

doi:10.3788/gzxb20184708.0847013

半球空腔约束对激光诱导玻璃等离子体辐射增强特性的研究

王静鸽, 李小龙, 胡俊涛, 李新忠

(河南科技大学 物理工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要:为了增强激光诱导玻璃等离子体的辐射光谱信号,采用直径为 10 mm 的玻璃纤维材质半球空腔对等离子体进行束缚,对比研究了无约束和约束两种实验条件下的辐射光谱信号.由于激光的聚焦情况对玻璃等离子体特性有较大影响,实验首先对激光在样品中的聚焦位置进行了优化,结果表明当样品表面位于透镜焦平面以上 3 mm 处时激光诱导玻璃等离子体辐射光谱最强.然后采用时间分辨光谱对比研究了无约束和半球空腔约束下光谱强度的时间演变规律,并分析了谱线强度增大倍数的时间演变,结果表明在等离子体产生后 6~15 μs 的时间内,半球空腔约束下谱线强度呈现出增强的现象,且具有不同能级的谱线增强程度不同,当采集延时为 10 μs 时具有最优增强效果.最后研究了激光能量对半球空腔约束下等离子体辐射增强效果的影响,研究结果表明,随着激光能量增大,谱线增强倍数逐渐增加,当激光能量超过 170 mJ 以后,谱线增强效果开始下降.

关键词:激光诱导等离子体;半球空腔约束;光谱增强;时间演变;玻璃

中图分类号:O433.4;O531

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0847013-7

Effects of Hemispherical Confinement on the Enhancement of Laser-induced Glass Plasma Radiation

WANG Jing-ge, LI Xiao-long, HU Jun-tao, LI Xin-zhong

(School of Physics and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: In order to enhance the radiation spectrum signal of laser-induced glass plasma, a hemispherical cavity which was made of glass fiber with a diameter of 10 mm was used to confine the plasma. The spectrum signals with confinement and without confinement were compared. Since the focusing of the laser has a great influence on the properties of the glass plasma, the focusing position of the laser in the sample was first optimized. The results show that when the sample surface is 3 mm above the focal plane of the lens, the spectral signal from the laser-induced glass plasma was the strongest. Then the temporal evolution of spectral intensity under unconstrained and spatially constrained by a hemispherical cavity with the inner diameter of 10 mm was studied. The time evolution of the enhancement factor of the spectral intensity was analyzed. The results show that the spectral lines with confinement presents an enhanced phenomenon in the period of 6~15 μs after plasma generation. And the degree of enhancement of spectral lines with different energy levels is different. The maximum enhancement is achieved when the acquisition delay is 10 μs . Finally, the effect of laser energy on the enhancement of plasma radiation was studied. The results show that with the increase of laser energy, the enhancement factor of the spectral line is gradually increased. When the laser energy exceeds 170 mJ, the spectral enhancement effect begins to decrease.

Key words: Laser-induced plasma; Hemispherical cavity confinement; Spectral enhancement; Time

基金项目:国家自然科学基金(No.11504091)资助

第一作者:王静鸽(1987-),女,讲师,博士,主要研究方向为激光诱导击穿光谱技术的应用. Email: wangjingge1987@126.com

收稿日期:2018-06-28;录用日期:2018-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

evolution; Glass

OCIS Codes: 300.2140; 300.6210; 300.6365; 300.6500

0 引言

激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术以其无需样品预处理、分析速度快、能实现多元素同时检测和远程分析等优点在工业过程控制^[1]、环境污染检测^[2]、农产品检测^[3]、空间勘探^[4]、考古研究^[5]等领域得到广泛应用.该技术采用聚焦后具有高能量密度的脉冲激光束直接轰击样品表面,形成高温、高压和高电子密度的等离子体,用高灵敏度的光谱仪对等离子体光辐射进行探测和光谱分析,就可以得到被测样品的成分、含量等信息.

LIBS用于玻璃样品成分的分析已经有过很多报道.BRIDGE等^[6]对比了LIBS和电感耦合等离子体质谱法对23种汽车浮法玻璃的检测能力,结果表明利用LIBS技术可以实现对浮法玻璃较准确的分析;CARMONA等^[7]利用LIBS技术分析不同类型的玻璃中的铅元素,结果表明通过实验光谱可以确定和评估玻璃的腐蚀类型和程度;JUNG等^[8]采用LIBS技术对玻璃基体中的微量元素U和Eu进行了定量分析,他们采用深紫外波长的激光诱导玻璃样品,两种元素的检测限分别达到150和4.2 ppm;CHOI等^[9]优化了采用LIBS对玻璃基体中的铀进行痕量分析时的谱线选择和关键实验参数;李超等^[10]利用LIBS技术结合无标定量分析方法实现了对玻璃中Si和Ba的定量分析.尽管LIBS技术已经被广泛应用于不同类型玻璃样品的成分分析,但是实际应用中该技术还面临着很多限制,如检测限和分析精度有限、信号重复性和稳定性较差等.大量的研究表明光谱信号增强是提高LIBS技术分析性能的有效手段之一,能够实现光谱信号增强的方法主要有双脉冲激发、等离子体空间束缚、LIBS与其他技术联用等.MATIASKE等^[11]采用一套双脉冲LIBS系统在工作距离为75 cm处对熔融玻璃进行远程定量检测,Mn和Zn的检测限可以分别达到7 ppm和194 ppm;李嘉铭等^[12]采用激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱的方法对有源发光玻璃中的微量元素进行检测,研究结果表明两种方法联用可以使元素的谱线强度提高8~50倍.无论采用双脉冲激发还是LIBS与其他技术联用,都会导致实验系统变得较为复杂,且设备的成本大幅增加.

对激光诱导等离子体进行空间束缚也可以有效提高光谱信号强度,空间约束方法实施简便且效益高,目前等离子体空间束缚主要包括平行板束缚^[13]、圆柱空腔束缚^[14-15]和半球空腔束缚^[16-17],由于半球空腔可以实现对等离子体的三维空间约束,进而可以使等离子体辐射得到有效增强.本文采用半球空腔对激光诱导玻璃等离子体进行空间约束,研究半球空腔约束对等离子体辐射信号的增强特性,为了得到较可靠的光谱信号,论文首先对激光的聚焦情况进行了优化,然后研究了半球空腔约束下光谱信号的时间演变,最后研究了激光能量对辐射增强特性的影响.

1 实验装置

激光诱导击穿光谱实验装置如图1所示.采用波长为1 064 nm,脉冲宽度为8 ns的Nd:YAG激光器,设置重复频率为2 Hz.单脉冲激光能量调节范围为20~200 mJ,经过焦距为100 mm的平凸石英透镜聚焦后穿过半球形空腔顶部的小孔垂直入射到玻璃样品表面,聚焦透镜固定在高精度平移台上,通过改变透镜的位置可以实现激光聚焦情况的调节,半球形空腔粘合在玻璃样品表面,由玻璃纤维材质加工而成.玻璃样品经过高能量密度的激光烧蚀在半球形空腔中心处产生等离子体羽,等离子体辐射光通过焦距为10 mm的透镜聚焦至传输光纤端面,其中光纤端面垂直于样品表面.传输光纤被固定在二维高精平移台上并与中阶梯光栅光谱仪连接,以便将进入到传输光纤的等离子体辐射光耦合进光谱仪.进入到光谱仪的等离子体辐射光经过分光后通过增强型CCD(ICCD)进行光电转换,最后在计算机上显示光谱信息.实验中采用的中阶梯光谱仪为Andor ME5000,其光谱响应范围为230~920 nm,分辨能力为5000.ICCD的像素为1 024×1 024 pixel,具有ns量级的时间分辨能力.

实验样品是一块厚度为10 mm的透明玻璃,实验通过在玻璃样品表面固定半球形空腔约束,从而对激光烧蚀产生的等离子体羽进行辐射信号增强.半球形空腔尺寸为12 mm×12 mm×6 mm,内部直径为10 mm,在激光束入射方向有直径为3 mm的圆形孔,侧面有一个高2.5 mm,半径1.5 mm的直槽口.实验在

空气环境中将激光束经透镜聚焦后从半球形空腔顶部的圆形孔垂直入射到样品表面,产生的等离子体辐射光通过半球形空腔侧面的直槽口聚焦到光纤。

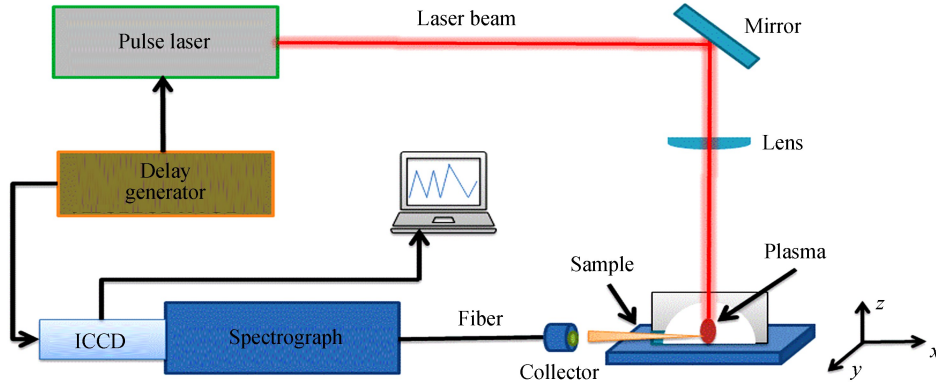


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

2 实验结果与分析

2.1 激光聚焦位置的优化

在玻璃样品激发的过程中发现入射激光很容易穿透玻璃样品打至样品台,以至于收集不到有效的玻璃等离子体辐射信号,只有聚焦位置合适时,才能观测到玻璃等离子体的辐射信号,激光的聚焦情况对光谱信号有较大影响,因此有必要对激光的聚焦位置进行优化,本文中以透镜到样品表面的距离(Lens-To-Sample Distance, LTSD)为参数在无约束的实验系统下来优化激光聚焦情况。

实验中设置激光能量为 150 mJ,ICCD 的采集延时和积分时间均为 $2 \mu\text{s}$,累加次数为 100 次.实验开始前首先用 20 激光脉冲打击样品表面以达到去除表面灰尘的影响,改变透镜到样品的距离,发现当 $\text{LTSD} \geq 96 \text{ mm}$ 时才能采集到玻璃等离子体的辐射信号,因此设置 LTSD 的变化范围为 $96 \sim 106 \text{ mm}$.所用聚焦透镜焦距为 100 mm,可知当 $\text{LTSD} < 100 \text{ mm}$ 时,焦点位于样品表面以下, $\text{LTSD} > 100 \text{ mm}$ 时,焦点位于样品表面以上。

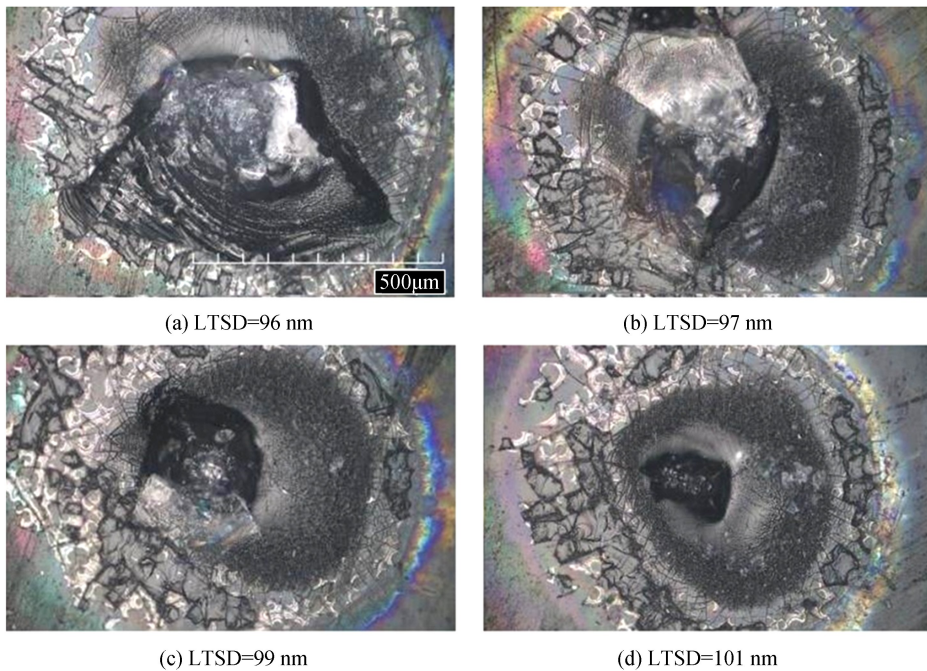


图2 不同聚焦情况下的烧蚀坑形貌

Fig.2 Morphology of ablated holes under different focusing conditions

图2是LTSD为96 mm、97 mm、99 mm和101 mm四个不同聚焦位置下玻璃样品表面的表面形态,可以看出不同的聚焦位置对样品的烧蚀情况有很大影响,随着LTSD的增加,样品表面的烧蚀坑尺寸减小,烧蚀的样品材料质量也相应减小,可以看到图2(a)和(b)的烧蚀坑附近有熔融材料的堆积,而图2(c)和(d)中的烧蚀坑周围更加平整。

选取等离子体辐射光谱中的三条硅原子谱线为分析谱线,分别是Si I: 251.43 nm、Si I: 251.92 nm、Si I: 288.16 nm。图3是谱线强度随着LTSD的变化曲线,大量的文献中已经报道了透镜到样品的距离对等离子体辐射光谱信号的影响机理^[18-20],这里结合变化曲线简单说明。当焦点位置位于样品表面以下(LTSD < 100 mm),随着LTSD的增加,激光能量密度逐渐增加,透射至靶材表面的激光能量增加,因此随着LTSD的增加谱线强度逐渐增大,当LTSD等于99 mm时,谱线强度出现极大值。随着聚焦光斑尺寸继续变小,当能量密度超过临界值后,等离子体密度增加,对于激发脉冲激光而言,等离子体变成了不透明的,造成等离子体屏蔽,此时即使激光能量密度较大,但是透射至靶材的能量减小,因此等离子体的光谱信号强度随着LTSD的增加缓慢变小,当LTSD等于101 mm时,曲线出现极小值。当LTSD > 100 mm,焦点位置处于样品表面以上时,由于焦点在空气中,脉冲激光与空气发生相互作用,在一定程度上加热了样品表面上方的空气,使样品表面上方形成了一个气压相对较低的环境,降低了等离子体的屏蔽效应,因此信号强度随着LTSD的增加又开始逐渐增加,当LTSD大于103 mm以后,由于大部分激光能量在与样品上方空气相互作用时被消耗,所以谱线强度又开始逐渐下降。对于玻璃样品,当聚焦位置在样品表面以下时,激光脉冲很容易穿透样品表面,形成的等离子体在样品内部,因此实验探测到的等离子体信号相对较弱。综合考虑,本文以下的研究中将透镜到样品的距离设置为103 mm。

2.2 半球空腔约束下光谱信号的时间演变

半球空间约束的主要原理是扩散的冲击波经界面反射回去压缩等离子体,为了研究半球空腔约束对玻璃等离子体的增强特性,对比研究了无约束和约束下光谱信号的时间演变特性,实验中激光能量为150 mJ,设置采集延时和积分时间均为2 μ s,延时的步距为1 μ s,采集等离子体演变过程中的20幅图,每幅图由10个激光脉冲累加而成。

图4是Si I: 288.16 nm谱线强度在无约束和半球形空腔约束下的时间演变,可以看出,在无约束情况下,随着采集延时增大,谱线强度呈现迅速衰减的变化规律,当采集延时超过15 μ s后逐渐趋于平缓,这是由于等离子体产生后向外膨胀扩张冷却的结果。采用半球空腔约束时,可以看出,谱线强度呈现出先迅速下降,然后上升,最后再下降的变化规律。这是由于等离子体产生时伴随着冲击波的产生,而冲击波的扩散速度远大于等离子体的扩散速度,半球空腔约束下,冲击波向外扩散被空腔内壁反射,被反射的冲击波向前传播,经过一定的时间后与等离子体相互作用,实现对等离子体进行三维空间的压缩,进而引起了等离子体辐射的增强作用,冲击波与等离子体作用一定时间后,随着等离子体的逐渐消散,两者之间的相互作用逐渐减弱,使得半球空腔约束下谱线强度最后又呈现出下降的趋势。由图4可以看出,当采集延时小于6 μ s,无约束和半球空腔约束下的谱

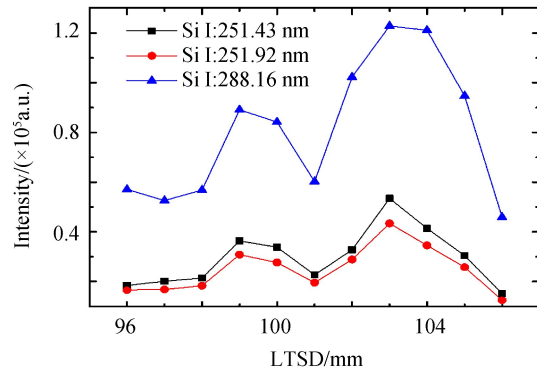


图3 光谱信号强度随LTSD的变化
Fig.3 The intensities of spectral lines as a function of LTSD

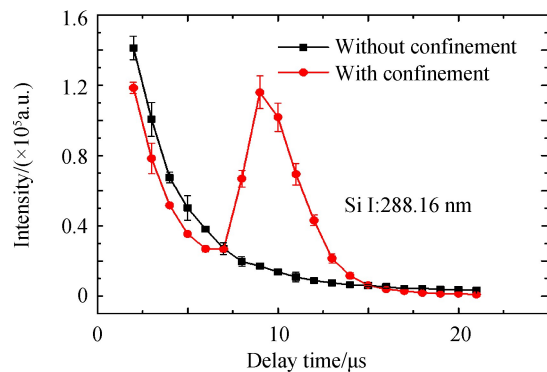


图4 无约束和半球形空腔约束下的Si I: 288.16 nm谱线强度的时间演变
Fig.4 Temporal evolution of emission intensity of Si I: 288.16 nm with and without hemispherical cavity confinement

线强度大小相当,此时两种条件下等离子体的演变规律几乎完全相同,但由于实验中激光能量的波动和信号采集空间位置的微小变化造成了半球空腔约束下的谱线强度略小于无约束情况下的谱线强度.当采集延时为 $6 \mu\text{s}$ 时,半球空腔约束下光谱强度开始逐渐增大,当采集延时为 $9 \mu\text{s}$ 时,强度变化曲线出现峰值,然后随着采集延时继续增大,谱线强度又开始逐渐下降,当采集延时超过 $15 \mu\text{s}$ 后,谱线强度逐渐趋于平稳.通过分析 Si I : 288.16 nm 光谱强度时间演变规律,可以发现在半球空腔约束的情况下,随着采集延时的增大,在某个时间段内光谱强度出现了增强.

为了分析半球空腔约束对谱线强度的增强特性,图 5 为三条 Si 原子谱线的增强倍数随着采集延时的变化规律.与半球空腔约束下谱线强度的变化规律类似,当采集延时在 $6 \sim 15 \mu\text{s}$ 范围变化时,三条谱线的强度增大倍数随着采集延时的增加呈现出先增大后减小的变化规律,采集延时为 $10 \mu\text{s}$ 时,增大倍数具有最大值,即当采集延时为 $10 \mu\text{s}$ 时,半球空腔约束对玻璃等离子体具有最佳增强效果.由此可以看出,冲击波从产生到被半球空腔内壁反射再到与等离子体作用,经历了 $6 \mu\text{s}$ 左右的时间,然后与等离子体作用持续时间为 $3 \mu\text{s}$ 左右,即辐射增强发生的时间到出现峰值的时间 $10 \mu\text{s}$,之后冲击波不再与等离子体相互作用,冲击波对等离子体的压缩作用减弱,等离子体开始向外扩散,光谱信号增强效果下降.

对比三条不同的 Si 原子谱线发现,半球空腔约束对三者谱线强度的增强倍数存在差异, Si I : 251.43 nm 、Si I : 251.92 nm 和 Si I : 288.16 nm 谱线强度的增大增强倍数最大值分别为 13.8、11.9、7.5,这与谱线的激发能级有关.由 NIST 数据库可以查到三条谱线的上下能级分别为: $0 \sim 4.93 \text{ eV}$, $0.01 \sim 4.93 \text{ eV}$, $0.78 \sim 5.08 \text{ eV}$.由此可以看出,谱线下能级能量越小,谱线强度的最大增强倍数越大,即半球空腔对该谱线的增强效果越好.

2.3 激光能量对谱线增强特性的影响

激光能量是 LIBS 实验系统中的关键参数,能量大小影响等离子体的辐射特性^[21-22],半球空腔约束对光谱信号的增强作用与等离子体本身的特性有密切关系.为了研究激光能量与半球空腔对等离子体辐射增强效果的关系,实验中调节激光能量的变化范围为 $30 \sim 190 \text{ mJ}$,每个能量下进行五次实验,分别采集无约束和半球空腔约束下的实验光谱.将采集延时设置在 3.2 节得到最大增强倍数的时刻,即采集延时设置为 $10 \mu\text{s}$,门宽设置为 $2 \mu\text{s}$,采用无累加模式,每个能量采集 100 幅图,LTSD 的值设置为 2.1 节的优化结果 103 mm .

图 6 为三条 Si 原子谱线的强度增大倍数随着激光能量的变化关系,图中的误差限是五次实验得到的增强倍数的标准偏差.由图 6 可以看出,不同能量下三条谱线强度增大倍数的相对大小关系与图 5 的结果基本一致,即 Si I : 251.43 nm 的增强倍数最大, Si I : 251.92 nm 次之, Si I : 288.16 nm 的增强倍数最小,且随着激光能量的增加,增强倍数整体上呈现出逐渐增加的趋势.当激光能量在 $30 \sim 70 \text{ mJ}$ 范围内变化时,信号增大倍数缓慢变大,激光能量继续增大,增强倍数呈现出小幅降低的趋势,当时当激光能量超过 110 mJ 以后,增强倍数随着激光能量的增大迅速增大,当激光能量为 170 mJ 时,曲线出现峰值,随后增强倍数又出现随着激光能量增加而降低的趋势.图 6 的变化规律表明,随着激光能量增大,半球空腔对等离子体辐射的增强效果提高,这是由于当激光能量增加时,等离子体产生的同时伴随着一个能量较大的冲击波,冲击波遇到半球空腔内壁时反射回来仍具有相对较高的能量,在与等离子体相互作用时,相互之间的碰撞更加激烈,因此使增强效果提高.当激光能量超过一定值之后,此时产

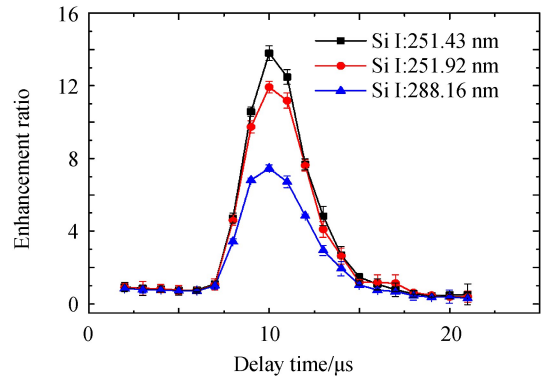


图 5 光谱信号强度增强倍数的时间演变
Fig.5 Temporal evolution of enhancement factor of spectral lines

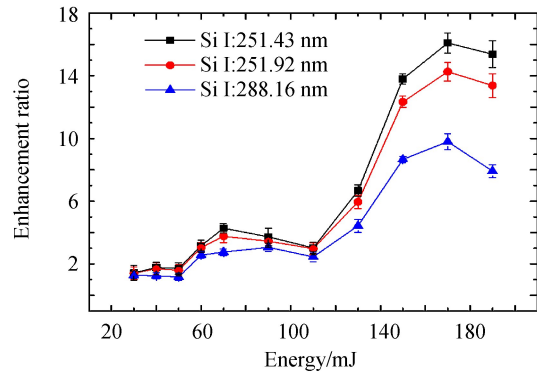


图 6 光谱强度增强倍数随激光能量的变化
Fig.6 The enhancement factor of spectral lines as a function of laser energy

生的冲击波传播速度较快,在等离子体还未进行有效的膨胀扩张时冲击波已经传播至更远的空间位置,使得冲击波来不及与等离子体发生有效的耦合作用,因此使得等离子体辐射增强的效果出现下降的趋势。

3 结论

玻璃样品具有透明度高、易击穿等特性,本文为了研究半球空腔约束对激光诱导玻璃等离子体辐射的增强特性,采用波长为 1 064 nm 的激光经过焦距为 100 mm 的透镜聚焦在样品表面形成等离子体,利用由玻璃纤维材质加工而成的直径为 10 mm 的半球空腔对玻璃等离子体进行空间约束.实验中由于激光的聚焦情况对样品的烧蚀特性有较大影响,进而影响等离子体辐射特性,因此首先对激光的聚焦位置进行了优化,结果表明当透镜到样品的距离设置为 103 mm 时,光谱信号强度最高.然后采用光谱时间演变的方法对比研究了无约束和约束两种实验条件下的等离子体辐射光谱,实验结果表明,当采集延时在 6~15 μs 时,半球空腔约束使得光谱信号得到增强,且具有不同能级的 Si 原子谱线的增强程度不同,采集延时为 10 μs 时谱线强度具有最大增强倍数.考虑到激光能量对等离子体特性的影响,论文最后一部分研究了激光能量对半球空腔约束效果的影响,结果表明,当激光能量增大时,谱线强度的增大倍数随之增加,但是激光能量超过 170 mJ 以后,由于快速向前传播的冲击波来不及压缩玻璃等离子体导致半球空腔约束对辐射光谱的增强效果降低。

参考文献

- [1] HERVE K S, KRISHNA K A, FANG Y Y, *et al.* Analysis of slags using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2016, **115**(1): 40-45.
- [2] ARAB M, BIDIN N, KASHIF C, *et al.* Characterization of pollution indices in soil surrounding a power plant by laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Analytical Letters*, 2015, **53** (2) :360-370.
- [3] RANULFI A C, ROMANO R A, BEBEACHIBULI M A, *et al.* Evaluation of the nutritional changes caused by Huanglongbing (HLB) to citrus plants using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, **71** (7) :1471-1480.
- [4] MORIHISA S, AKIO I, CHIKARA I, *et al.* Development of a fiber-coupled laser-induced breakdown spectroscopy instrument for analysis of underwater debris in a nuclear reactor core[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2014, **51** (7-8): 930-938.
- [5] BASSEL L, MOTTO V, TRICHARD F, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy for elemental characterization of calcitic alterations on cave walls[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, **24**(3):2197-2204.
- [6] BRIDGE C M, POWELL J, STEELE K L, *et al.* Characterization of automobile float glass with laser-induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Applied Spectroscopy*, 2006, **60** (10): 1181 - 1187.
- [7] CARMONA N, OUJIA M, GASPARD S, *et al.* Lead determination in glasses by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, **62**(2):94-100.
- [8] JUNG E C, LEE D H, YUN J I, *et al.* Quantitative determination of uranium and europium in glass matrix by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2011, **66**(9):761-764.
- [9] CHOI I, CHAN G C, MAO X, *et al.* Line selection and parameter optimization for trace analysis of uranium in glass matrices by laser-induced breakdown spectroscopy(LIBS) [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, **67**(11):1275-1284.
- [10] LI Chao, WANG Ji, ZHANG Wei, *et al.* Simultaneously quantitative analysis on the main elements in glass with Laser-induced breakdown spectroscopy combined with calibration-free method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45** (4): 0414005.
李超,王吉,张炜,等. 激光诱导击穿光谱结合自由定标法同时定量分析玻璃主要元素[J]. 光子学报, 2016, **45** (4): 0414005.
- [11] MATIASKE A M, GORNUSHKIN I B, PANNE U. Double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy for analysis of molten glass[J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2012, **402**(8):2597-2606.
- [12] LI Jia-ming, CHU Ying-bo, ZHAO Nan, *et al.* Detection of trace elements in active luminescent glass using laser-induced breakdown spectroscopy combined with laser-induced fluorescence [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2016, **44**(7):1042-1046.
李嘉铭, 褚应波, 赵楠, 等. 激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱检测有源发光玻璃中的微量元素[J]. 分析化学, 2016, **44**(7):1042-1046.
- [13] GAO X, LIU L, SONG C, *et al.* The role of spatial confinement on nanosecond YAG laser-induced Cu plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, **48**(17): 175205.
- [14] LI A, GUO S, WAZIR N, *et al.* Accuracy enhancement of laser induced breakdown spectra using permittivity and size

- optimized plasma confinement rings[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(22):27559.
- [15] WANG Z, HOU Z, LUI S, *et al.* Utilization of moderate cylindrical confinement for precision improvement of laser-induced breakdown spectroscopy signal[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(s6):A1012.
- [16] GUO L B, HAO Z Q, SHEN M, *et al.* Accuracy improvement of quantitative analysis by spatial confinement in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15) : 018188.
- [17] GUO L B, LI C M, HU W, *et al.* Plasma confinement by hemispherical cavity in laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Applied Physics Letter*, 2011, **98**:131501.
- [18] ROSALIE A M, LEEANN E F, DAVID A C, *et al.* Effect of sampling geometry on elemental emissions in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 1996, **50**(12): 1483 - 1499.
- [19] LIU Yue-hua, CHEN Ming, LIU Xiang-dong, *et al.* The mechanism of effect of lens-to-sample distance on laser-induced plasma[J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, **62**(2):025203.
刘月华,陈明,刘向东,等.透镜到靶材的距离对脉冲激光诱导等离子体的影响机理研究[J].物理学报,2013, **62**(2): 025203.
- [20] WANG Jing-ge, CHEN Xing-long, FU Hong-bo, *et al.* Influence of the lens-to-sample distance on the laser-induced plasma[J].*Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(9): 0930006.
王静鸽,陈兴龙,付洪波,等.透镜到样品的距离对激光诱导等离子体的影响[J].光学学报,2014, **34**(9): 0930006.
- [21] ABDELLATIF G, IMAM H. A study of the laser plasma parameters at different laser wavelengths[J].*Spectrochimica Acta Part B*, 2002, **57**(7), 1155-1165.
- [22] BARTHELEMY O, MARGOT J, CHAKER M, *et al.* Influence of the laser parameters on the space and time characteristics of an aluminum laser-induced plasma[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, **60**(7-8),905- 914.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.11504091)

引用格式:WANG Jing-ge, LI Xiao-long, HU Jun-tao, *et al.* Effects of Hemispherical Confinement on the Enhancement of Laser-induced Glass Plasma Radiation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0847013

王静鸽,李小龙,胡俊涛,等.半球空腔约束对激光诱导玻璃等离子体辐射增强特性的研究[J].光子学报,2018, **47**(8):0847013