

飞秒激光在不同羟基浓度纯石英玻璃内部 诱导缺陷研究

黄媛媛^{1,2,3}, 钱 静^{2,3}, 邵冲云^{3,4}, 李虹瑾^{2,3}, 戴 晔¹, 赵全忠²

¹上海大学物理系, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元技术研发中心, 上海 201800

摘要 采用飞秒激光脉冲辐照不同羟基浓度的纯石英玻璃, 诱导其内部产生缺陷。系统研究了羟基浓度、激光脉宽和激光功率对缺陷类型和浓度的影响。石英玻璃的显微荧光谱、吸收谱和发射谱测试表明, 飞秒激光诱导石英玻璃可以产生非桥氧空穴中心(NBOHC)、非弛豫氧空位[ODC(II)]和E'心3种缺陷; 低羟基浓度石英玻璃易产生ODC(II)缺陷, 高羟基浓度石英玻璃易产生NBOHC缺陷。用波长为254 nm的紫外灯激发飞秒激光辐照后的高羟基浓度石英玻璃可观察到明显的红色荧光(波长为650 nm), 其发光强度与飞秒激光的脉宽和功率相关, 发光强度随激光脉宽的增加先增加后减小, 随激光功率的增加先增加后趋于平缓。

关键词 激光制造; 飞秒激光; 激光与物质相互作用; 荧光; 羟基; 纯石英玻璃; 缺陷

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0102011

Femtosecond Laser Induced Defects in Pure Silica Glass with Different Hydroxyl Concentrations

Huang Yuanyuan^{1,2,3}, Qian Jing^{2,3}, Shao Chongyun^{3,4}, Li Hongjin^{2,3},
Dai Ye¹, Zhao Quanzhong²

¹Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Research and Development Center of High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The internal defects are induced by irradiating pure silica glass with different hydroxyl concentrations by femtosecond laser pulses. Influences of hydroxyl concentration, laser pulse width and laser power on the type and concentration of defects are systematically investigated. The micro fluorescence spectra, absorption and emission spectra of silica glass show that the tested samples produce three kinds of defects including non-bridging oxygen hole center (NBOHC), non-relaxation oxygen deficient center [ODC(II)] and E' center. ODC(II) defect is easier to be induced when the hydroxyl concentration is lower, while NBOHC defect is easier to be induced when the hydroxyl concentration is higher. The obvious red fluorescence (650 nm) under ultraviolet lamp excitation (254 nm) in

收稿日期: 2016-08-23; 收到修改稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(11374316)

作者简介: 黄媛媛(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲激光诱导荧光方面的研究。

E-mail: 1587061234@qq.com

导师简介: 赵全忠(1974—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光微纳加工方面的研究。

E-mail: zqz@siom.ac.cn(通信联系人)

irradiated glass with high OH content can be observed. It is found that red fluorescence (650 nm) intensity closely depends on the laser pulse width and laser power, to be specific, it increases at first and then decreases with the increase of laser pulse width, and increases at first and then tends to slow with the increase of laser power.

Key words laser manufacturing; femtosecond laser; interaction between laser and matter; fluorescence; hydroxyl; pure silica glass; defect

OCIS codes 140.3390; 320.7090; 160.2220

1 引 言

玻璃材料广泛应用于高科技产品中,与晶体材料相比,成本更低,可选择不同的折射率并获得各种几何形状。在众多玻璃材料中,二氧化硅玻璃材料在中红外范围有极好的透明度,稳定的机械、化学性能使其成为制作远程低损耗通信光纤所必需的材料。二氧化硅在紫外和真空紫外区域具有高透明度,这一性质使其成为紫外光学和高功率脉冲激光光学领域最优秀的玻璃材料^[1]。此外,二氧化硅还可应用于制作紫外、深紫外(光波长范围在 190~248 nm 之间)及真空紫外(光波长小于 190 nm)的窗口材料、透镜等。然而,材料中点缺陷的存在降低了其光学透明度,其产生的光学吸收还会导致光纤材料的损耗增大^[2]。这些缺陷或来自于制作过程,或通过电离或粒子辐照产生。为减少缺陷的数量,需分清缺陷类型并知晓缺陷产生的原因。文献[3]研究了近红外飞秒激光照射石英玻璃时诱导的缺陷。他们在飞秒激光照射石英玻璃后观察到 3 个光致发光峰,其中 650 nm(1.9 eV)峰属于非桥氧空穴中心(NBOHC),470 nm(2.7 eV)和 290 nm(4.4 eV)属于非弛豫氧空位[ODC(II)]。从无缺陷的石英玻璃中生成 ODC(II)可推测出间隙氧分子的存在。飞秒激光照射诱导的损伤机制以强烈的辐射分解过程为特征,其中氧原子在电子激发的衰退过程中被取代。间隙氧在缺陷转化过程中起到了重要作用。除飞秒激光外, γ 射线^[4]、X射线、紫外光^[5]、机械应力^[6]等也都会使石英玻璃产生缺陷。缺陷的产生并非毫无价值,若应用得当,石英玻璃中的缺陷也可以成为一种优势。2011年,文献[7]巧妙地利用飞秒激光照射石英玻璃产生的缺陷制作了隐形二维码,用于防伪技术。文献[8]对飞秒激光在不同羟基浓度的纯石英玻璃中诱导缺陷的机制进行了解释,他们认为飞秒激光照射含羟基的石英玻璃后,玻璃内部经过脱羟基产生边共享四面体单元,形成的二元环断裂导致 E'心和 NBOHC 两种缺陷。通过紫外光激发,打开的二元环结构再次闭合,由结构弛豫过程观察到红色的光致发光过程。

本文研究了飞秒激光诱导纯石英玻璃产生缺陷的过程。讨论了飞秒激光作用后的纯石英玻璃在 254 nm 紫外灯照射下的荧光强度与飞秒激光脉宽之间的关系,并详细分析了荧光产生原因。样品的荧光谱和吸收谱表明,经激光照射后的样品中产生了 NBOHC、ODC(II)和 E'心 3 种缺陷。该结果在防伪和生物医学领域具有重要的应用前景。

2 实 验

激光器采用光谱物理公司的钛宝石飞秒激光系统,中心波长为 787 nm,重复频率为 1 kHz,输出最大单脉冲能量为 1 mJ。激光脉冲能量通过衰减片(Thorlabs NDC-100C-4M)调节,焦点位置由三维可移动平台控制。光路中的空间滤波系统可以对光斑进行空间整形,整形后的激光经过显微镜聚焦于样品内部。通过 CCD 实时观测样品形貌。样品采用 Tosoh Quartz 公司的 ES、ED-A 和 ED-B 高纯度石英玻璃。根据 Lambert-Beer 定律,用光谱仪(Nicolet 6700 FT-IR)测得 ES、ED-A、ED-B 玻璃的羟基浓度分别为 1.214×10^{-3} 、 8.2×10^{-5} 、 1×10^{-5} 。将 ES、ED-A、ED-B 玻璃分别命名为高、中、低羟基浓度玻璃。样品均被六面抛光。用 HORIBA Jobin Yvon 公司生产的多功能成像高分辨光谱仪(iHR550)检测样品的显微荧光光谱,美国 PERKINELMER 公司的 Lambda 1050 UV/VIS/NIR 分光光度计测试样品被飞秒激光辐照前后的吸收光谱,Edinburgh Instruments 公司生产的 FLSP920 全功能型荧光光谱仪测试样品的发射谱。实验均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 羟基浓度对石英玻璃光谱性能的影响

图 1 为激光辐照前后不同羟基浓度纯石英玻璃的吸收谱。红色实线、黑色虚线、蓝色点划线分别为辐照

后的高、中、低羟基浓度石英玻璃,绿色点线为辐照前的高羟基浓度石英玻璃。对比辐照前后的石英玻璃发现,与未经激光加工的高羟基纯石英玻璃相比,激光辐照后的样品(高、中、低羟基纯石英玻璃)中出现了2个明显的峰位,分别在214 nm(5.8 eV)和258 nm(4.8 eV)附近,其中258 nm处为1个尖峰。本实验采用高纯度样品,内部杂质较少,因此杂质的含量不会影响本次测量结果。214 nm(5.8 eV)的吸收峰可归结于E'心的出现,E'心是一种顺磁性缺陷,在5.8 eV处存在吸收峰,且无发射峰。由插图可见,在630 nm附近也存在1个吸收峰,该吸收峰可归结为NBOHC缺陷^[9]。对比辐照后的高、中、低羟基浓度的石英玻璃在214 nm处的吸收峰可以发现:羟基浓度越大,此处的吸收峰峰值也越大,可见羟基浓度对激光作用下缺陷的产生具有十分重要的作用。

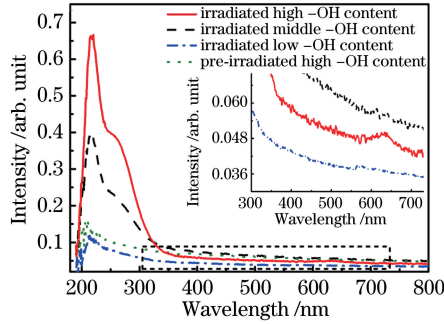


图1 激光辐照前后不同羟基浓度石英玻璃的吸收谱。插图为短划线部分的放大图(除绿色点线外)

Fig. 1 Absorption spectra of silica glass with different hydroxyl concentrations before and after laser irradiation.

The inset is an enlarged view of short dash line (except green dot line)

图2为激光辐照后不同羟基浓度纯石英玻璃的发射谱,激发波长为248 nm。蓝色点划线、黑色虚线、红色实线分别为低、中、高羟基浓度石英玻璃的发射谱。用248 nm(5.0 eV)波长激发时,中、高羟基浓度的石英玻璃在290 nm(4.3 eV)、470 nm(2.7 eV)和650 nm(1.9 eV)处产生了非常明显的荧光峰;低羟基浓度的石英玻璃在290 nm(4.3 eV)和470 nm(2.7 eV)处出现了明显的荧光峰。由此可见,在中、高羟基浓度的石英玻璃中出现了NBOHC和ODC(II)两种缺陷;低羟基浓度的石英玻璃中出现了ODC(II)。NBOHC是一种顺磁性缺陷,在4.8 eV处有1个吸收峰,用4.8 eV的光能激发出以1.9 eV为中心波长的荧光谱带^[9]。ODC(II)与弛豫氧空位[ODC(I)]合称为氧空位(ODCs),属于弗伦克尔缺陷。用近红外/可见飞秒激光脉冲可在石英中诱导出吸收带为5.0 eV、荧光带为4.4 eV、2.7 eV的ODC(II)缺陷^[9]。此外,对于580 nm(2.1 eV)处出现的峰值,目前有2种不同的解释:由ODC(II)缺陷的二次衍射引起^[9];由E'心缺陷的存在引起^[10-11]。

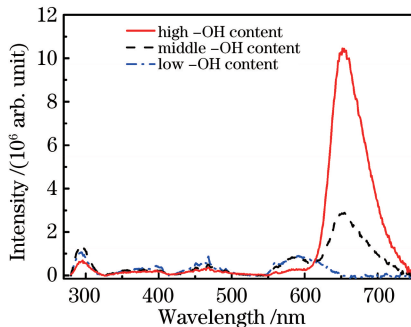


图2 不同羟基浓度纯石英玻璃辐照后的发射谱,激发波长为248 nm

Fig. 2 Emission spectra of pure silica glass with different hydroxyl concentrations after irradiation, and the excitation wavelength is 248 nm

图3为激光辐照后的不同羟基浓度纯石英玻璃的发射谱,激发波长为258 nm。红色实线、黑色虚线、蓝色点划线分别为高、中、低羟基浓度石英玻璃的发射谱。样品经飞秒激光辐照后,经258 nm波长光的激发,中、高羟基浓度的石英玻璃的发射谱带中,在290 nm(4.3 eV)、470 nm(2.6 eV)和650 nm(1.9 eV)处存在明显的荧光峰;低羟基浓度石英玻璃中在290 nm(4.3 eV)和470 nm(2.6 eV)处也存在明显的荧光峰。说明在

石英玻璃中出现了 NBOHC、ODC(II) 两种缺陷。图 1 的吸收谱在 258 nm 附近只有 1 个尖峰,但是从此处的分析可知,除 NBOHC 以外,辐照后的玻璃中也产生了 ODC(II),而 ODC(II) 缺陷的吸收峰在 248 nm (5.0 eV) 处,因此 248 nm 处的峰值可能由于与 258 nm 的峰值过于接近而被掩盖了。

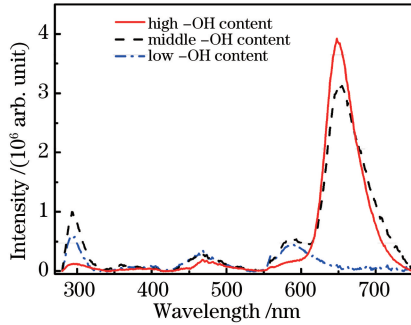


图 3 不同羟基浓度纯石英玻璃的发射谱,激发波长为 258 nm

Fig. 3 Emission spectra of pure silica glass with different hydroxyl concentrations, and the excitation wavelength is 258 nm

结合图 2、图 3 发现,中、低羟基浓度石英玻璃在 290 nm(4.4 eV) 和 470 nm(2.7 eV) 处发射峰强度比高羟基浓度石英玻璃在此处的发射峰强度大,而高羟基浓度的石英玻璃在 650 nm(1.9 eV) 处的发射峰强度比中、低羟基浓度石英玻璃在此处的发射峰强度大。此现象说明:在激光辐照纯石英玻璃的过程中,羟基浓度较低时更易诱导出 ODC(II) 缺陷;羟基浓度较高时更易诱导出 NBOHC 缺陷。可见羟基浓度在激光诱导缺陷的产生过程中起着至关重要的作用。目前,已有多篇文献就羟基浓度在缺陷形成过程中所起的作用进行了讨论。文献[8]认为在激光辐照过程中,高羟基含量石英玻璃的羟基结构通过脱羟基产生边共享四面体单元,从而参与了缺陷的形成过程。文献[4]将石英样品的照射过程归结为可逆反应“ $\equiv\text{Si}\cdot + \equiv\text{Si}-\text{OH} \rightleftharpoons \equiv\text{Si}-\text{O}\cdot + \equiv\text{Si}-\text{H}$ ”。羟基浓度较高、较低时主反应分别为正、逆反应,导致不同羟基浓度玻璃照射后的羟基浓度增加或减小。文献[12]发现, F_2 激光照射石英玻璃时显著改变了 SiOH 组的化学键结构, SiOH 键合从自由态改变到了氢键态,说明电子激发 SiOH 组使其周围一定的结构发生了改变。

3.2 激光脉宽与功率对红色荧光的影响

图 4 为 254 nm 的紫外灯照射下,飞秒激光辐照后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光光谱。由 3.1 节可知,高羟基浓度纯石英玻璃在激光辐照下更易产生 NBOHC,其在 254 nm 的紫外灯照射下可产生 650 nm 的红色荧光。将激光聚焦于样品内部 750 μm 处,以 500 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的速度进行扫描,扫描完后再用波长为 254 nm(4.9 eV) 的紫外灯进行照射,发现高、中羟基浓度纯石英玻璃都发出明显的红光。用显微光谱仪检测发现,该红光的波长约为 650 nm(1.9 eV),如图 4 所示。处于缺陷能级的电子吸收到外界的能量(如紫外光)后,将会跃迁到导带,进而从导带跃迁下来与空穴复合,产生红光。

图 5 为 254 nm 紫外灯照射加工后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光强度随激光脉宽的变化关系,对应的激光功率为 9 mW。通过改变压缩光栅的距离调节飞秒激光脉宽大小,并用自

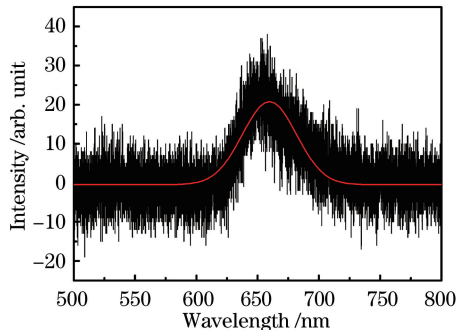


图 4 254 nm 紫外灯照射飞秒激光辐照后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光光谱

Fig. 4 Fluorescence spectra at 650 nm center wavelength of pure silica glass with high hydroxyl concentration irradiated by ultraviolet lamp of 254 nm after femtosecond laser irradiation

相关仪测量脉宽。由图 5 可知,红色荧光强度先随脉宽的增加而增加,当脉宽在 253 fs 左右时达到最大值,而后随脉宽的继续增加而减小。飞秒脉冲具有高峰值功率、高场强的特点,当飞秒脉冲聚焦于玻璃内部时,伴随超连续谱的产生,在光致电离、雪崩电离和电子空穴复合的综合作用下,玻璃内部可形成大量的自由电子。北京大学的蒋红兵等^[13]认为脉冲时间各点功率密度会随超短激光脉宽的变化而变化,并进一步引起电离机制的变化。脉宽不同,多光子电离与雪崩电离所起的作用不同。多光子电离与光强密切相关,因此电子的产生主要发生在脉冲的峰值位置,而脉宽越短,峰值功率越高,多光子机制就越明显^[14-15]。尽管如此,雪崩电离在加工过程中仍占据主导地位。在 0.1~1 ps 范围内,电子密度随脉宽的减小而增大。电子密度越大,产生缺陷的可能性就越大。结合图 5 中荧光强度的变化趋势,可以做出合理的解释:缺陷能级可容纳的电子数是有限的,因而缺陷浓度不可能随着由于脉宽减小而产生的越来越多的电子数而无限增加;脉宽较大时产生的电子密度较小,因而缺陷浓度较小,随脉宽的缩短电子密度变大,缺陷浓度随之增加,并在 253 fs 左右达到最大值,进一步减小脉宽时大量电子产生大量的缺陷,过大的缺陷浓度可能使样品内部产生浓度淬灭,荧光强度减小。另一方面,电子浓度相对较大时产生的等离子体密度过大,对激光产生屏蔽效应,透射率降低,阻碍了激光对样品内部的进一步照射,产生的电子密度减少,样品内部的缺陷浓度也随之下降。

图 6 为 254 nm 紫外灯照射加工后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光强度随激光功率的变化关系,对应的激光脉宽为 253 fs。由图可见,在 254 nm 紫外灯照射下产生的红色荧光强度随着激光功率的增加先增加后趋于平缓。在激光辐照下,纯石英玻璃内的电子数密度随着激光功率的增加而逐渐变大,处于激发态的电子破坏玻璃的内部结构而产生缺陷。功率越大,电子密度越大,产生的缺陷越多。但是,当电子密度达到一定数值时,产生的等离子体云将对入射激光产生屏蔽作用,或者由于缺陷的浓度淬灭,缺陷浓度无法随着激光的增大而无限增大。由此可见,产生红色荧光的最优条件是激光脉宽约 253 fs,激光功率约 13 mW。

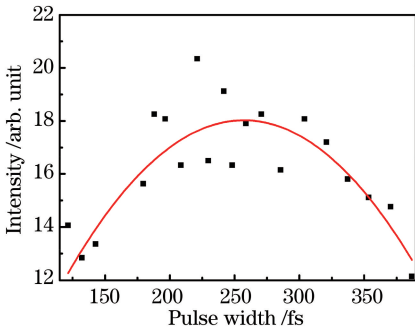


图 5 254 nm 紫外灯照射飞秒激光辐照后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光强度随激光脉宽的变化,对应的激光功率为 9 mW

Fig. 5 Fluorescence intensity variation at 650 nm center wavelength of pure silica glass with high hydroxyl concentration irradiated by ultraviolet lamp of 254 nm with pulse duration after femtosecond laser irradiation, and the corresponding laser power is 9 mW

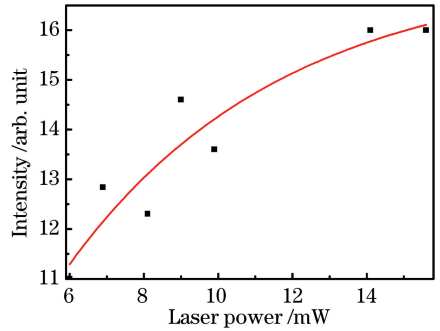


图 6 254 nm 紫外灯照射飞秒激光辐照后的高羟基浓度纯石英玻璃产生的中心波长为 650 nm 的荧光强度随激光功率的变化,对应的激光脉宽为 253 fs

Fig. 6 Fluorescence intensity variation at 650 nm center wavelength of pure silica glass with high hydroxyl concentration irradiated by ultraviolet lamp of 254 nm with laser power after femtosecond laser irradiation, and the corresponding pulse width is 253 fs

3.3 红色荧光应用

作为制作光纤的重要材料,了解并降低石英玻璃内部产生的缺陷对于提高光纤的光传输效率具有非常重要的影响。然而,在防伪和生物医学领域,纯石英玻璃中的点缺陷却有着特殊的价值。图 7(a)为激光加工后的高羟基纯石英玻璃,加工后的石英玻璃仍为透明状,若用 254 nm 的紫外灯照射,可清晰地看到图中的二维码,在防伪领域有着巨大的潜在应用价值。图 7(b)的制作原理与图 7(a)相同,阵列中每个点的大小都在微米量级,与芯片实验室的大小在同一个量级。芯片实验室主要可分为 3 层,中间层的液体被夹在上下两层平行板之间。下底板为芯片表面,覆盖了可寻址电极阵列。上底板是一块连续接地板或无源平板(上底板的性质由芯片的特性决定)^[16]。芯片实验室^[17-19]可大致分为生物亲和芯片、微流控芯片和细胞芯片,它将

一个化学生物实验室按比例缩小并集成到芯片尺度,为化学生物过程提供了微平台。所有的操作均可在一块微小的芯片上完成,为样品的检测节省了空间、时间和经济成本。

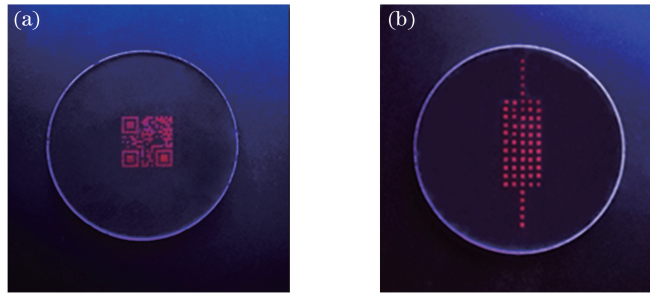


图7 红色荧光的应用。(a) 红色荧光二维码;(b) 红色荧光阵列

Fig. 7 Application of red fluorescence. (a) Red fluorescent two-dimensional code; (b) red fluorescent array

此处所制作的在紫外灯照射下发红色荧光的阵列,可用于检测芯片实验室中的液体性质。将该阵列放置于芯片实验室正上方,其在紫外灯照射下发出红色荧光,根据芯片实验室中不同位置的待检测样品对红色荧光的不同吸收度,可对样品进行一定判断。

4 结 论

用近红外飞秒激光辐照不同羟基浓度的纯石英玻璃,其呈现光致发光现象。荧光谱和吸收谱显示经飞秒激光照射后的样品中产生了 NBOHC、ODC(II) 和 E' 心 3 种缺陷。石英玻璃的荧光强度对其内部的羟基浓度具有强烈的依赖作用。在近红外飞秒激光辐照下,石英玻璃的羟基浓度越高,越易形成 NBOHC 缺陷;羟基浓度越低,越易形成 ODC(II) 缺陷。用 254 nm 的紫外灯照射加工后的高羟基浓度纯石英玻璃样品,样品发出红色荧光,且该荧光的强度随脉宽的增加先增加后减小,随激光功率的增加先增加后趋于不变,这与玻璃中产生的电子密度的变化、等离子体云的形成及浓度淬灭有关,最佳激光脉宽和功率分别约为 253 fs 和 13 mW。该研究结果在防伪、生物医学等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Skuja L, Hirano M, Hosono H, *et al.* Defects in oxide glasses[J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2005, 2(1): 15-24.
- [2] Hibino Y, Hanafusa H. Defect structure and formation mechanism of drawing-induced absorption at 630 nm in silica optical fibers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(5): 1797-1801.
- [3] Sun H B, Juodkakis S, Watanabe M, *et al.* Generation and recombination of defects in vitreous silica induced by irradiation with a near-infrared femtosecond laser[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104(15): 3450-3455.
- [4] Liu S, Zheng S P, Yang K, *et al.* Radiation-induced change of OH content in Yb-doped silica glass[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(6): 060602.
- [5] Eboroff-Heidepriem H, Ehrt D. Ultraviolet laser and X-ray induced valence changes and defect formation in europium and terbium doped glasses[J]. *Physics and Chemistry of Glasses*, 2002, 43C: 38-47.
- [6] Kawaguchi Y. OH-content dependence of fractoluminescence spectra in silica glass[J]. *Physical Review B*, 1996, 54(14): 9721-9725.
- [7] Kawashima H, Yamaji M, Suzuki J, *et al.* Invisible two-dimensional barcode fabrication inside a synthetic fused silica by femtosecond laser processing using a computer-generated hologram[C]. *SPIE*, 2011, 7925: 79251C.
- [8] Qiu J B, Makishima A, Uchino T, *et al.* Ultrashort-pulse-laser-induced fine structure in synthetic fused silicas[C]. *SPIE*, 2004, 5350: 281-288.
- [9] Skuja L, Hosono H, Hirano M, *et al.* Laser-induced color centers in silica[C]. *SPIE*, 2001, 4347: 155-168.
- [10] Vanheusden K, Stesmans A. Characterization and depth profiling of E' defects in buried SiO₂ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(1): 275-283.
- [11] Nishikawa H, Watanabe E, Ito D, *et al.* Visible photoluminescence from Si clusters in γ -irradiated amorphous SiO₂ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(6): 3513-3517.
- [12] Hosono H, Mizuguchi M, Kawazoe H, *et al.* Effects of fluorine dimer excimer laser radiation on the optical

- transmission and defect formation of various types of synthetic SiO₂ glasses[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(19): 2754-2757.
- [13] Jiang Hongbing, Wu Chaoxin, Gong Qihuang. Interaction between femtosecond laser and quartz glass[C]. Strong Field Laser Physics-Proceedings of CCAST (World Laboratory) Workshop, 2002: 85-98.
蒋红兵, 吴朝新, 龚旗煌. 飞秒激光与石英玻璃的相互作用[C]. “2002年全国强场激光物理”研讨会, 2002: 85-98.
- [14] 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.
- [15] Tien A, Backus S, Kapteyn H, *et al.* Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(19): 3883-3886.
- [16] Fair R B. Digital microfluidics: Is a true lab-on-a-chip possible?[J]. Microfluid and Nanofluid, 2007, 3(3): 245-281.
- [17] Baraket A, Lee M, Zine N, *et al.* A flexible electrochemical micro lab-on-chip: Application to the detection of interleukin-10[C]. 7th International Workshop on Biosensors for Food Safety and Environmental Monitoring, 2016, 183(7): 2155-2162.
- [18] Li P, Zheng L, Zhang D, *et al.* Investigation of high-speed erythrocyte flow and erythrocyte-wall impact in a lab-on-a-chip[J]. Artificial Organs, 2016, 40(11): E203-E218.
- [19] Uludag Y, Narter F, Saglam E, *et al.* An integrated lab-on-a-chip-based electrochemical biosensor for rapid and sensitive detection of cancer biomarkers[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2016, 408(27): 7775-7783.