

引用:赵海军,孙之海,李卓然,等. 飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2025, 38(5): 693-702.

Citation:ZHAO Haijun, SUN Zhihai, LI Zhuoran, NIE Zhaogang. Research progress of femtosecond laser induced nanogratings in glass[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2025,38(5):693-702.

文章编号 1672-6634(2025)05-0693-10

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024120018

飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅研究进展

赵海军,孙之海,李卓然,聂兆刚

(聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059)

摘要 激光微纳加工可以在微纳尺度设计和制造特定的物理和化学性质的多种新材料和结构,被广泛应用于通信、电子、光学、生物医学、能源等多个领域,是先进制造重要组成部分。由于玻璃材料种类多且具有良好的透明性,在光学元件、传感器、电子设备等领域具有普遍应用,所以实现玻璃的微纳加工具有重要现实意义,自 2003 年在石英玻璃中发现纳米光栅以来玻璃微纳加工就引起极大的关注,纳米光栅具有双折射特性、热稳定性、周期性、可接续性、光学延迟和光轴可控性以及可重写特性,在微光学元件,微流体通道和光存储等领域具有重要应用价值。本文综述了飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅的研究现状、形成机制和应用,并对今后的发展趋势和问题挑战进行了展望。

关键词 飞秒激光;玻璃;纳米光栅;双折射;激光脉冲

中图分类号 TQ171.6;TN249

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress of femtosecond laser induced nanogratings in glass

ZHAO Haijun, SUN Zhihai, LI Zhuoran, NIE Zhaogang

(School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract A variety of new materials and structures with specific physical and chemical properties can be designed and manufactured by laser micro and nanoprocessing at the micro and nano scale. It is widely used in communication, electronics, optics, biomedicine, energy and other fields, and is an important part of advanced manufacturing. Many kinds of glass materials with good transparency are widely used in optical components, sensors, electronic equipment and other fields. Since the discovery of nanogratings existed in silica glass in 2003, they have attracted great attention. The nanogratings induced in transparent glass have birefringent properties, thermal stability, periodicity, continuability, optical delay, optical axis controllability and rewritability, which have important applications in the fields of microoptical components, microfluidic channels and optical storage. In this paper, the research status, formation mechanism and application of nanogratings induced by femtosecond laser in glass are reviewed, and the future develop-

收稿日期:2024-12-30

基金项目:山东省重点研发计划(2023CXPT083)资助

通信作者:赵海军,男,汉族,副教授,研究方向:激光加工技术,E-mail:haijunzhao@126.com;聂兆刚,男,汉族,博士,教授,研究方向:超快光学、激光加工技术,E-mail:zgniefs@163.com.

ment trend and challenges are prospected.

Keywords femtosecond laser; glass; nanograting; birefringence; laser pulse

0 引言

飞秒激光具有非常窄的脉冲宽度,一般为几个到几百个飞秒,经过聚焦后能量密度可达 10^{15} W/cm²,电场强度可达 10^{10} V/cm,所以飞秒激光具有超快、超强的特点,可以瞬间产生极高的能量密度,在极短时间把能量注入聚焦焦点附近的材料内部,为微纳加工提供了便利条件^[1-4]。在超快超强的极端物理条件下,激光和相互作用物质间可产生复杂的非线性相互作用,会产生多光子吸收和多光子电离等实现作用材料的微小结构性改变,赋予材料新的结构和性能。2003 年 Shimotsuma 等人^[5]通过背散射电子显微镜在透明玻璃中发现周期性纳米光栅,随着飞秒激光技术的进步,通过控制飞秒激光参数和玻璃材料组分可以制备先进的微纳元件,相关研究得到快速发展和应用^[6-9]。

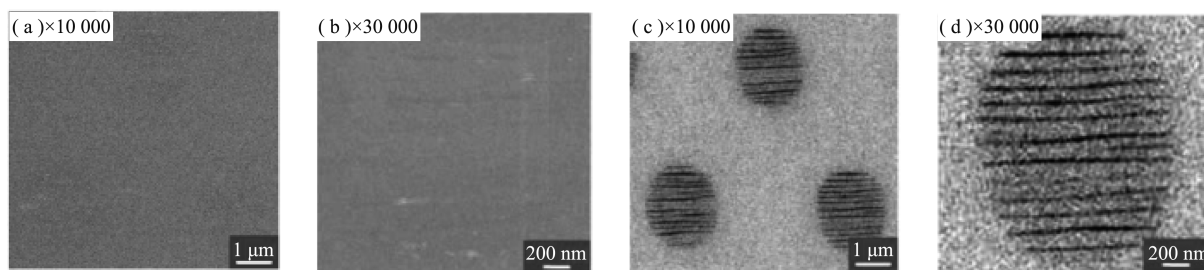
飞秒激光聚集到透明介质内部时,在不同的能量密度、脉冲持续时间下可得到三种不同类型的材料结构改性,且不同改性其机理不同^[10]。当脉冲能量较低,脉冲持续时间较短时聚焦激光作用区域产生较多缺陷且未出现损伤,材料致密性发生改变,折射率均匀增大,属于 Type I 改性(折射率改变)^[11],这通常应用于制备光波导;当脉冲能量较高,脉冲持续时间较长时聚焦激光作用区域产生具有各项异性和单轴双折射效应,折射率呈现出亚波长周期的分布的纳米条纹结构,Shimotsuma 等人^[5]最早称之为纳米光栅,属于 Type II 改性(纳米光栅)^[12];当脉冲能量很高,脉冲持续时间很长时聚焦激光作用区域能量超出材料承受阈值,产生微爆炸形成微孔或微裂纹,形成中心空周围密度大的腔体结构,主要用于光存储,属于 Type III 改性(微孔、微裂纹)^[13-14]。激光诱导纳米光栅和传统依赖于光刻和电子束刻蚀等方法相比,激光诱导不需要复杂光路系统,只需配以三维移动平台即可以实现大面积制备,其在微光学元件,微流体通道和光存储等方面具有重要应用价值,这成为近年来微纳加工领域研究的热点。

本文综述了飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅的研究现状、形成机理和重要应用,介绍了目前研究重点和关键问题,对制作结构复杂高集成光子器件具有现实意义。

1 飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅结构特征

1.1 纳米光栅双折射特性

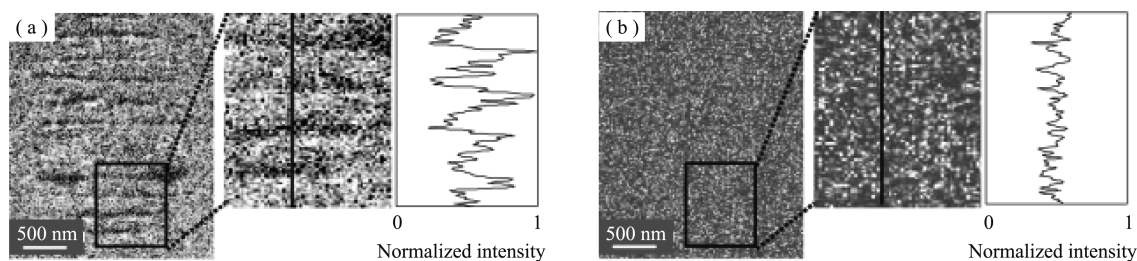
1999 年法国 Sudie 等人^[15]研究发现通过飞秒激光作用在石英玻璃内时在聚焦焦点附近出现了各项异性光散射现象,同年英国的 Kazansky 等人^[16]在 Ge 掺杂的石英玻璃中也观察到各向异性光散射现象,2000 年邱建荣等人^[17]在石英玻璃辐照区发现了偏振依赖永久结构产生,2003 年 Shimotsuma 等人^[5]第一次在实验中通过背散射电子显微镜观测到在垂直于聚焦激光传播方向的焦平面上存在纳米尺度条纹结构,条纹排列方向与入射激光偏振方向垂直,称之为纳米光栅(图 1)。经过纳米光栅进行俄歇电子能谱测试发现,纳米光栅区域的氧元素浓度周期性地发生变化,暗纹氧元素浓度较其他区域低,硅元素浓度各区域基本相同(图 2),这种结构在 HF 酸溶液中具备明显不同的腐蚀速率,呈现出凹槽结构,所以通过合适浓度 HF 酸腐蚀后可以在扫面电子显微镜下观察其形貌,这对于制备特定微纳结构具有重要意义。



注:(a,b) 焦点附近石英玻璃的 SEM 图像;(c,d) 石英玻璃的背散射电子图像。

图 1 石英玻璃纳米光栅^[5]

Fig. 1 Nanogratings of silica glass^[5]



注:(a) 氧元素;(b) 硅元素。

图2 石英玻璃抛光至焦点深度的氧元素和硅元素的俄歇能谱图及其对应的线扫描图^[5]

Fig. 2 Auger spectra maps and corresponding line scans of oxygen and silicon on silica glass surface polished close to the depth of focal spot^[5]

2006年Bricchi等人^[13]研究发现,纳米光栅条纹垂直于激光偏振方向,同时纳米光栅周期性条纹区域的折射率也呈周期性变化,即氧元素浓度低的薄层(t_1)和厚层(t_2)垂直于激光偏振方向交替排列,折射率分别为 n_1 和 n_2 , n_1 小于 n_2 ,这导致纳米光栅具有双折射特性(图3)。

2008年Taylor等人^[18]研究发现纳米光栅在沿激光传播方向上呈胡萝卜形分布,这是由于激光传输中的自聚焦效应、球差效应和非线性传输效应作用所导致(图4)。

1.2 纳米光栅热稳定性

热稳定性是微纳结构应用的重要因素,2006年Bricchi等人^[13]将纳米光栅以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 进行加热,并保持在 200 、 500 、 800 、 $1\ 100$ 、 $1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 1 h ,然后以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 进行冷却至室温,发现在 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后仍能检测到双折射。2012年Richter等人^[19]通过测量偏振对比强度系统研究了纳米光栅的热稳定性,发现当在 $1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后,偏振对比强度仍保持在初始水平的 13% 。2022年Wang等人^[20]研究表明红外飞秒激光在硅玻璃中写入TypeII改性(即纳米光栅),可以在 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下存活 200 h ,经过专门钝化处理后,在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,双折射光学元件的使用寿命可超过 10 年,且仅损失 7% 。

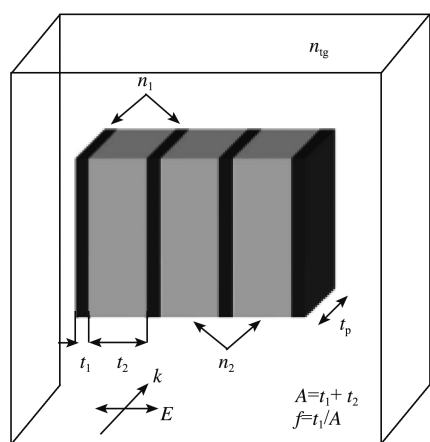


图3 纳米光栅示意图^[13]

Fig. 3 Schematic of the nanograting^[13]

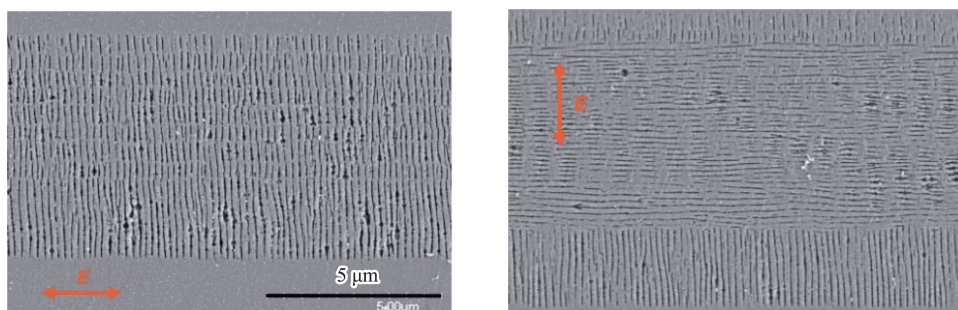


图4 纳米光栅沿入射光方向的SEM图像^[18]

Fig. 4 SEM image of the nanograting along the incident laser^[18]

1.3 纳米光栅重写和可接续性

纳米光栅具有可接续性特点,可以通过部分重叠扫描方式实现纳米光栅沿着原来诱导结构进行扩展,通过部分重叠相邻扫描得到的纳米光栅具有相同的排列走向,而且不用过多考虑脉冲叠加影响,文献^[18]通过光斑重叠约 50% 在石英玻璃内部成功制备出大面积纳米光栅,纳米光栅是一种偏振依赖结构,我们可以改变入射激光的偏振方向对原纳米光栅进行辐射,可以发现原纳米光栅消失,新的垂直于激光偏振方向的纳米光栅逐渐形成,图5(b)为使用与产生图5(a)的激光偏振垂直激光重写的纳米光栅图片,这为我们进行纳米光栅擦除重写提供了思路,这使得纳米光栅在光存储应用表现出极大的潜力^[18,21]。

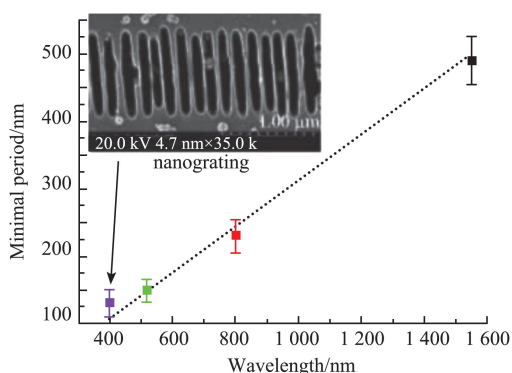
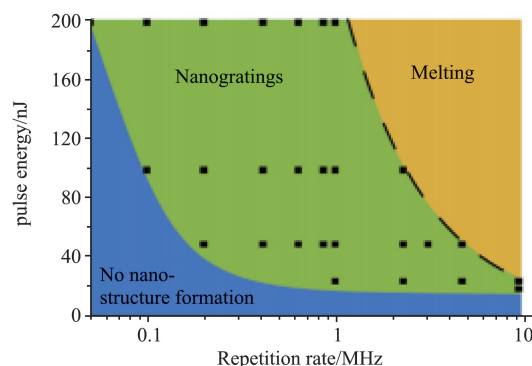
图 1 大面积纳米光栅的 SEM 图^[18]Fig. 5 SEM image of large-area nanograting^[18]

2 飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅形影响因素研究

飞秒激光在玻璃中诱导产生纳米光栅本质是光与材料非线性相互作用,激光的各种参数和玻璃材料组成对纳米光栅形成具有重要影响,自从纳米光栅发现关于激光参数的研究日益丰富,研究者们主要对激光波长、脉冲能量,重复频率等因素开展了系列研究,关于玻璃组分对纳米光栅形成的影响研究一直是研究热点,由于不同材料纳米光栅形成窗口不同,从最初的二氧化硅和硅酸盐开始到多组分玻璃,研究较多的还是二元网络结构^[9-10]。

2.1 激光参数对纳米光栅形成影响

波长作为激光重要参数之一在纳米光栅形成过程中发挥着重要作用,研究结果表明飞秒激光在玻璃中诱导形成的纳米光栅其条纹周期随着入射激光波长的改变而发生变化,具有高度相关性^[19,22](图 6),形成的纳米光栅周期 T 满足 $T = \lambda/2n$, n 为玻璃折射率,也有研究表明纳米光栅周期随着激光脉冲数的增加而单调减少^[23-24]。当脉冲能量低于形成纳米光栅形成阈值时,激光和玻璃相互作用区域的折射率会均匀增加^[25],当入射激光的脉冲能量高于形成阈值时会形成孔洞和裂纹^[26],只有入射激光的脉冲能量在合适范围内才能形成均匀分布的纳米光栅。飞秒激光加工之所以被称为“冷加工”归因其超短的脉冲,但当激光重复频率较高时,飞秒激光两个脉冲间隔的时间小于相互作用区域热量扩散时间时,材料中会产生较明显的热积累效应,导致形成窗口变窄甚至难以形成均匀的纳米光栅。Richter 等人^[27]系统研究了重复频率、脉冲个数对石英玻璃中形成纳米光栅的影响,过低和过高的重复频率会导致纳米光栅形成窗口变窄,不易形成纳米光栅,如图(7、8)所示。

图 6 纳米光栅周期与入射激光波长的关系^[19]Fig. 6 Relationship between the period of nanogratings and incident laser wavelength^[19]图 7 重复频率和脉冲能量对纳米光栅形成的影响^[27]Fig. 7 Influence of repetition rate and pulse energy on the formation of nanograting in silica glass^[27]

2.2 玻璃组分对纳米光栅形成的影响

自 2003 年 Shimosuma 等人在熔融石英中首次观测到纳米光栅以来,开始几年人们研究的最多的就是

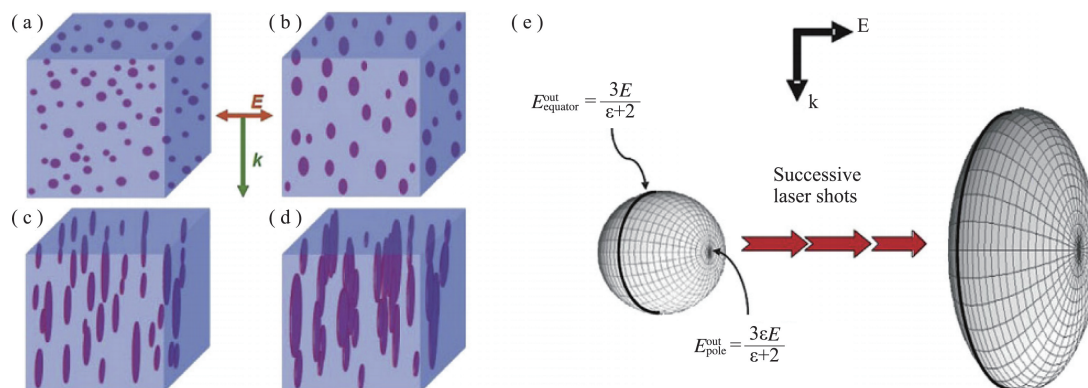
石英玻璃^[28-30],此后多组分玻璃产生纳米光栅研究也逐渐收到关注,2011年 Lancry 等人^[31]提出少量掺杂也会显著影响掺杂玻璃的纳米光栅双折射性能,2013年 Richter 等人^[32]在 ULE 和硼硅酸盐玻璃中诱导形成了纳米光栅,2014年 Shimotsuna 等人^[33]在 GeO₂ 玻璃中观察到纳米光栅,2016年, Lancry 等人^[34]在高锗掺杂 SiO₂ 和 GeO₂ 玻璃中观察到纳米光栅,2016年 Fedotov 等人^[35]发现在 AF32 玻璃, Borofloat 33 等多组分硅酸盐玻璃中具有狭窄的纳米光栅加工窗口。2019年 Lotarev 等人^[36]研究了在硼硅酸钠玻璃(68% SiO₂-27% B₂O₃-4% Na₂O 和 1% Al₂O₃)形成纳米光栅可行性,研究表明随着玻璃中的氧化钠含量升高,通过非常少量的脉冲可以诱导产生偏振双折射,所需的脉冲数量随着氧化钠含量的增加而减少。2020年 Wang 等人^[37]研究了 Al₂O₃-SiO₂ 二元玻璃内部纳米光栅的形成,当 Al₂O₃ 含量增加时,纳米光栅形成阈值更高,光学延迟降低。2022年 Xie 等人^[38]研究表明在 BK7 玻璃中发现纳米光栅,而在以前的工作中通过 SEM 观察一直没有发现纳米结构产生^[32,39],这归因于其形成窗口非常窄。2023年 Yao 等人^[40]在铝硼硅酸盐玻璃中进行了研究,结果表明随着 (Na₂O+CaO)/Al₂O₃ 和 B₂O₃/Al₂O₃ 摩尔比的增加,形成窗口逐渐减小。

3 纳米光栅形成机制研究

经过近二十年研究,随着实验技术和分析手段的日益丰富,飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅研究取得了重要进展,但是纳米光栅的形成是在飞秒激光脉冲和物质相互作用的飞秒时间范围内,目前还没有合适实验方法直接观测并对这一相互作用过程进行精确描绘,当前还只能通过飞秒激光脉冲时域、频域等关联对这一动力学过程进行推断,目前对纳米光栅形成机制有以下几种理论模型。

3.1 入射广场与电子等离子体波干涉模型

Shimotsuna 等人^[5]第一次实验中通过背散射观测到纳米光栅时,他们认为,在飞秒激光聚焦焦点附近,由于非线性电离效应会产生大量电子等离子体,在入射激光脉冲尾端光场作用下,电子等离子体发生共振吸收,这时入射光场和电子等离子体会发生干涉,电子等离子体得到周期性的调制,相互作用的材料区域也会发生周期性变化,当相互作用结束后在作用区域会产生永久周期性结构的纳米光栅。



注:(a~d) 纳米等离子体向纳米平面演化过程;(e) 纳米等离子体上两个位置的不对称场增强示意图。

图9 纳米光栅的等离子体被干涉模型^[18]

Fig. 9 Nanograting model of plasma wave interference^[18]

3.2 纳米等离子体基元各向异性生长模型

Taylor 等人^[18]根据研究提出了纳米等离子体基元各向异性生长模型。当飞秒激光被聚焦辐射到透明

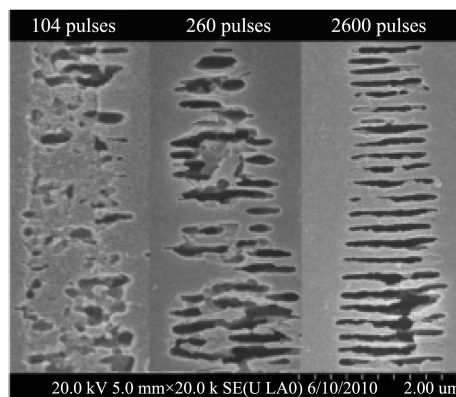


图8 脉冲个数对纳米光栅形成的影响^[27]

Fig. 8 The effect of the number of pulses on the formation of nanograting^[27]

玻璃中时,由于玻璃中缺陷的电离阈值较低,激光与透明玻璃相互作用时产生电离和能量吸收呈现不均匀分布,产生随机电离中心,持续脉冲照射下成为球状纳米等离子体基元,纳米等离子体基元不断发生膨胀,伴随各向异性膨胀过程进而形成椭球状纳米等离子体。当纳米等离子体赤道面上电场增强时,纳米等离子体沿垂直于激光偏振方向演化为纳米平面,随着脉冲持续作用,相互作用区域材料具备了类金属相和入射光产生相干作用受到周期性调制(图9)。

3.3 自陷激子辅助模型

Richter S 等人^[27,41]在研究中根据纳米等离子体基元各向异性生长模型发现,纳米光栅的形成需要多个脉冲作用,由于等离子体寿命远小于脉冲间隔时间,所以纳米等离子体基元各向异性生长模型中形成等离子体基元后面的激光脉冲无法与之发生相互作用,他们提出了自陷激子辅助模型,发现纳米光栅形成过程中根据脉冲时间间隔有两种情况:第一,当脉冲时间间隔小于 500 fs 时,自陷激子有利于对后续脉冲的吸收,有利于纳米光栅的形成;第二,当脉冲时间间隔大于 500 fs 时,稳定的悬空键类型的缺陷及重要作用,降低了电离能促进了纳米光栅的形成(图10)。

除了上述三种模型外,Liao 等人^[42]研究表明,在飞秒激光修饰和未修饰区域之间的界面上激发等离子体驻波起着重要作用。界面附近产生的周期性分布缺陷形成周期性纳米粒子,然后纳米孔都可以进一步形成亚波长宽度裂纹,最终形成纳米光栅。Dai 等人^[43]在实验中实现了石英玻璃纳米光栅在三维空间的可控旋转,可控三维旋转由于激光脉冲前倾(PFT)和激光偏振之间存在夹角,因此会在入射光传播方向上存在一个电场分量,正是由于电场分量的存在,我们可以改变入射光偏振的方式实现对等离子体的纵向调制,进而纳米光栅在三维空间可控旋转,通过改变激光扫描方向可实现纳米光栅在横截面上的旋转调制。

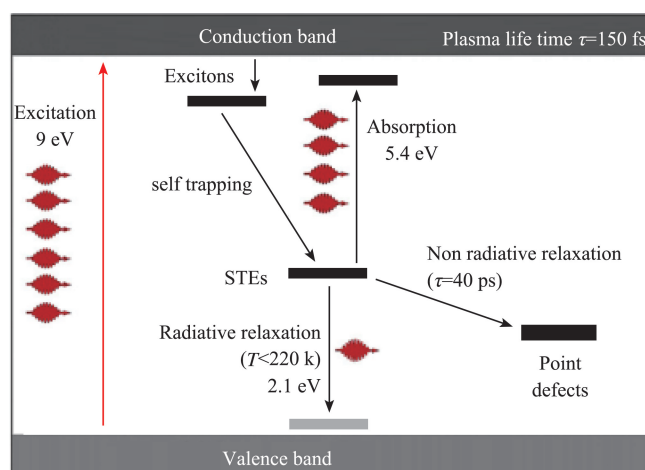


图10 自现激子的形成及其衰变为点缺陷示意图^[27,41]

Fig. 10 Schematic diagram of the generation process of STEs and their decay to point defects^[27,41]

4 纳米光栅应用研究

4.1 光存储

纳米光栅由于具有单轴双折射性质使其在光存储方面具备先天优势,纳米光栅用于光存储有两大优点,第一,利用纳米光栅光轴取向和光程延迟可控性可以实现多维存储,第二,利用纳米光栅可重写特性可实现数据多次写入。多维光学数据存储(三维空间坐标、光轴方向和光学延迟)在大量数据存储中可以展现巨大应用潜力,具有相当大的可行性和优越性。2010年 Shimotsuma 等人^[44]使用纳米光栅实现了多维存储,利用半波片控制激光偏振方向,通过液晶光阀空间光调制器调制光束相位分布,实现聚焦区域不同的光学延迟,在 20 min 时间里,制作了一幅 3.4 mm × 1.8 mm 世界地图,存储数据通过正交偏光显微镜读出,如图 11 所示,图 11(a)是飞秒激光直写在石英玻璃上的世界地图,图 11(b)是慢轴方位角偏振光显微镜图像,图 11(c)是光学延迟偏振光显微镜图像。2014 年 Zhang 等人^[45]利用飞秒激光诱导的双折射点阵实现了多路复用存储和读取。2022 年 Sakakura 等人^[46]报道了一种纳米光栅的中间状态,称为 Type X 修饰,可以认为是由超快激光诱导的随机分布的各向异性纳米孔,与纳米光栅相比,能够表现出超低的散射损失,在可见光下透射 99%,在紫外光下透射 90% 以上。Wang 等人^[47]利用 Type X 型修改实现具有高数据容量和长寿命的熔融硅的 5 维光存储。

4.2 微光学元件

自纳米光栅发现以来,基于纳米光栅的微光学元件得到了发展。如 Richter 等人^[48]报告的波片,Zhang

等人^[49]报告的光衰减器,Beresna 等人^[50]报告的光涡旋转换器,Zhang 等人^[51]报告的偏振转换器,Drevinskas 等人^[52]产生具有可调谐轨道角动量的光学涡旋的涡旋半波缓速器,Lu 等人^[53]研究了飞秒激光直接写入诱导的光纤纳米光栅,研究表明,锗掺杂在光纤纳米光栅的形成中起着重要作用,该纳米光栅具有强双折射和锯齿波动的负折射率分布。2021 年 Wang 等人^[54]报告了在硅纤维芯中诱导纳米光栅获得适用于恶劣环境的传感器。2023 年 Lu 等人^[55]提出了利用飞秒激光在二氧化硅中直写诱导光学手性的现象学模型,实验中实现了对二氧化硅材料的按需手性诱导,这对微纳光学理论研究具有重要价值,也为光子学应用提供了新的参考。

近年来对基于纳米光栅的微光学元件的报道越来越多。尽管目前大多还在实验室阶段,由于其加工优势具有很大的应用潜力,需要进行更多的研究。

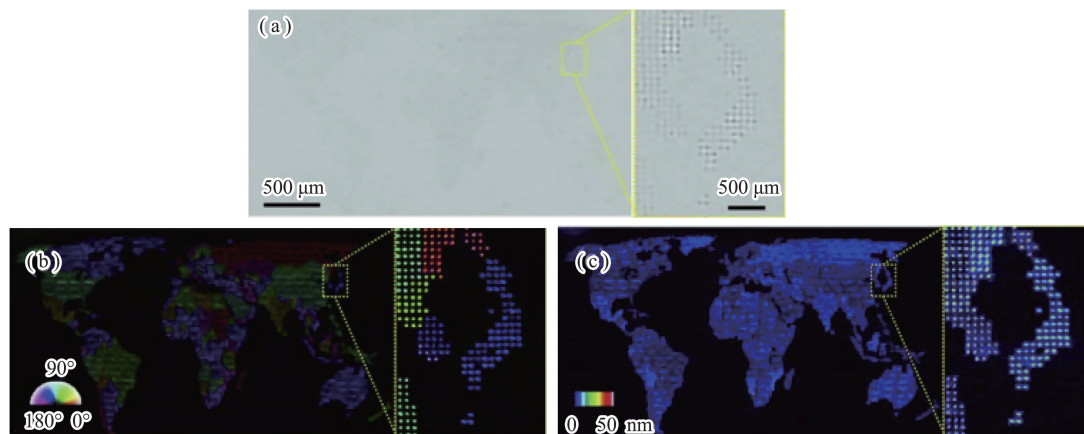


图 11 飞秒激光直写在石英玻璃上的世界地图^[44]

Fig. 11 The world map imprinted in silica glass using femtosecond laser direct writing^[44]

4.3 微流体通道

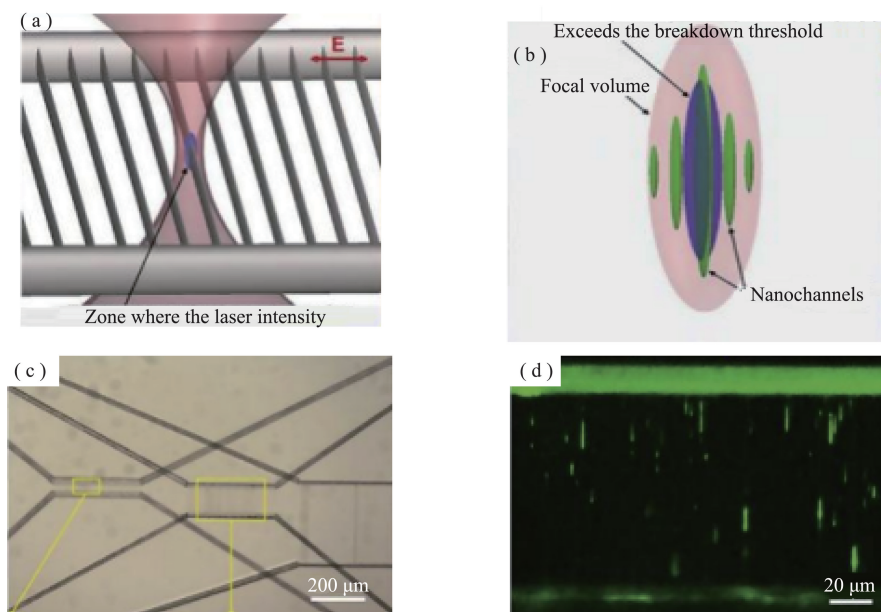
液体样品分析在生物学、医学等具有巨大应用需求,微流体通道是液体样品测量微流体器件的重要组成部分,而纳米光栅具有光栅结构方向选择性和化学腐蚀各向异性,可以直接通过激光诱导和化学腐蚀制作微流体通道。这是由于飞秒激光在玻璃中诱导产生纳米光栅中的氧浓度呈现周期性分布,低氧浓度的纳米光栅区域会优先被化学腐蚀,而纳米光栅的排列方向又垂直于激光偏振方向,因此飞秒激光诱导玻璃的化学腐蚀各向异性取决于激光的偏振方向,这对在玻璃中制备微流通道具有重要意义。

Liao 等人^[56]最先报告了使用飞秒激光在硅酸盐玻璃中直接写入纳米流体通道,其横向宽度低至 50 nm,通过在玻璃基板上同时写入排列成各种配置的微流体和纳米流体通道产生了集成微流体系统,如图 12 所示,图 12(d)显示了流体通道中填充 DNA 序列溶液,DNA 在纳米流体通道阵列中被拉伸,证明了通道的连通性。Païe 等人^[57]通过飞秒激光诱导和化学腐蚀,在石英玻璃中制备具有聚焦功能的三维微流器件,该器件可以把微粒流量三维对称的限制在通道中心区域。上述激光诱导微流体通道技术为微流体器件的研究提供了新的选择。

5 总结

飞秒激光在玻璃中诱导纳米光栅为研究飞秒激光和玻璃的非线性相互作用提供可新的方向,纳米光栅在微光学元件制备,光学数据存储,微流体通道等方面具有非常大的应用潜力。多年来学者对纳米光栅形成物理机制进行了深入研究,但目前还未形成系统理论,现有模型存在相互矛盾现象,需要今后进一步开展研究;目前基于纳米光栅的微光学元件很多还处于实验室阶段,达到商业应用还需进一步深入实践;伴随着通信和飞秒激光技术的发展,利用飞秒激光在光纤中进行维纳加工产生光纤纳米光栅也成为一个新的研究热点;另外目前研究选择的材料种类有限,伴随着具有新组分、新型功能玻璃的发现,在其中诱导产生纳米光栅

的研究也会展现新的活力。



注:(a)飞秒激光直写纳米流体通道;(b)单个纳米流体通道;(c)纳米流体通道阵列;(d)DNA在纳米流体通道阵列中的拉伸。

图 12 飞秒激光在硅酸盐玻璃中直写纳米流体通道图示^[56]

Fig. 12 Nanofluid channel diagram in silicate glass by femtosecond laser direct writing^[56]

参 考 文 献

- [1] 程亚. 超快激光微纳加工原理、技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [2] YAN J, KOBAYASHI F, Laser recovery of machining damage under curved silicon surface[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2013,62(1): 199-202.
- [3] MAMALIS A, MANOLAKOS D E, LOANNIDIS M B, et al. Simulation of advanced manufacturing of solids and porous materials[J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2003,5(3):111-130.
- [4] XU S, ZHANG Y, WANG T, et al. Recent developments of femtosecond laser direct writing for meta-optics[J]. Nanomaterials, 2023, 13(10):1623.
- [5] 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.
- [6] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [7] 王珏晨,张芳腾,邱建荣. 单光束飞秒激光诱导玻璃内部纳米光栅机理及应用研究进展[J]. 中国激光,2017,44(1):9-28.
- [8] 戴晔,邱建荣. 单光束飞秒激光诱导石英玻璃内部纳米光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(12):11-30.
- [9] 王珏晨. 飞秒激光诱导碱金属氧化物玻璃微纳结构的研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [10] 张芳腾. 飞秒激光在透明介质中诱导的偏振依赖微纳结构与应用[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [11] CAVILLON M, WANG Y T, POUMELLE B, et al. Erasure of nanopores in silicate glasses induced by femtosecond laser irradiation in the Type II regime[J]. Applied Physics A,2020,126(11):876.
- [12] LANCRY 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.
- [13] BRICCHI E, KAZANSKY P G. Extraordinary stability of anisotropic femtosecond direct-written structures embedded in silica glass[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(11):3329.
- [14] 王琳. 基于飞秒激光诱导 Type X 结构的永久光存储研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
- [15] SUDRIE L, FRANCO M, PRADE B, et al. Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses[J]. Optics Communications, 1999,171(4-6), 279-284.
- [16] KAZANSKY P G, INOUE H, MITSUYU T, et al. Anomalous anisotropic light scattering in Ge-doped silica glass[J]. Physical Re-

- view Letters, 1999, 82(10):2199-2202.
- [17] QIU J R, KAZANSKY P G, SI J, et al. Memorized polarization-dependent light scattering in rare-earth-ion-doped glass[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(13):1940-1942.
- [18] 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.
- [19] RICHTER S, HEINRICH M, DÖRING S, et al. Nanoratings in fused silica: formation, control, and applications[J]. Journal of Laser Applications 2012, 24(4), 042008.
- [20] WANG, Y T, LANCRY M, CAVILLON M, et al. Lifetime prediction of nanogratings inscribed by a femtosecond laser in silica glass [J]. Optics Letters, 2022, 47 (5): 1242-1245.
- [21] TAYLOR R. Femtosecond laser erasing and rewriting of self-organized planar nanocracks in fused silica[J]. Optics Letters, 2007, 32 (19):2888-2890.
- [22] RICHTER S, HEINRIC, M, DÖRING S. et al. Formation of femtosecond laser-induced nanogratings at high repetition rates[J]. Applied Physics A, 2011, 104(2), 503-507.
- [23] DESMARCHELIER R, POUMELLE C, BRISSET F, et al. In the heart of femtosecond laser induced nanogratings: from porous nano-planes to form birefringence[J]. World Journal of Nano Science and Engineering, 2015, 5(4):115-125.
- [24] ZIMMERMANN F, PLECH A, RICHTER S, et al. The onset of ultrashort pulse-induced nanogratings[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2):327-334.
- [25] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics Volume, 2008, 2(4) 219-225.
- [26] GLEZER E N, MILOSAVLJEVIC M, HUANG L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials Optics Letters [J]. Optics Letters, 1996, 21(24): 2023-2025.
- [27] RICHTER S, JIA F, HEINRICH M, et al. The role of self-trapped excitons and defects in the formation of nanogratings in fused silica [J]. Optics Letters, 2012, 37(4):482-485.
- [28] 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.
- [29] RICHTER S, PLECH A, STEINERT M, et al. On the fundamental structure of femtosecond laser-induced nanogratings[J]. Laser Photonics Review, 2012, 6(6):787-792.
- [30] ZHANG J, GECEVICIUS M, BERESNA M, et al. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(3):033901.
- [31] LANCRY M, POUMELLE C, CHAHID-ERRAJI A, et al. Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses[J]. Optical Materials Express, 2011, 1(4):711-723.
- [32] RICHTER S, MIESE C, DÖRING S, et al. Laser induced nanogratings beyond fused silica-periodic nanostructures in borosilicate glasses and ULETM[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(8):1161-1166.
- [33] SHIMOTSUMA Y, ASAI T, SAKAKURA M, et al. Femtosecond-laser nanostructuring in glass[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2014, 9(1):31-36.
- [34] LANCRY M, CANNING J, COOK K, et al. Nanoscale femtosecond laser milling and control of nanoporosity in the normal and anomalous regimes of GeO₂-SiO₂ glasses[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(2):321-326.
- [35] FEDOTOV S S, DREVINSKAS R, LOTAREV S V, et al. Direct writing of birefringent elements by ultrafast laser nanostructuring in multicomponent glass[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(7): 71905.
- [36] LOTAREV S V, LIPATIEV A S, FEDOTOV S S, et al. Laser writing of polarization-sensitive birefringence in sodium-borosilicate glass [J]. Glass & Ceramics, 2019, 76(3-4):85-88.
- [37] WANG Y T, WEI S, CICCONE M R, et al. Femtosecond laser direct writing in SiO₂-Al₂O₃ binary glasses and thermal stability of Type II permanent modifications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020, 103(8):4286-4294.
- [38] XIE Q, Maxime C, Bertrand P, et al. Application and validation of a viscosity approach to the existence of nanogratings in oxide glasses [J]. Optical Materials, 2022, 130:112576.
- [39] XIE Q, CAVILLON M, POUMELLE C, et al. On the formation of nanogratings in commercial oxide glasses by femtosecond laser direct writing[J]. Nanomaterials, 2022, 12(17):2986.
- [40] YAO H, XIE Q, CAVILLON M, et al. Volume nanogratings inscribed by ultrafast IR laser in alumino-borosilicate glasses[J]. Optics Express, 2023, 31(10):15449-15460.

- [41] 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.
- [42] LIAO Y, NI J, QIAO L, et al. High-fidelity visualization of formation of volume nanogratings in porous glass by femtosecond laser irradiation[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 329-334.
- [43] DAI Y, WU G R, LIN X, et al. Femtosecond laser induced rotated 3D self-organized nanograting in fused silica[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18072-18078.
- [44] SHIMOTSUMA Y, SAKAKURA M, KAZANSKY P G, et al. Ultrafast manipulation of self-assembled form birefringence in glass[J]. *Advanced Materials*, 2011, 22(48): 4039-4043.
- [45] ZHANG J, GECEVICIUS M, BERESNA M, et al. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(3): 033901.
- [46] SAKAKURA M, LEI Y, WANG L, et al. Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 10.
- [47] WANG H, LEI Y, 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.
- [48] RICHTER S, HEINRICH M, ZIMMERMANN F, et al. Nanogratings in Fused Silica: Structure, Formation and Applications. In: *Progress in Nonlinear Nano-Optics*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015 49-71.
- [49] ZHANG F, YU Y, CHENG C, et al. Fabrication of polarization-dependent light attenuator in fused silica using a low-repetition-rate femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2212-2214.
- [50] BERESNA M, GECEVICIUS M, KAZANSKY P G, et al. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 233901.
- [51] ZHANG F T, CERKAUSKAITE A, DREVINSKAS R, et al. Microengineering of optical properties of GeO₂ glass by ultrafast laser nanostructuring[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(23): 1700342.
- [52] DREVINSKAS R, KAZANSKY P G. High-performance geometric phase elements in silica glass[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(6): 66104.
- [53] LU J F, DAI Y, LI Q, et al. Fiber nanogratings induced by femtosecond pulse laser direct writing for in-line polarizer[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(3): 908-914.
- [54] WANG M, ZHAO K, WU J, et al. Femtosecond laser fabrication of nanograting-based distributed fiber sensors for extreme environmental applications[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(2): 025401.
- [55] LU J, TIAN J, POUMELLE B, et al. Tailoring chiral optical properties by femtosecond laser direct writing in silica[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 13.
- [56] LIAO Y, CHENG Y, LIU CH G, et al. Direct laser writing of sub-50 nm nanofluidic channels buried in glass for three-dimensional micro-nanofluidic integration[J]. *Lab on A Chip*, 2013, 13(8): 1626-1631.
- [57] PAIÈ, PETRA, BRAGHERI F, et al. Straightforward 3D hydrodynamic focusing in femtosecond laser fabricated microfluidic channels[J]. *Lab on A Chip*, 2014, 14(11): 1826-1833.

(责任编辑:刘庆松)