO₂玻璃中超快激光扫描的结果介于淬火组和压力组。这同样

证明了早在飞秒激光器发明前关于石英玻璃的结论^[48],即其快速淬火反而导致密度升高的特殊性,如图3(a)所示。这也同样适用于硅酸盐玻璃,也为之后利用多种硅酸盐玻璃高效率制备波导提供了事实基础与启发^[49-50]。

表 1 飞秒激光制备光波导的研究历程

Tab. 1 Research progress in femtosecond laser fabrication of optical waveguides.

Material	Year	Refractive index change	Propagation loss dB/cm	New findings	Citation
Germanium-doped silica glass	1996	$\Delta n > 10^{-2}$	—	First demonstration of ultrafast laser-written waveguides in glass	[8]
Corning HPFS; Corning 7890	2002	All on order of 10^{-3}	—	Color center contribution dominates over densification	[46]
Lead silicate; As ₂ S ₃ chalcogenide film	2003	—	—	waveguides in films	[67]
Fused silica	2006	6×10^{-3}	—	Densification dominates the increase in refractive index	[31]
Eu ³⁺ -doped silicate glass	2009	—	—	Element migration by ultrafast laser enables waveguide writing	[36]
BK7	2010	At most 10^{-2}	0.20 dB/cm	Fluence as a key parameter for waveguide writing at high repetition rates	[53]
BK7	2011	3×10^{-4}	0.50 dB/cm	Low-rep-rate pulses write waveguides without thermal accumulation	[49]
Fused silica	2011	—	—	SiO ₂ glass densification dominated by fictive temperature	[47]
Corning 7980	2013	—	—	Annealing reveals the origin of index change in waveguides	[68]
Gorilla	2016	5.7×10^{-3}	—	Near-surface waveguides can be fabricated in Gorilla Glass	[50]
Fused Silica	2016	—	—	Stress-free waveguides (on a macroscopic scale)	[57]
BK7	2018	—	0.06 dB/cm	Multilayer waveguides fabricated by single scan	[58]
Herafil I	2019	1.9×10^{-3}	0.40–0.60 dB/cm	UV laser writing performance was compared with IR lasers	[69]
Silver-containing zinc phosphate glass	2019	2×10^{-3}	≤ 1.20 dB/cm	Near-surface Ag-cluster waveguides were fabricated.	[70]
Corning EAGLE XG	2020	—	0.27 dB/cm	Waveguide insulation via ultrafast laser and wet etching.	[71]
Custom-designed borosilicate glass	2021	2.5×10^{-2}	a few dB/cm	Refractive index controlled by thermophoresis-driven element migration.	[54]
Various silicate glasses	2021	10^{-3} to 10^{-2}	—	Aluminum anchors alkaline earth migration for waveguide formation.	[55]
fused silica, Gorilla Glass, EXG, etc.	2023	—	0.31–0.34 dB/cm	HST (Highly See-Through) low-leakage waveguides	[60]
FS7980, Gorilla Glass, EXG, etc	2024	Precision: 5.6×10^{-5}	0.20 dB/cm	Precise control of waveguide structure using OCMS scanning method.	[62]
Soda-lime silicate glass	2025	—	0.52 dB/cm	Practical applications of sensor fabrication in construction materials.	[72]

同时,关于超快激光影响元素迁移的机理也逐渐被诸多学者所涉猎,这也同样被淬火时间影响。2008年,Miura等人^[51]研究了超快激光脉冲静态照射下合成冕牌玻璃中的元素迁移情况,他们使用离子束干法刻蚀激光改性后的材料并用AFM显微镜(原子力显微镜)揭示了超快激光固定照射后焦点以及附近的密度情况,之后用电子探针微区分析仪分析了玻璃改性区附近Si、O、Na、Ca、Zn、K六种元素的分布。发现中心点密度降低,折射率降低,而周围区域的密度和折射率

升高。在激光焦点处, Si⁴⁺和 O²⁻的浓度相对增加,而网络修饰体离子相对减少,如 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Zn²⁺等。在焦点外围则相反。作者给出的机理解释如下:由于网络修饰体离子的键能较弱且扩散系数更高,在超快激光作用区域的极端高温高压条件下,网络修饰体离子迅速从高温中心向低温外围扩散,这些过程作用之后,经过快速淬火,迁移后的离子冻结,形成最终的结果。此课题组在08年的开创性工作后又对此进行了进一步研究并利用双点照射给出了物理模型,得出定点照射

情况下温度梯度是特定元素分布形成的主要驱动力的结论^[52], 而浓度梯度扩散只会令成分均匀化。关于动态扫描的研究同样进入人们的视野, 早在 2010 年左右, Witcher, Allsop 等人^[49, 53]就尝试使用了不同频率和扫描速度的加工参数在 BK7 玻璃中对波导进行加工, 得出了中心正折射率随着脉冲能量增加的结果, 高能量下, 也随着扫速增大而增加, 这同样与后人的发现所吻合。2020 年, Fernandez 等人^[54]在多种硅酸盐玻璃中利用不同扫速的超快激光进行了实验, 发现只改变扫速就能改变元素迁移的方向——硅酸盐玻璃中, 低扫速下的元素迁移方向和定点照射类似, 导致焦点中心处折射率反而下降, 高扫速下则相反。在其 2021 年的文章中^[55], 同样在硅酸盐玻璃中得到此类结论并重点分析了含铝硅酸盐玻璃中铝的作用, 铝可以与氧结合形成带有负电的 AlO_4^- 四面体, 与金属离子之间有较强的静电相互作用, 因此可以将金属离子锚定, 形成一个高质量的正折射率改变区域。这对于制备高质量波导提供了重要思路。有趣的是, 此课题组于 2025 年^[56]在去除了 LaF_3 的 ZBLAN 玻璃中用低扫速飞秒激光制备出了高折射率波导, 其中的掺杂元素例如 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Ce^{3+} 等向焦点方向迁移, 而钠, 铝等较轻的元素向远离焦点的方向迁移。综上, 当前研究已经足够揭示, 动态扫描下的超快激光能够调控玻璃中的元素迁移行为, 其方向和速率强烈依赖于材料的本征特性。但对于具体元素迁移的方向和速率等尚没有定论, 现有工作本质上仍是对复杂现象的观察与对经典理论的补充。对于元素迁移中超越热机制的可能驱动力尚未有普适的预测模型, 一旦建立此模型, 将把人们的认知从现象的观察上升到机理主导的理性设计, 逆向设计出特定元素分布和光学性能的光波导。

对于波导而言, 其应力的调控同样是重要课题, 2016 年, Bellouard 等人^[57]利用微悬臂梁法表征测量应力, 并尝试了不同脉冲数, 单脉冲能量, 偏振状态下的应力情况, 得出了高拉伸应力下波导传输损失最低的结论。同样, 应力反转点下的器件同样有重大意义, 其低宏观应力(受限于臂梁的测量, 因而局部应力测量精度不足)也对光子电路的大规模集成提供了事实依据——鉴于传统的扫描方法会让应力在前一条线累计并影响相邻的线, 导致折射率不对称。2018 年, Lancaster 等人^[58]

利用单道激光写入在 BK7 玻璃中制备了多环包层和双芯结构的波导, 减少了应力积累。2020 年, Sun 等人^[59]利用半扫描法, 先将间隔较大的线写入, 再将小步距的线写入, 制备出了应力分布更加均匀且折射率更加对称的波导, 且高功率下扫描依然能保持低不对称性。

2023 年, 邱建荣课题组提出了一种冻结冲击波扩散模型^[60], 适用于多种玻璃, 它基于光热激发的熔融液体驻波震荡理论解释波导截面的形态演化, 通过狭缝整形技术制备了全正折射率变化和无裂纹, 孔洞的透明波导, 同时具有工作条件下极低的泄露强度(约为传统波导的三分之一)。2024 年, 该课题组利用柱对称涡旋激光束(其具有完美的旋转不变性)实现了任意弯曲^[61], 大深度变化下低损耗且保型的三维光子电路; 同年, 该课题组又使用了全新的 OCMS(Overlap-Controlled Multi-Scan)技术, 将单个扫描线的尺寸控制在 800nm, 线间距 50nm, 实现了对折射率剖面的精确控制, 并制备出不同重叠形状的圆形波导^[62], 此课题组将超快激光制备波导的性能提升一大截, 图 3(c)展示了其课题组制备的多种波导。

超快激光直写能够在玻璃体内制备出精确编程耦合的波导网络, 为光子电路提供可调节的幺正矩阵功能模块, 2022 年, Sun 等人^[63]在 E2K(Corning Eagle 2000)玻璃中制备出 Lieb 波导晶格并在其中利用简并平带实现了输出随泵浦序列成非对易变化的非阿贝尔 Thouless 泵浦, 如图 3(d,e)所示。同年, Zhang 等人^[64]利用同种玻璃中制备的借助手性对称保护的简并零模实现了非阿贝尔编织与可组合门操作, 展示了顺序敏感的模式计算, 为片上光信息处理和量子兼容电路奠定基础, 此类非阿贝尔相-幺正变换器件有望与各种调控手段结合(例如应力, 热光, 电光等), 实现更具灵活性的可编程非阿贝尔操作模块, 将其扩展到更大规模的多模干涉网络, 面向高维量子态操控、鲁棒片上路由与新型拓扑光子器件等。

3.2 Type II (纳米光栅)

自研究者们成功利用超快激光在玻璃中写入光波导后, 高频激光下产生的周期性双折射结构同样被人发现并深入研究, 随后被命名为纳米光栅, 关于人们对纳米光栅的认识过程如图 2 所示, 其形貌如图 4(a)所示。

表 2 研究者对纳米光栅的认知与应用

Tab. 2 Researchers' understanding and applications of nanograting.

Material	Year	Refractive index change	Birefringence change	Retardance/nm	New findings	Citation
germanium-doped glass	1999	—	—	—	Enhanced anisotropic scattering in the polarization plane.	[73]
ED-H synthetic silica	2003	—	—	—	plasma wave interference model	[74]
Fused silica	2005	—	—	—	Polarization-dependent wet etching rate of nanogratings.	[83]
Fused silica	2006	—	—	—	nanoplasmonic model	[75]
Suprasil-II	2008	up to -0.45 locally	6.5×10^{-3}	—	Increasing pulse number and energy transforms rewritable nanogratings into nanocracks	[34]
VIOSIL fused silica	2009	—	—	—	KOH shows higher selectivity and lower taper than HF.	[84]
Fused silica	2012	—	—	—	Strong birefringence originates from gaseous voids	[76]
Corning 7980	2012	—	4×10^{-6} (stress)	—	Nanograting configuration tunes stress birefringence	[85]
Fused silica	2013	-0.2 (locally)	10^{-2}	—	Oxygen-filled voids are reversible only at ultra-high temperatures	[77]
Corning 7980	2013	—	—	—	The macroscopic stress of nanogratings depends on their orientation	[86]
Fused silica	2014	-0.2 (locally) (cited)	—	10^2 nm	High thermal stability of nanogratings enables permanent optical storage	[87]
VIOSIL fused silica	2020	Nearly unchanged	6×10^{-4}	—	Type X nanopores offer high transmittance and birefringence	[32]
Corning 7980	2021	—	0.8×10^{-3}	—	Near-field-induced nanoplatelets with fast writing and high transmittance	[80]
Corning 7980 0F	2021	—	—	—	Etchant-dependent etching of non-nanograting structures	[88]
Suprasil CG	2023	—	2.1 rad(CB)	—	Pure stress waveplate with controllable circular birefringence	[89]
Corning 7980	2024	approximately -0.08 (seed structure)	—	—	Backscattering-interference crawling enables high-aspect cutting via near-field enhancement	[82]

1999 年, Peter 等人^[73]将飞秒激光紧聚焦到掺锗石英玻璃中并用半波片控制激光的线偏振方向。研究者在利用显微镜表征时发现了探测激光被沿着偏振方向拉长,呈螺旋桨型。作者结合衍射光学理论,估计出导致散射的各向异性结构的特征尺寸约为 90 nm。2003 年, Shimotsuma 等人^[74]在石英玻璃中利用飞秒激光扫描并得到了周期性条纹结构。BEI 图像显示其结构宽度约为 20 nm 且结构垂直于偏振方向,改性区域氧信号减弱。他们为解释结构的产生提出了等离子体波干涉模型,认为周期性结构是入射光场和等离子体波的电场发生干涉导致的。2006 年, Bhardwaj 等人^[75]从能量预算的角度质疑了 Shimotsuma 的结论并对纳米光栅的侧面进行了表征,提出了纳米等离子体生长模型——激光通过非线性电离形成球状纳米等离子体,之后在垂直于激光偏振方向的平面上优先生长,演化为椭球形等离子体,椭球等离子体盘边缘的场增强令其合并形成连续的纳米平面。当纳米平面的电子密度超过了临界值,就形成类似金属的结构,其周期被物理限制于 $\lambda/2n$,而纳米光栅周期与激光波长无关。2008

年, Taylor 等人^[34]再次验证了此机理,同时为纳米光栅提出了多种应用出口,包括微流体通道,永久光存储等。并发现当能量和脉冲密度大到一定程度的时候,会形成高深宽比的纳米裂纹,可以用于多孔毛细管 (Type IV)。2012 年, Richter 等人^[76]使用了 SAXS (小角 X 射线散射) 进行表征,并用 FIB (聚焦离子束) 铣削结合 SEM (扫描电子显微镜) 成像精确地重建了纳米光栅的形貌,它由周期性排列的、中空的片状纳米空腔组成,空腔尺寸在前 100 个脉冲沿着激光垂直偏振方向迅速生长,之后,单个空腔尺寸不再变化而空腔总数量增加,形成纳米平面。这个研究揭示了纳米光栅形状双折射的来源和各向异性刻蚀的原因:空腔和玻璃基质巨大的折射率差形成了强烈的形状双折射,而刻蚀剂可以轻易且快速地进入中空空腔中,导致沿着光栅平面方向的刻蚀速率远高于垂直方向。2013 年, Lancry 等人^[77]在此基础上补充了纳米光栅形成的机理,他们用了—个详细的物理化学模型来解释为何飞秒量级时间内会发生高温下很长时间才能发生的 SiO_2 分解反应,在超高温度的飞秒激光作用区内,氧原子被高度

电离, 带正电的氧离子被库仑斥力排除, 弛豫后形成氧分子。局部改性区域因氧的流失而变成非化学计量比的 SiO_{2-x} , 形成张应力区域, 最终形成纳米空腔。这也解释了其高热稳定性的来源——此多孔结构由断键和氧原子的弛豫形成, 其逆向反应需要 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上退火数小时才能发生, 这也

进一步证实了纳米光栅对 Taylor 等人提出的应用的适用性。这些研究中均体现了纳米光栅的本质是其中抽离出纳米空洞, 也印证了知名的 Springer Handbook of Glass 中的结论^[78], 如图 4(f), 即石英玻璃在各种玻璃中密度改变的能力是最强的。

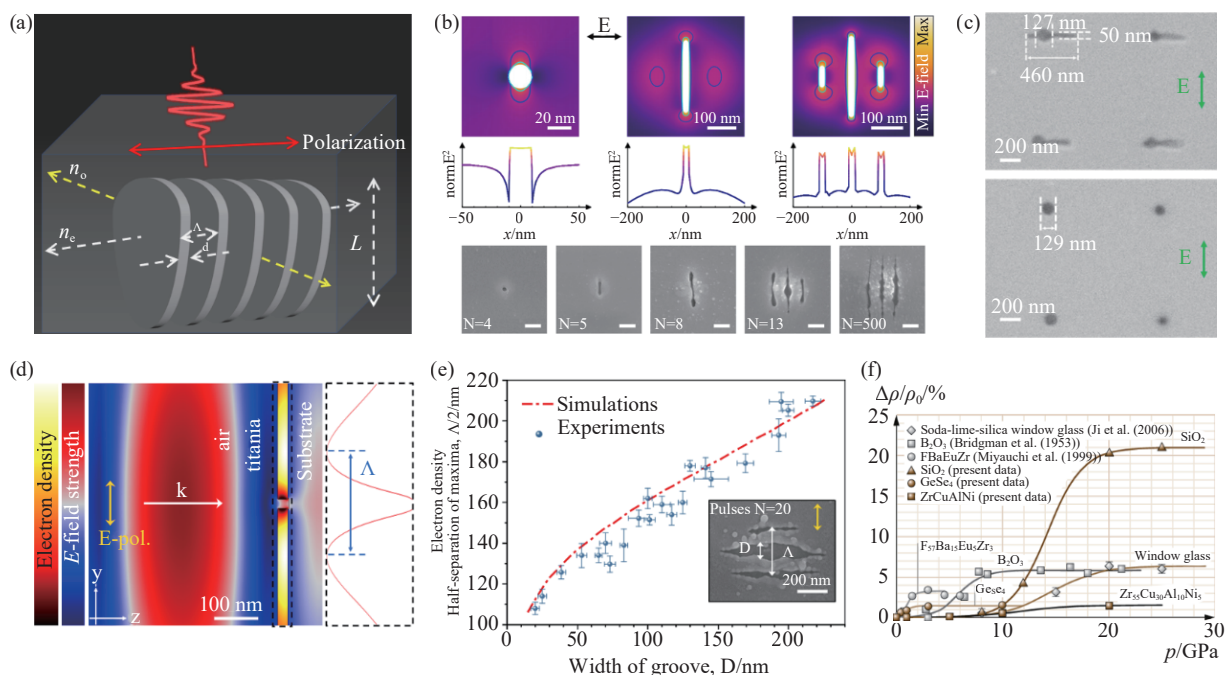


图 4 纳米光栅的形貌及形成机理 (a) 纳米光栅形貌示意图 (b) 材料表面形成的周期性结构, 能够解释纳米光栅的形成^[81] (c) 利用微爆炸形成种子结构后利用近场增强生长出的纳米片层^[80] (d, e) 已有结构对后续光强主极大的产生^[79] (f) 各种玻璃密度变化的能力^[78]

Fig. 4 Morphology and formation mechanism of nanogratings: (a) schematic illustration of the nanograting morphology; (b) periodic surface structures formed on the material surface, which can account for nanograting formation^[81]; (c) nano-scale lamellae grown via near-field-enhanced growth after seed structures are created by micro-explosions^[80]; (d, e) influence of pre-existing structures on the generation of subsequent principal light-intensity maxima^[79]; (f) capability of various glasses to undergo density change^[78].

关于纳米光栅的研究在 2010 年前后爆发式增长, 随后进展略显疲软。直到 2020 s 初, Wang 课题组在研究超衍射极限的减材加工时发现并系统研究了光学 OFIB(远场诱导近场增强)效应, 这或许能够解释纳米光栅的形成。2021 年, Li 等人^[79] 在二氧化钛表面进行了一系列实验, 在材料表面产生微改性区后对其附近的后续电场分布进行研究, 通过求解 Lippmann-Schwinger 方程, 在后续脉冲作用时将激光改性的小孔近似成一个电偶极子。他们发现在孔的特征尺寸远小于波长时, 中间场和远场项因所在级数幂次更高可以忽略不计。在后续脉冲沿着偏振方向移动时, 后续

烧蚀结构与先前结构存在最小间距(约几十 nm); 而垂直偏振方向移动时, 将产生连续的烧蚀增强且改性区线宽极窄, 达到 20 nm, 如图 4(d, e) 所示。Li 等人利用偶极子模型和电位移矢量的边界条件, 通过分析后续入射光本身和其与微改性结构产生的散射场首次解释了这个令人困扰多年的现象, 同时为在材料内/外部制备数十纳米级的微结构提供了理论和实践基础。同年, Lei 等人^[80] 也利用了这个特性在石英玻璃体内加工出了类似纳米光栅的纳米片层(先通过微爆炸形成种子结构, 再通过近场增强利用低能量脉冲引诱其生长), 如图 4(c) 所示。这种利用先前改性结构

对后续脉冲产生的近场增强所制备出的纳米结构比纳米光栅有更高的透过率,且制备效率更高。2023年,Xu等人^[81]在 TiO_2 表面通过定点多脉冲照射制备了LIPSS(激光诱导表面周期性结构)结构,传统的LIPSS结构往往通过长程电磁模型解释(例如表面电磁波、表面等离子体激元等)能量沉积的周期性。而通过Li等人的结论,可以给出一种不必调用长程模式就可以与实验定量吻合的形成机制(图4(b)):在LIPSS结构形成的初始阶段,通过垂直于偏振方向的连续近场增强将微孔拉伸成纳米沟槽,纳米沟槽对后续能量进行重新分布,在距离主沟槽 $\lambda/2n$ 处形成新的主极大,新的纳米孔同样拉长,以此循环。 $\lambda/2n$ 这个干涉驻波周期不仅是表面LIPSS结构形成的周期,同样也和2006年Bhardwaj等人的纳米光栅形成周期相相应。2024年,Li等人^[82]将此机制利用到极致,在透明材料内部加工出种子结构,同样地,利用散射场和入射场干涉的驻波点位仍为距先前结构 $\lambda/2n$,他们利用背散射干涉攀爬技术实现了线宽最低15 nm,粗糙度7 nm的超隐形切割。

2020年,Sakakura等人报道了一种随机分布的纳米孔并命名为Type X,相比纳米光栅(纳米光栅透过率为70%左右),具有极低的散射损耗,在可见光范围透射率达到99%,而在0到330 nm的紫外光范围也能达到90%。根据他们的实验,此结构的形成对激光脉宽和脉冲数敏感,当脉宽小于250 fs时,整体倾向Type I型改性,而在脉宽大于400 fs时,透射损耗增大,将形成Type II结构。同样地,在脉冲数从120增大到150时,纳米孔的密度逐渐增大且孔在垂直于偏振方向被拉长,而增大到200时,纳米孔形貌开始发生变化,逐渐形成纳米平面并向纳米光栅结构演变,这在机理上与Ritcher等人于2012年的发现所吻合,同样形成了统一。在2020年发表的文章中,Sakakura等人同样基于其高透过率和双折射效应制备了可以实现高透过性的几何相位器件,实现了对光场偏振的控制。这些特性同样令Type X结构适用于多层的永久光存储。

3.3 Burst模式的加工

2003年,Peter R. Herman等人^[90]首次提出利

用Burst模式的超快激光进行加工,旨在使上一个脉冲的热效应尚未完全弛豫前就将预热好的材料呈现给下一个脉冲,以降低材料烧蚀阈值,提高材料韧性,缓解加工区域的应力以及提升烧蚀效率。同时,脉冲间隔也刚好能避免强等离子体的屏蔽(数十ps数量级)。2016年,受航天器的烧蚀冷却技术启发,C.Kerse等人^[91]利用GHz Burst进行了生物组织的表面烧蚀(牙本质,脑组织),研究者们利用其极高重复频率,通过脉冲间热积累逐步升温至材料烧蚀点,当烧蚀发生时使其热能也随着后续脉冲被带走,从而降低内部材料温度(相比KHz级别超快激光脉冲),如图5(a),在多种材料上实现了效率数倍于低频脉冲的烧蚀加工并产生极小的热损伤。2021年,Lei等人^[80]利用Burst模式的激光脉冲结合能量调制(PEM)方法在7980石英玻璃中实现了层状纳米片层的快速制备。研究者们先用较大的能量引发微爆炸,形成微纳米孔,再用高频Burst结合纳米孔附近的近场增强效果引导其生成高透过率的纳米片层。成功将改性区理论温度从21000 K降低到1200 K以下,并实现了高达 10^6 voxels/s的永久光存储写入速率,如图5(b,c)所示。2024年,Wang等人^[92]研究了纳米光栅(Type II)和各向异性纳米孔(Type X)结构的相位延迟量随扫描速度的变化趋势,发现Type X在脉冲频率恒定的条件下,相位延迟量随着扫描速度的增大先增加后减小,如图5(e),而在单脉冲参数相等时只与每个脉冲的时间间隔有关,对此,研究者们猜测在静态写入时激光会在辐照点处激发载流子,电子向边缘扩散后形成中心指向边缘的电场,进而对后续照射在相同位置的脉冲形成负反馈,在扫描状态下,新激发区域中心和之前的电场中心不重合,因此受到前序电场的阻碍大大削弱,如图5(d)。对载流子浓度扩散方程和电场方程进行的求解同样证实了这点,在脉冲间扫描长度近乎一个焦点几何尺寸时空间直流电场强度达到峰值且自陷态空穴浓度得到显著增加(约40%),这为使用Burst模式快速制备高性能光存储系统提供了理论支撑,随后仿照Lei等人的方法,用更高的频率和扫速实现了高质量的Type X阵列加工,如图5(f)。

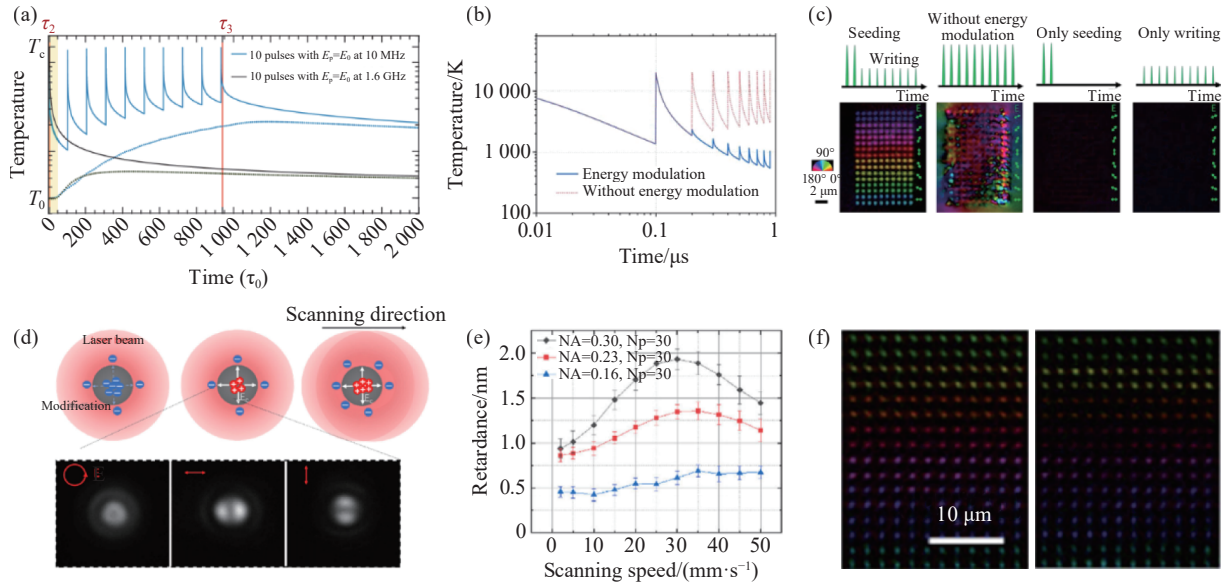


图5 Burst模式的低热效应和加工效果(a, b) Burst模式的低热效应^[80, 91](c) Burst模式下制备近似纳米光栅结构的性能^[80](d, e) Burst模式下, 定脉冲频率不同扫速下解释结构相位延迟量的物理模型及其定量关系^[92](f) 能量调制后的Burst在高扫速下制备结构的优秀效果^[92]

Fig. 5 Low thermal effects and processing performance in burst mode: (a, b) low thermal effects in burst mode^[80, 91]; (c) performance of fabricating quasi-nanograting structures under burst-mode irradiation^[80]; (d, e) physical model explaining the structural retardance and its quantitative relationship as a function of scanning speed at a fixed repetition rate in burst mode^[92]; (f) excellent results of structure fabrication at high scanning speeds using burst mode with energy modulation^[92].

关于 Burst 模式, 除了对于上述极端精加工, GHz Burst 还同样可以调控羽流来实现高质量的玻璃打孔。关于超快激光诱导产生的羽流, 目前人们对其成分和产生机理的研究尚且比较空缺, 只是已知长脉冲激光作用产生的羽流为高电离程度的等离子体, 而超快激光作用产生的羽流为中性粒子及其团簇, 液滴等混合物^[93-94]。尽管关于羽流的机理尚不明朗, 近年依然有学者利用 GHz Burst 结合羽流, 试图对玻璃材料进行高质量的烧蚀。2022 年, John Lopez 等人^[95]对比了单脉冲模式和 Burst 模式在多种玻璃中加工的效果, 用红外摄像机表征玻璃温度, 证实了 GHz Burst 模式是利用热积累过程实现的材料烧蚀, 同时材料以不连续, 一团团的形式喷射, 在烧蚀过程中, 没有在材料中观察到瞬态裂纹和冲击波, 得到了高深宽比, 圆柱形, 内壁光滑的高质量孔。相比之下, 单脉冲模式只能产生锥形, 内壁粗糙的孔。该研究为高深宽比高质量微孔的制备开辟了新道路。2023 年, Pierre Balage 等人^[96]将 Burst 钻孔的过程分为三段: 表面烧蚀、受限烧蚀和烧蚀终止, 在表面烧蚀的时候, 羽流自由膨胀, 烧蚀速率快, 而

在孔内受限烧蚀时, 烧蚀速率减慢, 最终钻孔深度饱和, 研究者分别尝试了脉冲串的不同形状, 包括递增, 递减, 平坦形状, 发现平坦形状是钻孔的最佳选择(质量与深度的平衡), 而递增 Burst 的形状能够给材料起到预热功能, 虽然钻孔饱和深度不如平坦形, 但侧壁更加光滑。2025 年, 该课题组又使用 Burst 对不同玻璃进行了钻孔实验^[97], 与之前的研究不同的是, 研究者用泵浦-探测系统捕捉了不同脉冲模式下的羽流发光时间, 发现在 GHz Burst 下, 羽流存在时间达到 17.2 微秒, 比单脉冲和 MHz 模式的 12 微秒左右显著延长且消除了后两者的侧壁损伤。用倾斜样品进行不同深度的钻孔后, 发现在完全击穿材料后羽流顺势消失, 留下了孔径更小的出口, 该实验现象表明羽流本身实际上承担了高质量烧蚀的功能, 而机理尚不明朗, 此方面的机理若得到解释将进一步拓宽 Burst 超快激光的应用范围。

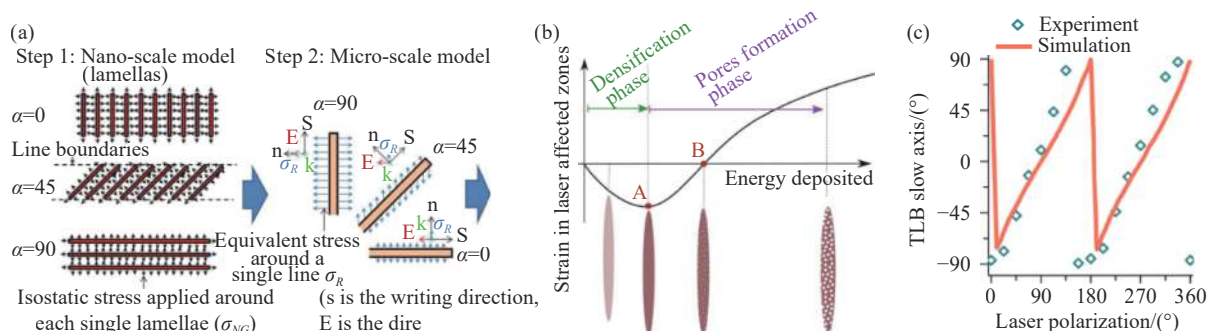
3.4 应力双折射

出于对器件性能的需求, 关于超快激光改性结构附近的应力在 20 多年前就开始被研究, 2004 年, Bhardwaj 等人^[98]在熔融石英中写入了波

导,并发现在其中存在两种主要的应力状态——引起双折射的面内应力和应力集中,前者是高写入通量下应力双折射的产生主因,后者是低写入通量下波导损耗的主因,他们通过在 570 °C 下退火 1 h,将两种情况下的损耗减小约 50%,在高通量下的双折射减小到原来的四分之一,并认定残留的双折射是波导结构的非对称性导致的。他们同样展望了将双折射结构区域作为包层或是利用结构产生的双折射制备波片等器件。2012 年, Fernandes 等人^[85]在波导附近写入了垂直和水平构型的应力条带,发现水平构型的条带可以增大其之间波导的双折射,而垂直构型反之,通过调节写入应力条的能量和相对波导的位置能够实现其双折射的主动调控。

2013 年开始, Bellouard 课题组关于超快激光加工玻璃材料的应力分布进行了大量研究, Audrey Champion 等人^[86]在固定偏振的条件下通过控制不同扫描方向得到不同的纳米光栅改性区,构成太阳形放射状分布的应力条,如图 6(a),巧妙地避开形状双折射,并利用应力条间的双折射强度反推出应力,发现偏振方向固定时,不同取向的纳米光栅应力差达到 30% 到 50%,且应力来自纳米光栅层的局部膨胀,当应力超过阈值时会发生结构崩塌。2016 年,该课题组又在熔融石英中写入了不同应力条带并测量其中心未改性区的双折射相位延迟量^[99],定量研究了固定脉冲能量下 (250 nJ),存在最佳能量沉积密度 (20 J/mm²),超过此值可能反而导致应力松弛,研究者们最优条件下 (5 微米间距, 128 个应力条) 实现了未改性区中心高达 55 nm 的相位延迟。同年,该课题组控制改性区的激光通量并用微悬臂梁测量法表征微应力,旨在获得低应力、低损耗的光波导,在密度增大的改性区 (Type I 改

性区),表现为拉伸应力,而在纳米光栅改性区 (Type II),表现为压缩应力。当通量达到某一极限值时,其拉伸应力减小,在此点处波导获得最高传输效率。随后继续增大通量,于应力反转点处,其宏观的净体积为 0,且波导的导光性能也未受太大影响,如图 6(b)所示。经 SEM 观察,此时改性区的形貌为致密化区域和纳米孔的叠加,激光通量的继续增大将促进纳米孔——致密化混合区域向纳米光栅转化,此研究提出了零应力波导的概念并从实验上验证了其可行性,将对集成光子器件有重大意义。2023 年, Lancry 课题组^[89]在熔融石英中写入纳米光栅后,发现样品对左/右旋圆偏振光出现了不同相位与吸收响应, (即具有圆双折射和圆二色性),推断其外禀手性至少由两部分各向异性组成,分别来自纳米光栅的形状双折射和改性区附近体积变化导致的应力双折射,随能量增加,应力双折射所占比例能达到总双折射量的 5% 到 30%。经一系列实验证明,应力双折射的轴向与写入偏振无关,仅与扫描几何相关,且只有幅值上约 20% 的扰动。这与 Bellouard 课题组的发现相照应。同时,在单层纳米光栅层和单层应力条层的组合下,能够通过控制纳米光栅写入的偏振方向调控总双折射的轴向。研究者们同样发现,在两层双折射结构轴夹角为 $\pm 45^\circ$ 度时, CB (圆双折射) 最强,借此可以做出具有旋光性能的波片,双层纳米光栅的旋光量可以达到 -2.5 rad,而双层应力波片可以达到 -2.1 rad。热退火实验显示,在 800 °C 以上,应力双折射和其旋光性才下降 (1000 °C 以上纳米光栅消退),制备的双层应力波片在旋光性能上与纳米光栅波片相近且性质稳定,透过率高。这是首次制备性能可控,优秀的应力旋光器件,如图 6(c-f)。



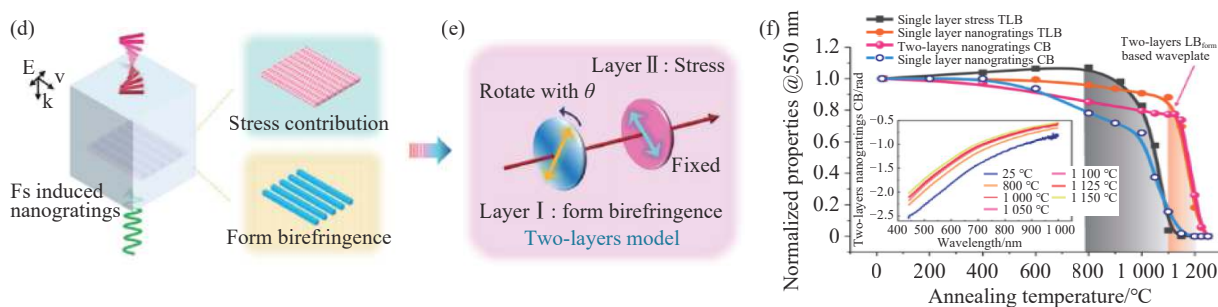


图6 应力双折射 (a) 纳米光栅阵列的应力产生及其双折射现象^[86] (b) 不同沉积能量下结构的应力情况^[57] (c) 纳米光栅的总双折射随激光偏振方向变化的周期性, 体现其可控性^[89] (d、e) 纳米光栅的双折射模型, 分为应力层和形状层^[89] (f) 纳米光栅层波片和应力层波片的热稳定性^[89]

Fig. 6 Stress-induced birefringence: (a) stress generation and birefringence in nanograting arrays^[86]; (b) stress states of the structures at different deposited energies^[57]; (c) periodic dependence of the total birefringence of nanogratings on the laser polarization direction, demonstrating its tunability^[89]; (d, e) birefringence model of nanogratings, consisting of a stress layer and a form-birefringence layer^[89]; (f) thermal stability of waveplates based on the nanograting layer and the stress-layer waveplate^[89].

3.5 微流控通道

2001 年, Saulius 等人^[100] 在干石英玻璃中利用微爆炸制备了 Type I 包围着 Type III 的结构并用氢氟酸刻蚀, 制备出了深约 120 微米, 深宽比约 10 比 1 的结构, 然而, 这个改性方式并非主流高效——它利用毛细现象将刻蚀液引入 Type III 改性区, 再对周围 Type I 的致密化区域进行刻蚀, Type I 改性区三、四元环结构增多, 更容易被刻蚀液腐蚀, 从而反应更快, 然而, 利用 Type III 产生的致密化结构注定较为粗糙。从现在的视角看, Saulius 等人的制备方法虽然不是主流, 但也为后人提出了超快激光改性结合湿法刻蚀的新路径。2004 年, Said 等人^[101] 在熔融石英的块体中利用 2 到 4 微米的间距进行密集扫线, 制备出了深度达到毫米级的孔结构, 且在此情况下侧壁粗糙度仅为 0.25 到 0.5 微米, 尽管制备的微通道在当时看来质量相当高, 但其忽略了纳米光栅结构的贡献, 只是单纯地认为高刻蚀选择比来自于材料的致密化。2005 年, Hnatovsky 等人^[83] 在熔融石英中进行了一系列实验, 发现了其中 Type II 改性部位的选择性刻蚀情况: 当激光偏振方向垂直于扫描方向时, 刻蚀速率最高, 而平行偏振时刻蚀速率最低, 通过 SEM 表征后容易看出, 纳米光栅的生长方向垂直于偏振方向, 整体的改性结构也有所不同, 垂直偏振的纳米光栅之间没有间隙, 而是重合, 刻蚀液更容易渗入改性区, 如图 7(a) 所示, 因此其刻蚀选择比远高于平行

偏振。2009 年, Satoshi Kiyama 等人^[84] 对比了 HF 和 KOH 的刻蚀速率和性能, 发现 KOH 刻蚀在进行到深处时仍有优秀的刻蚀选择比, 且刻蚀的锥度更低。除了优异的性能, 碱性刻蚀液同样因其更加安全环保而被广泛应用。自纳米光栅被发现之后, 主流就是利用其更容易被刻蚀液渗入的特点对改性区刻蚀, 形成微结构, 然而, 随着精加工的需求越来越高, 依赖于纳米光栅的刻蚀很难做到亚微米级别, 侧壁粗糙度也很难达到百纳米级以下, 为此, 近年学者们主要聚焦于低激光通量下的改性结合湿法刻蚀。2021 年, Enrico Casamenti 等人^[88] 在 7980 石英玻璃中通过控制脉冲能量的方式使用不同的激光通量进行改性, 经不同温度的热退火处理后用不同的刻蚀液进行刻蚀, 旨在探究刻蚀速率对纳米光栅之外的改性结构的依赖性。根据前人的研究, 产生纯纳米光栅改性几乎是不可能的, 自激光从低能量通量开始, 会先产生一些结构缺陷, 例如色心, 而随着能量通量的增加, 接着会产生纳米多孔结构, 最后形成纳米光栅, 这些结构的热稳定性也依次上升, 色心在 500 °C 就几乎消除殆尽, 而纳米孔在 900 °C 才能消除的比较干净。根据一系列热退火实验, 研究者发现, 仅仅 500 °C 的热退火就将 KOH 和 NaOH 的刻蚀速率相比原始速率减慢大半, 而直到退火温度升高到 900 °C, HF 的刻蚀速率才显著下降, 即 NaOH 与 KOH 在除了纳米光栅的情况下, 更依赖缺陷进行刻蚀, 而 HF

更依赖于纳米空洞,如图 7(b-d) 所示。同时,低激光通量下的刻蚀对偏振依赖性更低,这也为制备微通道提供了更多的可能。2023 年, Mario Ochoa 等人^[102]通过控制脉冲数的方式,也证实了低通量改性下刻蚀的低偏振选择性与高精度

(图 7(e))。近几年,同样有大量学者对刻蚀参数进行了实验研究,例如刻蚀液的浓度,刻蚀温度等,然而结合具体加工的参数,其参数空间过于巨大,因此没有在此展开的必要,具体研究时应在实验中尝试。

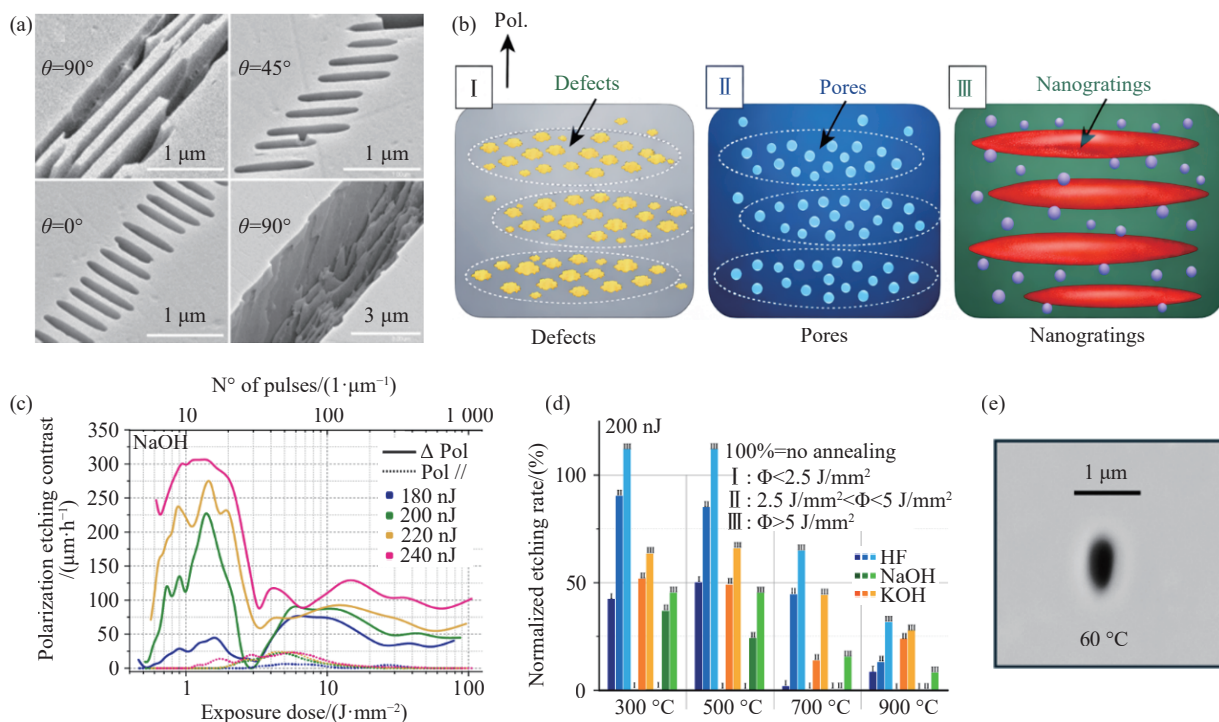


图 7 超快激光改性与湿法刻蚀结合 (a) 纳米光栅的辅助刻蚀^[83] (b、c) 不同激光通量下石英玻璃中的不同改性种类与刻蚀偏振依赖性^[88] (d) 热退火对改性区刻蚀速率的影响^[88] (e) 多种改性结构混合区的加工精度展示^[103]

Fig. 7 Combination of ultrafast laser modification and wet etching: (a) nanograting-assisted etching^[83]; (b, c) different modification types in fused silica at different laser fluences and the corresponding selective etching ratios^[88]; (d) effect of thermal annealing on the etching rate of the modified regions^[88]; (e) demonstration of machining precision in mixed regions containing multiple modified structures^[103].

3.6 析晶与元素迁移

近年来,金属卤化物钙钛矿有着突出的光电性能,超快激光在特殊组分玻璃中诱导形成钙钛矿纳米晶的过程同样成为研究热点,2020 年,邱建荣课题组^[104]利用飞秒激光在配制好的含 Cs/Pb 和卤族元素(溴和氯)的硼硅酸盐玻璃中扫描,在焦点处通过将能量传递给晶格令其温度急剧升高引发结构破坏和元素重排,形成晶核(尺寸 1 nm 级),后利用低温退火(450°C)令晶体生长,形成尺寸分布均值几纳米级的钙钛矿。此量子点可以通过很小功率密度的飞秒激光(1 KW/cm^2)擦除,而后通过退火又可以重新恢复,即便多次重复,发光强度也几乎没有下降,如图 8(a),研究者们认为擦除是将其晶相部分溶解而非完全消除。

用飞秒激光生长出来的钙钛矿同样用玻璃进行了无机封装,解决了其不耐水的问题,展现了其 3D 图案存储,光学加密方面的潜力。同年,该课题组又实现了蓝光发光波段的钙钛矿纳米晶体生长^[105]。2022 年,他们又对此实现新的突破^[106],通过利用不同卤族元素粒子配位的强弱和离子的轻重,利用不同时间的照射实现其发光波段的改变。他们在组分与先前研究接近的掺杂卤族元素的玻璃中实现了发光波段可调的飞秒激光直写,在 Br-Cl-I 共掺玻璃中能够实现 480 到 700 nm 可见波段的全彩打印,如图 8(b)。制备出的样品经过紫外线高强度照射,高温热处理和浸入溶剂的稳定性测试,性能依然得以保持。2023 年,该课题组又总结了钙钛矿纳米晶体的飞秒激光直写:

经电离产生的高温等离子体, 其产生的热量为关键, 这使得玻璃中的卤族元素迁移, 形成纳米晶体, 鉴于此过程为热效应主导, 激光的重频和所形成纳米晶核的大小呈正相关^[107]。除了飞秒激光直写钙钛矿, 单质析出也被研究, 例如利用超快激光在氟磷酸盐玻璃中直写的银簇^[108], 利用氟元素提供的弱还原环境和宽松的网络环境, 多光子吸收激发出来的自由电子充当还原剂, 在焦点处形成银簇的聚集, 而周围一层形成银亏空环 (图 8(d))。同样, 此种方法能够进行单脉冲写入, 提升光存储写入的速率。对半导体材料的飞秒激光直接诱导析晶同样开始被研究, 2023 年, G. Torun 等人^[109]进行了不同脉冲密度的实验,

在碲酸盐玻璃中尝试了不同重频的扫描以实现 Te 团簇的晶体析出 (图 8(c)), 作者认为这种晶体团簇是等离子体激发产生 Te^{4+} 离子后又与电子发生自催化还原反应导致的。经拉曼光谱和 TEM (透射电子显微镜) 表征, 低脉冲密度 (1 KHz) 就可以出现 t-Te 纳米晶, 而高脉冲密度下会形成纹理和电场方向相关的自组织纳米结构, 这与一些学者在 LTN 玻璃中的发现相符^[110-112], 可以通过高重频扫描在玻璃中诱导出晶化型纳米光栅, 这些自组织结构比熔融石英中的纳米光栅有着更加高的散射率, 因此有着做衰减片的潜质, 其可调节的组分同样赋予其待开发的潜力。

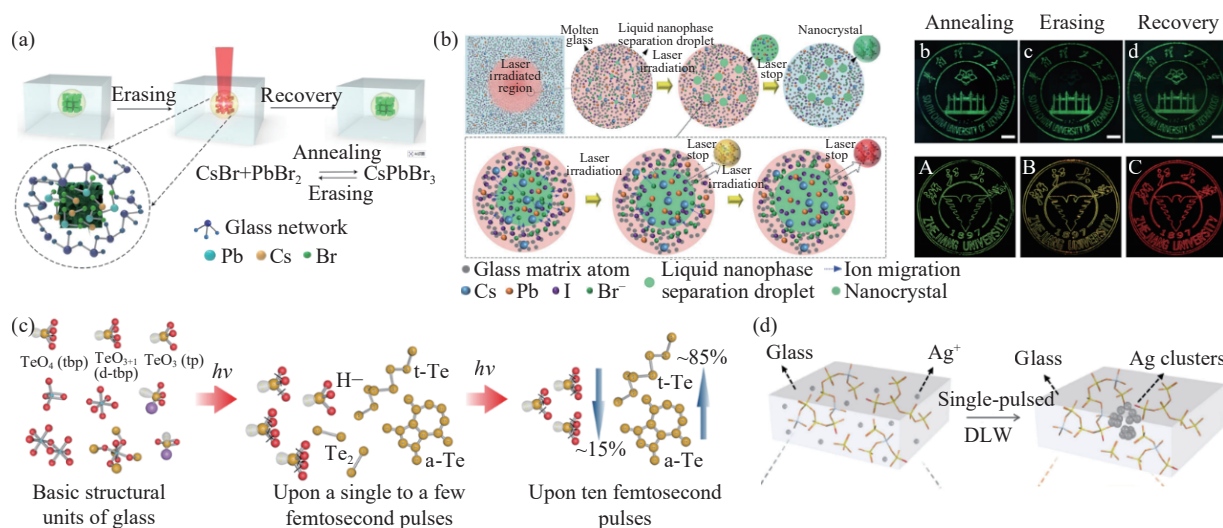


图 8 析晶与元素迁移(a、b)玻璃中直写钙钛矿晶体^[104, 106](c、d) Te 单晶和 Ag 单质在飞秒激光诱导后析出^[108-109]

Fig. 8 Crystallization and Element Migration(a, b) Directly written perovskite crystals in the glass^[104, 106](c, d) Te single crystal and Ag metal precipitating after direct writing by femtosecond laser^[108-109]

4 总结与展望

本文从超快激光作用于玻璃材料不同时间尺度发生的物理现象及不同激光参数下的改性种类入手, 总结梳理了研究者对于不同改性的物理形成机制和改性本身性质 (主要是 Type I 和 Type II) 的认识过程, 并就此展开不同的加工方式 (Burst) 及多种应用 (光存储, 微通道, 应力波片等)。就目前来看, 对于最经典的石英玻璃中改性类型的形成机制尚且较为统一, 后续的研究通常作为前人研究的补充, 然而考虑到掺有其他元素的玻璃, 其改性与元素迁移、析晶的机制目前只有较为散落的研究而缺乏系统的总结。同时在微结构制备方

面, 关于微通道制备的粗糙度, 深宽比等指标尚待优化; 其内部的微结构 (例如 Type X) 在制备器件方面也仍有潜力 (例如大规模集成的光子神经网络)。

现今业内主流的论文大部分都为结果导向, 即用某种手段或某些激光参数制备出某种改性区或是器件, 得到较好的效果后再利用仿真等手段倒推该结果的形成机理, 作者认为这种做法能够探索未知的边沿, 但在应用上同样应当注重对已有实验的总结和可复现性, 系统化的机理解释同样极具价值。

对于不同的改性类型, 鉴于加工参数空间过于巨大且玻璃材料种类成分繁多, 从需求层面看,

很难直接获得应用上理想的改性种类。经过人类近半个世纪的摸爬滚打, google 成功证实了数据驱动的人工智能有着强悍的预测, 识别效果, 因而数据的数量及质量以及计算机算力将决定模型针对某种特定工况的性能, 针对玻璃加工收集数据集并利用不同算法尝试训练 AI 将极有前途。AI 已经被研究者们初步运用于超快激光加工的反向工程及实时反馈等应用, 进一步地, 若能设计智能系统, 根据材料和所需的改性种类倒推加工参数, 将大幅度提升加工效率, 降

低无意义的人工与激光器损耗。这种能够落地的智能系统将是激光加工系统的终极形态, 尽管的构建对超快激光加工机理和材料科学的研究深度要求颇高, 随着 AGI(通用人工智能技术) 的问世, 这类系统实现将更加有望, 将人工智能与激光加工系统的参数结合进行反向工程将爆炸式推动行业发展。同时, 将现有及未来改进的理论与人工智能结合, 利用其推理能力将降低超快激光加工的研究门槛, 助推未来理论以及工程。

参考文献:

- [1] CRESPI A, RAMPONI R, OSELLAME R, *et al.*. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 566.
- [2] WANG L, GONG W, CAO X W, *et al.*. Holographic laser fabrication of 3D artificial compound μ -eyes[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(4): 26.
- [3] KOTZ F, ARNOLD K, BAUER W, *et al.*. Three-dimensional printing of transparent fused silica glass[J]. *Nature*, 2017, 544(7650): 337-339.
- [4] BUTKUTĖ A, JURKŠAS T, BARAVYKAS T, *et al.*. Combined femtosecond laser glass microprocessing for liver-on-chip device fabrication[J]. *Materials*, 2023, 16(6): 2174.
- [5] WANG H, ZHANG Y L, WANG W, *et al.*. On-chip laser processing for the development of multifunctional microfluidic chips[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600116.
- [6] SCHAFFER C B, BRODEUR A, MAZUR E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(11): 1784-1794.
- [7] FORK R, SHANK C, YEN R, *et al.*. Femtosecond optical pulses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(4): 500-506.
- [8] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [9] GLEZER E N, MAZUR E. Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(7): 882-884.
- [10] MIURA K, QIU J R, INOUE H, *et al.*. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(23): 3329-3331.
- [11] 刘姿廷, 袁一鸣, 李子越, 等. 飞秒激光与透明硬质材料的相互作用: 从相变机理到永久光存储[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813005.
- [11] LIU Z T, YUAN Y M, LI Z Y, *et al.*. Interaction between ultrafast laser and transparent hard materials: from phase change mechanism to eternal optical data storage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813005. (in Chinese).
- [12] KTAFI I, KONG J, CAVILLON M, *et al.*. A new approach toward extreme thermal stability of femtosecond laser induced modifications in glasses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(3): 2401086.
- [13] TAN D ZH, WANG ZH, XU B B, *et al.*. Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 024002.
- [14] WANG H J, LEI Y H, WANG L, *et al.*. 5D optical data storage with 100% readout accuracy in silica glass[C]. *Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2021*, Optica Publishing Group, 2021: SW3H. 3.
- [15] YE M X, LEI Y H, ZHANG X, *et al.*. Parallel writing of 5D optical data via shaped voxels[J]. *Science Advances*, 2025, 11(29): eadx7335.
- [16] WANG H J, LEI Y H, WANG L, *et al.*. 100-Layer error-free 5D optical data storage by ultrafast laser nanostructuring in glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100563.

- [17] LEI Y H, SHAYEGANRAD G, WANG H J, *et al.*. Efficient ultrafast laser writing with elliptical polarization[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 74.
- [18] WANG Q, LEI Y H, WANG Y, *et al.*. High-capacity optical data storage by ultraviolet femtosecond laser writing in silica glass[J]. *Optics Express*, 2024, 32(26): 46140-46149.
- [19] CHENG Y, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Microfluidic laser embedded in glass by three-dimensional femtosecond laser microprocessing[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2007-2009.
- [20] ZHANG T L, NAMOTO M, OKANO K, *et al.*. Hydrodynamic particle focusing enhanced by femtosecond laser deep grooving at low Reynolds numbers[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1652.
- [21] QI J Y, LIU X Q, LIU Z J, *et al.*. High stability, ultrawide, and extremely high absorption aluminum plane blackbody fabricated by nitrogen-assisted femtosecond laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(22): e00166.
- [22] WANG D N, ZHAO Y, GE X, *et al.*. Designing hard, low-refractive-index lossy materials for super wear-resistant absorbers[J]. *Materials Research Letters*, 2022, 10(7): 472-480.
- [23] PAPADOPOULOS A, SKOULAS E, MIMIDIS A, *et al.*. Biomimetic omnidirectional antireflective glass via direct ultrafast laser nanostructuring[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(32): 1901123.
- [24] 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.
- [25] COURSAULT D, BRASSELET E. Nanostructured silica spin-orbit optics for modal vortex beam shaping[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(4): 805-812.
- [26] LU J F, GARCIA-CAUREL E, OSSIKOVSKI R, *et al.*. Femtosecond laser direct writing multilayer chiral waveplates with minimal linear birefringence[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(2): 271-274.
- [27] LIU Z T, LEI Y H, ZHAO X H, *et al.*. High-efficiency generation and manipulation of optical vortex by geometric phase fork gratings with high thermal stability and damage threshold[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(7): e02265.
- [28] KELDYSH L V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1965, 20(5): 1307-1314.
- [29] BLOEMBERGEN N. Laser-induced electric breakdown in solids[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1974, 10(3): 375-386.
- [30] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [31] SALIMINIA A, NGUYEN N T, CHIN S L, *et al.*. Densification of silica glass induced by 0.8 and 1.5 μm intense femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(9): 093104.
- [32] SAKAKURA M, LEI Y H, WANG L, *et al.*. Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 15.
- [33] JUODKAZIS S, MISAWA H, HASHIMOTO T, *et al.*. Laser-induced microexplosion confined in a bulk of silica: formation of nanovoids[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(20): 201909.
- [34] TAYLOR R, HNATOVSKY C, SIMOVA E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1-2): 26-46.
- [35] VIPPARTY D, TAN B, VENKATAKRISHNAN K. Nanostructures synthesis by femtosecond laser ablation of glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 073109.
- [36] LIU Y, SHIMIZU M, ZHU B, *et al.*. Micromodification of element distribution in glass using femtosecond laser irradiation[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 136-138.
- [37] STUART B C, FEIT M D, RUBENCHIK A M, *et al.*. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(12): 2248-2251.
- [38] SAKAKURA M, TERAZIMA M, SHIMOTSUMA Y, *et al.*. Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5674-5686.
- [39] SAKAKURA M, TERAZIMA M. Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(2): 024113.
- [40] WANG Q S, JIANG L, SUN J Y, *et al.*. Enhancing the expansion of a plasma shockwave by crater-induced laser refocusing in femtosecond laser ablation of fused silica[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 488-493.

- [41] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A*, 1996, 63(2): 109-115.
- [42] LIU X, DU D, MOUROU G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(10): 1706-1716.
- [43] STOIAN R. Volume photoinscription of glasses: three-dimensional micro- and nanostructuring with ultrashort laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(6): 438.
- [44] RÖMER H. *Theoretical Optics: An Introduction*[M]. Weinheim: John Wiley & Sons, 2006.
- [45] RICHTER S, HEINRICH M, DÖRING S, *et al.*. Nanogratings in fused silica: formation, control, and applications[J]. *Journal of Laser Applications*, 2012, 24(4): 042008.
- [46] STRELTSOV A M, BORRELLI N F. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(10): 2496-2504.
- [47] BRESSEL L, DE LIGNY D, SONNEVILLE C, *et al.*. Femtosecond laser induced density changes in GeO₂ and SiO₂ glasses: fictive temperature effect [invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(4): 605-613.
- [48] BRÜCKNER R. Properties and structure of vitreous silica. I[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1970, 5(2): 123-175.
- [49] DHARMADHIKARI J A, DHARMADHIKARI A K, BHATNAGAR A, *et al.*. Writing low-loss waveguides in borosilicate (BK7) glass with a low-repetition-rate femtosecond laser[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(2): 630-634.
- [50] BÉRUBÉ J P, VALLÉE R. Femtosecond laser direct inscription of surface skimming waveguides in bulk glass[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3074-3077.
- [51] KANEHIRA S, MIURA K, HIRAO K. Ion exchange in glass using femtosecond laser irradiation[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(2): 023112.
- [52] SHIMIZU M, SAKAKURA M, KANEHIRA S, *et al.*. Formation mechanism of element distribution in glass under femtosecond laser irradiation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2161-2163.
- [53] ALLSOP T, DUBOV M, MEZENTSEV V, *et al.*. Inscription and characterization of waveguides written into borosilicate glass by a high-repetition-rate femtosecond laser at 800 nm[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1938-1950.
- [54] FERNANDEZ T T, GROSS S, ARRIOLA A, *et al.*. Revisiting ultrafast laser inscribed waveguide formation in commercial alkali-free borosilicate glasses[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10153-10164.
- [55] FERNANDEZ T T, GROSS S, PRIVAT K, *et al.*. Designer glasses—future of photonic device platforms[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(3): 2103103.
- [56] FERNANDEZ T T, HWANG Y, MAHMODI H, *et al.*. Ultrafast laser-fabricated fluoride glass waveguides with exceptionally high positive refractive index change for mid-infrared integrated optics[J]. *Optics Express*, 2024, 32(24): 42938-42950.
- [57] BELLOUARD Y, CHAMPION A, MCMILLEN B, *et al.*. Stress-state manipulation in fused silica via femtosecond laser irradiation[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1285-1293.
- [58] CHEN G Y, PIANTEDOSI F, OTTEN D, *et al.*. Femtosecond-laser-written microstructured waveguides in BK7 glass[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10377.
- [59] SUN Q, LEE T, BERESNA M, *et al.*. Control of laser induced cumulative stress for efficient processing of fused silica[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3819.
- [60] ZHONG L J, WANG Y Y, TAN D ZH, *et al.*. Toward 3D integration of highly see-through photonic circuits in glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(6): 2200767.
- [61] HAN X H, WANG Y Y, HU J CH, *et al.*. Laser printing of large-area conformal 3D photonic circuits in glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(9): 2400060.
- [62] WANG Y Y, ZHONG L J, LAU K Y, *et al.*. Precise mode control of laser-written waveguides for broadband, low-dispersion 3D integrated optics[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 130.
- [63] SUN Y K, ZHANG X L, YU F, *et al.*. Non-abelian thouless pumping in photonic waveguides[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(9): 1080-1085.
- [64] ZHANG X L, YU F, CHEN Z G, *et al.*. Non-abelian braiding on photonic chips[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(5): 390-395.

- [65] LANCY M, RÉGNIER E, POUMELLE B. Fictive temperature in silica-based glasses and its application to optical fiber manufacturing[J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(1): 63-94.
- [66] BERGHMANS F, BRICHARD B, FERNANDEZ A F, *et al.*. An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors[M]//BOCK W J, GANNOT I, TANEV S. Optical Waveguide Sensing and Imaging. Dordrecht: Springer, 2008: 127-165.
- [67] ZOUBIR A, SHAH L, RICHARDSON K, *et al.*. Practical uses of femtosecond laser micro-materials processing[J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 311-315.
- [68] WITCHER J J, REICHMAN W J, FLETCHER L B, *et al.*. Thermal annealing of femtosecond laser written structures in silica glass[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(4): 502-510.
- [69] MICHELE V D, ROYON M, MARIN E, *et al.*. Near-IR- and UV-femtosecond laser waveguide inscription in silica glasses[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(12): 4624-4633.
- [70] KHALIL A A, LALANNE P, BÉRUBÉ J P, *et al.*. Femtosecond laser writing of near-surface waveguides for refractive-index sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31130-31143.
- [71] CECCARELLI F, ATZENI S, PENTANGELO C, *et al.*. Low power reconfigurability and reduced crosstalk in integrated photonic circuits fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(10): 2000024.
- [72] NATEGH S, GEUDENS V, VAN STEENBERGE G, *et al.*. Femtosecond laser-written invisible sensors in architectural glass and their impact on strength[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, 10(10): 2401941.
- [73] KAZANSKY P G, INOUE H, MITSUYU T, *et al.*. Anomalous anisotropic light scattering in Ge-doped silica glass[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(10): 2199-2202.
- [74] SHIMOTSUMA Y, KAZANSKY P G, QIU J R, *et al.*. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(24): 247405.
- [75] BHARDWAJ V R, SIMOVA E, RAJEEV P P, *et al.*. Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(5): 057404.
- [76] RICHTER S, PLECH A, STEINERT M, *et al.*. On the fundamental structure of femtosecond laser-induced nanogratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(6): 787-792.
- [77] LANCY M, POUMELLE B, CANNING J, *et al.*. Ultrafast nanoporous silica formation driven by femtosecond laser irradiation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 953-962.
- [78] MUSGRAVES J D, HU J J, CALVEZ L. *Springer Handbook of Glass*[M]. Cham: Springer, 2019.
- [79] LI ZH Z, WANG L, FAN H, *et al.*. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 41.
- [80] LEI Y H, SAKAKURA M, WANG L, *et al.*. High speed ultrafast laser anisotropic nanostructuring by energy deposition control via near-field enhancement[J]. *Optica*, 2021, 8(11): 1365-1371.
- [81] XU Y SH, LI ZH Z, FAN H, *et al.*. Optical near fields for ablation of periodic structures[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2841-2844.
- [82] LI ZH Z, FAN H, WANG L, *et al.*. Super-stealth dicing of transparent solids with nanometric precision[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(8): 799-808.
- [83] HNATOVSKY C, TAYLOR R S, SIMOVA E, *et al.*. Polarization-selective etching in femtosecond laser-assisted microfluidic channel fabrication in fused silica[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1867-1869.
- [84] KIYAMA S, MATSUO S, HASHIMOTO S, *et al.*. Examination of etching agent and etching mechanism on femtosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(27): 11560-11566.
- [85] FERNANDES L A, GRENIER J R, HERMAN P R, *et al.*. Stress induced birefringence tuning in femtosecond laser fabricated waveguides in fused silica[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24103-24114.
- [86] CHAMPION A, BERESNA M, KAZANSKY P, *et al.*. Stress distribution around femtosecond laser affected zones: effect of nanogratings orientation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24942-24951.
- [87] ZHANG J Y, GECEVIČIUS M, BERESNA M, *et al.*. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(3): 033901.
- [88] CASAMENTI E, POLLONGHINI S, BELLOUARD Y. Few pulses femtosecond laser exposure for high efficiency 3D

- glass micromachining[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35054-35066.
- [89] LU J F, TIAN J, POUMELLE B, *et al.*. Tailoring chiral optical properties by femtosecond laser direct writing in silica[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 46.
- [90] HERMAN P R, MARJORIBANKS R, OETTL A. Burst-ultrafast laser machining method: US, 20010009250[P]. 2001-07-26.
- [91] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P, *et al.*. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [92] WANG H J, LEI Y H, SHAYEGANRAD G, *et al.*. Increasing efficiency of ultrafast laser writing via nonlocality of light-matter interaction[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(8): 2301143.
- [93] KOLASINSKI K W, GUPTA M C, ZHIGILEI L V. Plume and nanoparticle formation during laser ablation[M]//WANDEL T K. Encyclopedia of Interfacial Chemistry. Amsterdam: Elsevier, 2018: 594-603.
- [94] SINGH M, AMIN M, R A K, *et al.*. Beyond imaging: optical emission spectroscopy for mechanistic diagnosis of plasma plume and spatter dynamics in laser DED[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2026, 349: 119199.
- [95] LOPEZ J, NIANE S, BONAMIS G, *et al.*. Percussion drilling in glasses and process dynamics with femtosecond laser GHz-bursts[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12533-12544.
- [96] BALAGE P, BONAMIS G, LAFARGUE M, *et al.*. Advances in femtosecond laser GHz-burst drilling of glasses: influence of burst shape and duration[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1158.
- [97] BALAGE P, GUILBERTEAU T, LAFARGUE M, *et al.*. Pump-probe imaging of ultrafast laser percussion drilling of glass in single pulse, MHz- and GHz-burst regimes[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2025, 12(10): 2400853.
- [98] BHARDWAJ V R, CORKUM P B, RAYNER D M, *et al.*. Stress in femtosecond-laser-written waveguides in fused silica[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(12): 1312-1314.
- [99] MCMILLEN B, ATHANASIOU C, BELLOUARD Y. Femtosecond laser direct-write waveplates based on stress-induced birefringence[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27239-27252.
- [100] MARCINKEVIČIUS A, JUODKAZIS S, WATANABE M, *et al.*. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(5): 277-279.
- [101] BELLOUARD Y, SAID A, DUGAN M, *et al.*. Fabrication of high-aspect ratio, micro-fluidic channels and tunnels using femtosecond laser pulses and chemical etching[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2120-2129.
- [102] OCHOA M, ROLDÁN-VARONA P, ALGORRI J F, *et al.*. Polarisation-independent ultrafast laser selective etching processing in fused silica[J]. *Lab on a Chip*, 2023, 23(7): 1752-1757.
- [103] BARBATO P, OSELLAME R, MARTÍNEZ VÁZQUEZ R. Nanochannels in fused silica through NaOH etching assisted by femtosecond laser irradiation[J]. *Materials*, 2024, 17(19): 4906.
- [104] HUANG X J, GUO Q Y, YANG D D, *et al.*. Reversible 3D laser printing of perovskite quantum dots inside a transparent medium[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 82-88.
- [105] HUANG X J, GUO Q Y, KANG SH L, *et al.*. Three-dimensional laser-assisted patterning of blue-emissive metal halide perovskite nanocrystals inside a glass with switchable photoluminescence[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3150-3158.
- [106] SUN K, TAN D ZH, FANG X Y, *et al.*. Three-dimensional direct lithography of stable perovskite nanocrystals in glass[J]. *Science*, 2022, 375(6578): 307-310.
- [107] SU Z H, SUN SH ZH, DAI Y, *et al.*. Femtosecond laser direct-writing of perovskite nanocrystals in glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, 2023, 18: 100182.
- [108] ZHENG W Y, WANG ZH, CHEN W L, *et al.*. Unlocking high photosensitivity direct laser writing and observing atomic clustering in glass[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8366.
- [109] TORUN G, KISHI T, PUGLIESE D, *et al.*. Formation mechanism of elemental Te produced in tellurite glass systems by femtosecond laser irradiation[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(20): 2210446.
- [110] ZHANG B, TAN D ZH, WANG ZH, *et al.*. Self-organized phase-transition lithography for all-inorganic photonic textures[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 93.
- [111] ZHANG B, WANG ZH, TAN D ZH, *et al.*. Ultrafast laser inducing continuous periodic crystallization in the glass activated via laser-prepared crystallite-seeds[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(8): 2001962.
- [112] ZHANG B, TAN D ZH, LIU X F, *et al.*. Self-organized periodic crystallization in unconventional glass created by an

ultrafast laser for optical attenuation in the broadband near-infrared region[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(20): 1900593.

作者简介:



王心田(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光制造等方面的研究。
E-mail: wxt25@mails.jlu.edu.cn

于颜豪(1986—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事超快激光制造机制及应用的研究。E-mail: yanhao_yu@jlu.edu.cn 第一作者: