

doi:10.3788/gzxb20184708.0847008

天然玉石的再加热正交双脉冲激光诱导击穿光谱 二维元素成像分析

庄尔填,康娟,王亚蕊,李润华,陈钰琦

(华南理工大学 物理与光电学院,广州 510641)

摘 要:为了分析和检测天然玉石表面元素分布情况,采用再加热正交双脉冲激光诱导击穿光谱技术对天然玉石表面进行二维元素成像分析.实验研究了正交双脉冲激光诱导击穿光谱条件下脉冲间隔和激光能量对原子辐射强度和信背比的影响.在优化的实验条件下,对天然玉石样品表面 $36\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 范围内进行了二维扫描分析,获得了烧蚀坑洞直径约为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的玉石样品表面微量元素 Fe 的二维分布图.结果表明:再加热正交双脉冲技术能有效地检测天然玉石样品中的微量元素,并在相同的样品损伤条件下提高了检测灵敏度.该技术不仅可以实现玉石样品的表面元素分布分析,为玉石鉴定提供参考,还可以应用于其他固体样品二维元素分布扫描成像分析,具有较好的应用价值.

关键词:光谱学;激光诱导击穿光谱;正交双脉冲;二维元素成像

中图分类号:O433

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0847008-7

Two-dimensional Elemental Mapping and Analysis of Natural Jade by Reheating Orthogonal Dual-pulse Laser-induced Breakdown Spectroscopy

ZHUANG Er-tian, KANG Juan, WANG Ya-rui, LI Run-hua, CHEN Yu-qi

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to analyze and detect the elemental distribution of natural jade sample surface, reheating orthogonal dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy was adopted to obtain two-dimensional (2D) surface elemental mapping of jade sample. The influence of time interval between two pulses to the signal intensities and signal to background ratio was studied experimentally. Variation relationship between spectral intensity and pulse energy of the reheating laser was discussed. Under optimized experimental condition, the surface scanning analysis of the natural jade within the scope of $36\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ was implemented. With the lateral resolution of 30 microns, 2D distribution mapping of trace element iron was obtained. It was demonstrated that reheating orthogonal dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy technique was able to be applied to realize the detection of trace element in natural jade and improve detection sensibility which was helpful for jade identification. This surface elemental mapping technique could be used to achieve the analysis of component distribution of jade and other solid samples which will have nice application prospects.

Key words: Spectroscopy; Laser-induced breakdown spectroscopy; Orthogonal dual-pulse; Two-dimensional elemental mapping

OCIS Codes: 300.6210; 300.6365; 300.6360

0 引言

石英质玉石作为一种天然品,由于其丰富多变的颜色,在国内玉石市场上深受人们的喜爱和追捧.而石

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2012CB921900)和国家自然科学基金(Nos.11274123,11304100)资助

第一作者:庄尔填(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子学与光电技术。Email: zhuangetwww@163.com

导师(通讯作者):陈钰琦(1982-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电子学与光电技术。Email: chenyuqi@scut.edu.cn

收稿日期:2018-05-16;录用日期:2018-07-03

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

英质玉石中的颜色富集现象主要是由于铁质致色矿物以浸染的形式进入石英颗粒之间所致^[1,2].因此,通过对玉石样品中微量致色元素 Fe 的扫描成像(mapping)分析可以了解其在不同空间位置的分布和含量,这对于判断玉石样品的宝石学特征、种属和商业价值具有重要作用.

目前用于玉石元素分布分析的常用技术手段有扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、电感耦合等离子体质谱(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)、X 射线荧光光谱法(X Ray Fluorescence, XRF)等^[3-4].这些技术在进行元素分布扫描成像上具有高分辨的优势,但同时也存在着需要真空条件、对样品需要做预处理、无法做到实时和原位检测等不足.

激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术由于具有方法简单快捷,适用于分析不同物态的样品且不需要复杂的样品预处理等优势可直接用于样品的元素分析并实现二维或三维的成像.近年来在国际上利用 LIBS 技术对固体样品元素分布进行成像分析的研究工作引起了广泛的关注并取得了快速的发展,分析的样品不断得到拓展^[5-7],成像的维数也从二维发展到三维^[7,8].Caceres 等对洞穴沉积物以及珊瑚样品进行了百万像素的多元素分布成像,为古气候重建提供了科学依据^[9];Hausman 等对海洋贝壳中的 Mg/Ca 元素含量比进行了成像分析,研究了海洋环境气候的变化^[10].Moncayo 等对石蜡包埋皮肤标本进行了多元素成像用于医疗诊断^[11].Krajcarová 等通过植物根茎中的重金属分布成像研究了重金属污染对植物生长的影响^[12].在国内,四川大学、华中科技大学、钢铁研究总院的研究小组分别用 LIBS 技术对碳质页岩、铁矿石和钢铁的元素进行了成像分析^[13-15].

在采用单脉冲 LIBS 技术进行扫描成像分析中,由于受到等离子体中较强的电子韧致辐射所造成的背景干扰,灵敏度较低.因此,人们发展了双脉冲 LIBS(Dual-pulse LIBS, DP-LIBS)技术来提高 LIBS 的光谱分析灵敏度.DP-LIBS 从空间几何配置上,可以分为共线和正交两种形式.而正交 DP-LIBS 又根据两束激光脉冲的先后分为预剥离(pre-ablation)和再加热(reheating)两种形式^[16].

本文采用再加热正交双脉冲技术对天然石英质玉石样品中的微量 Fe 元素进行了二维扫描成像分析,为提高元素成像分析的灵敏度和空间分辨率,研究了光谱强度和信背比随激光脉冲间隔、激光能量的关系.在优化的实验条件下,获得了石英质玉石样品表面的 Fe 元素的分布情况,并与玉石样品表面形貌相比较,为鉴定玉石成分和特性提供了一种方便、有效的检测手段.

1 实验

图 1 是实验装置示意图.采用一台中心波长为 1 064 nm 的电光调 Q Nd : YAG 1 激光器(Joyee, TBLT-100 型)作为等离子体激发光源,另一中心波长为 1 064 nm 的 Nd : YAG 2 激光器(Beamtech, Nimma-900 型)作为等离子体再加热光源.分束片 BS 将一小部分激光反射到光电二极管 PD 上,光电二极管产生同步信号用于触发数字存储示波器(固纬, Model DS-3502 型)和脉冲信号发生器.一台四通道的脉冲信号发生器(Quantum Composers, Model 9520 型)用于触发并控制两激光光束的相对延时.这两台电光调 Q Nd : YAG

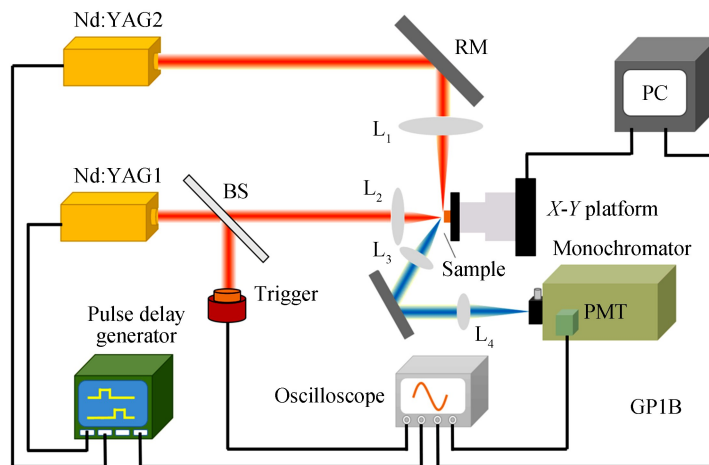


图 1 实验装置

Fig.1 Diagram of the experimental setup

激光器的脉宽均为 12 ns,工作重复频率设定为 5 Hz.由 Nd:YAG 1 激光器发出的第一束激光脉冲通过焦距为 80 mm 的聚焦透镜会聚在待测样品表面,剥离样品并形成等离子体.由 Nd:YAG 2 激光器发出且与第一束激光有一定延时的第二束激光通过焦距为 150 mm 的透镜垂直聚焦于样品表面,对等离子体进行再加热.这里应确保第二束激光所形成的等离子体不会单独剥离出样品并激发出其相应的原子辐射,第二束激光焦点与样品表面的最佳距离可以通过观察在双脉冲和单脉冲激发条件下的原子辐射信号来确定.激光等离子体的光辐射经石英透镜组 L3、L4 和反射镜 RM 组成的光学系统收集并成像在一台高分辨率光栅单色仪(拓普, WDS-5 型)的入射狭缝处,经分光后由光电倍增管探测.光电倍增管的输出信号由数字存储示波器显示和记录,最后通过数据接口由计算机进行处理.

实验样品为市售天然石英质玉石样品,如图 2 所示,其主要含量为 SiO_2 ,图 2(a)中方框代表扫描分析的区域.图 2(b)是玉石样品的侧面图,采用精细砂纸对样品表面进行打磨处理,从而减小样品表面起伏的影响.待分析的玉石样品安装在一个二维移动样品台上,二维平台步进电机沿 X 方向步距为 $80 \mu\text{m}$,沿 Y 方向步距为 $200 \mu\text{m}$.对样品表面不同区域进行逐列逐行扫描,并记录每个采样位置的发射光谱.这里我们采用自行开发的数据处理软件,将采集到的发射光谱数据与获取该数据的采样点坐标相结合,形成玉石样品的元素分布二维图像.

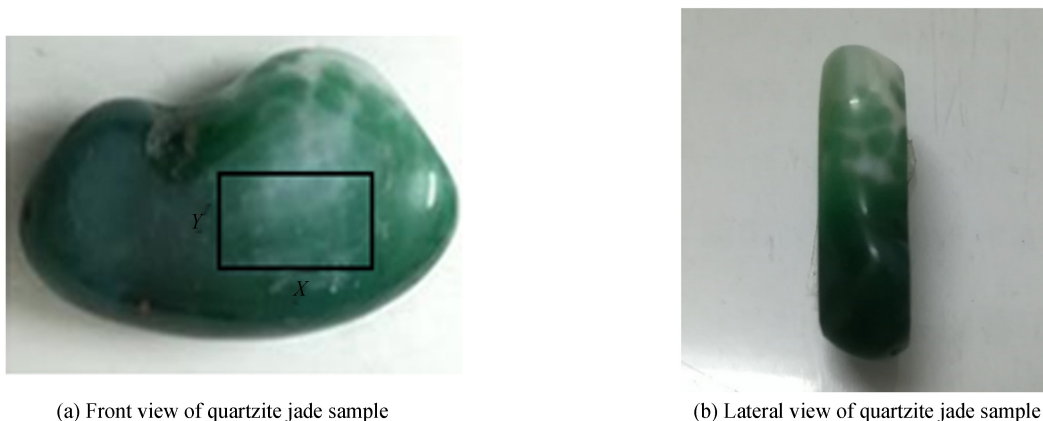


图 2 天然石英质玉石样品
Fig.2 Natural quartzite jade sample

2 结果与讨论

2.1 光谱观测

图 3(a)为单脉冲能量为 6 mJ 的激光脉冲剥离玉石样品时,在 358.12 nm 和 357 nm 波长处记录到的等离子体发射光谱信号时域图.358.12 nm 的谱线对应于 Fe 原子的谱线.从图中可以看出,Fe 原子辐射的弛豫时间短于 $1 \mu\text{s}$,基本上与连续背景辐射的弛豫时间相近,因此很难通过时间分辨的技术来探测到信/背比较高的原子光谱,可以预见仅采用单脉冲 LIBS 技术对于玉石样品中的微量元素进行分布成像分析时灵敏度将不会太高.图 3(b)为采用再加热正交双脉冲 LIBS 后记录到的 Fe 原子辐射和等离子体背景辐射的时域图,其中第二束激光能量为 20 mJ.Fe 原子辐射信号的弛豫时间延长至约 $6 \mu\text{s}$,而此时对应于 358.12 nm 处的背景辐射的弛豫时间短于 $1 \mu\text{s}$,因而其时间积分强度相较于单脉冲 LIBS 有显著的增强,这将有利于实现时间分辨的信号检测.如果图 3(a)中的信号采集门选为 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{s}$,而图 3(b)中的选为 $1.5 \sim 4.5 \mu\text{s}$,其信/背比分别为 6.1 和 49.8,在当前实验条件下可以获得约 8 倍的信/背比的改善.图 4 是在再加热正交双脉冲 LIBS 和单脉冲 LIBS 分别作用于玉石样品的情况下扫描得到的光谱图.,将得到的光谱与美国国家标准与技术研究院(NIST)数据库进行对比,查找与元素对应的谱线,发现选取的石英质玉石样品中除含主量元素 Si 外,还含有微量元素 Fe 和 Cu.相较于单脉冲 LIBS,加入正交第二束激光脉冲对等离子体再激发后,玉石样品中的特征谱线辐射信号得到明显增强.同时由于采用正交的几何空间配置,第二束激光并不直接剥离样品,而在对玉石类样品进行分析时,希望样品受到的损伤越小越好,因此再加热正交双脉冲 LIBS 技术有助于在相同的样品损伤条件下获得更高的检测灵敏度,实现微损伤的元素分析.

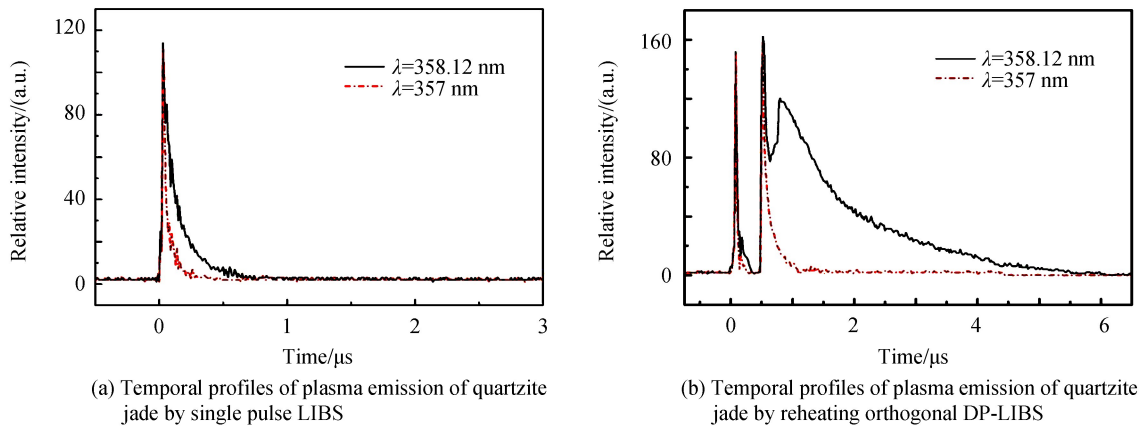


图3 等离子体辐射的时域图
Fig.3 Temporal profiles of plasma emission of quartzite jade

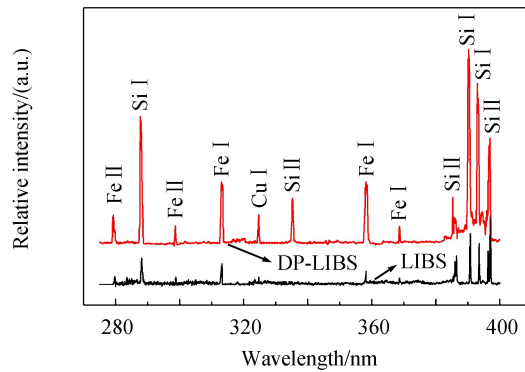


图4 在再加热正交双脉冲 LIBS 和单脉冲 LIBS 的条件下 270~400 nm 波长范围内的等离子体发射谱
Fig.4 Emission spectra of the plasma from 270 to 400 nm recorded in reheating orthogonal DP-LIBS and LIBS

2.2 脉冲时间间隔的影响

在再加热正交双脉冲 LIBS 技术中,第一束脉冲激光对样品进行烧蚀,在等离子体膨胀冷却过程中,再用第二束脉冲激光对等离子体进行二次激发,获得信号更强的发射光谱.为了获得最佳的激发效率,需要选取合适的脉冲时间间隔,以期获得更高的信背比.为了避免玉石样品中元素含量分布对信号的影响,我们选取玉石样品中的丰量元素 Si 在 288.17 nm 处的特征谱线作为分析对象.图 5 分别为实验记录的脉冲时间间隔在 0~3 μs 时间范围内 Si 原子辐射信号强度和信背比随脉冲时间间隔的变化关系.图 5 结果表明,随着脉冲间隔时间的增加,光谱强度和信背比都呈现出先增强后减弱的趋势.这里第二束激光脉冲聚焦后对第一束

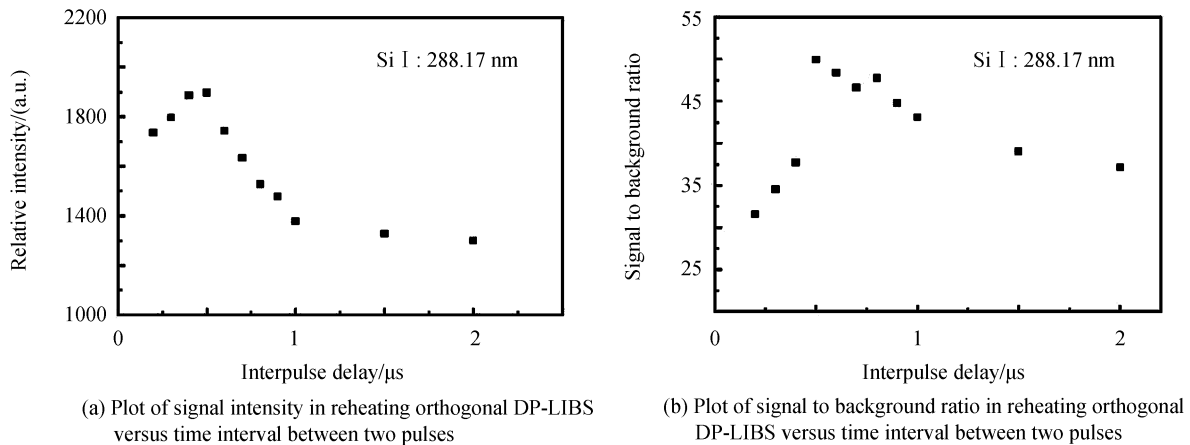


图5 原子辐射信号强度和信背比与时间间隔之间的关系
Fig.5 Plot of signal intensity and signal to background ratio in reheating orthogonal DP-LIBS versus time interval between two pulses

激光产生的等离子体进行再加热,当作用时间不同,其等离子体演化特性以及向外辐射的光谱特性也将不同.当脉冲间隔较小时,等离子体辐射背景高,将导致信背比降低;当脉冲间隔较大时,等离子体辐射光谱衰减较大,这时第二束激光脉冲对等离子体辐射光谱强度的影响并不显著.在当前实验条件下(第一束激光 6 mJ,第二束激光 20 mJ),综合考虑光谱强度和信背比,选择最佳脉冲时间间隔约为 500 ns.

2.3 激光能量的影响

在采用再加热正交双脉冲 LIBS 技术对玉石样品进行表面元素分析时,随着第一束烧蚀激光脉冲能量的增大,原子辐射信号将不断增强,同时样品的剥离量也相应增大,这将导致对样品损伤的加大和空间分辨的降低.为了获得较高的横向空间分辨率,第一束激光采用较低的激光能量.在保持烧蚀激光的能量在 6 mJ 不变的情况下,改变第二束再加热激光能量得到的光谱强度变化如图 6.随着再加热激光能量的增加,等离子体温度升高,原子辐射信号将逐渐增强.同时,由于第一束烧蚀激光能量不变,样品剥离量恒定,当再加热激光能量进一步增加时,原子辐射信号强度将趋于饱和.

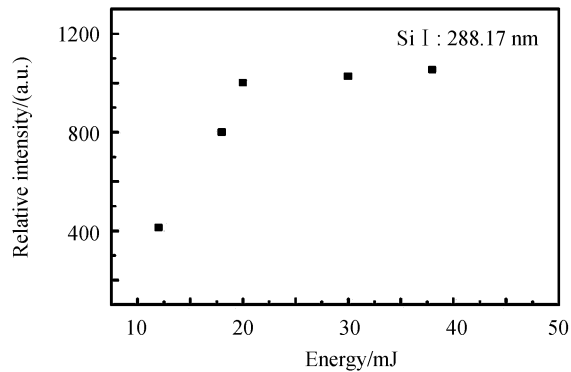


图 6 原子信号强度与再加热激光能量的关系

Fig.6 Plot of signal intensity versus pulse energy of the reheating laser

2.4 表面元素分布扫描成像分析

通过控制二维平台的水平和垂直方向的移动速度和范围可以对样品表面的不同空间位置进行分析.综合考虑样品损伤和分析灵敏度,选择优化后的实验参数,第一束烧蚀激光脉冲能量为 6 mJ,第二束再加热激光脉冲能量为 20 mJ,脉冲时间间隔 500 ns.

图 7 给出了 Y 方向位置固定,沿 X 方向扫描距离为 5 mm 时,玉石样品表面 Fe 原子辐射光谱强度的一维分布图.可以看出,在样品的不同位置,Fe 原子的光谱辐射强度有较大差异,说明微量元素 Fe 在天然玉石样品中的分布具有很大的不均匀性.利用再加热正交双脉冲 LIBS 技术对天然玉石样品表面进行扫描成像分析,采集 450×50 共 22 500 个采样点,扫描面积为 $36 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.用光学显微镜观察到的样品表面最大烧蚀坑洞直径约为 $30 \mu\text{m}$,如图 8 所示.选择 Fe 原子在 358.12 nm 的原子辐射与等离子体在 357 nm 处的背景辐射的强度之比进行分析.利用背景辐射的弛豫时间均短于对应的原子辐射的弛豫时间,采用时间分辨的探

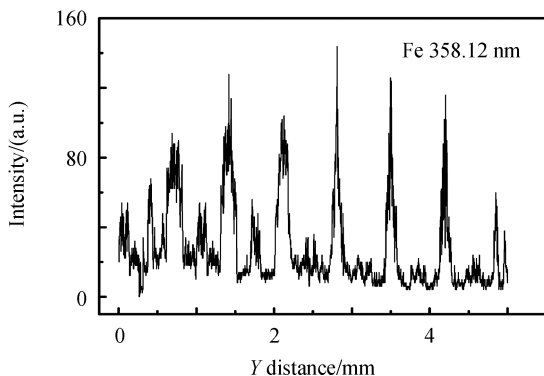


图 7 玉石样品表面 Fe 原子辐射光谱强度一维分布

Fig.7 One dimension spectral intensity distribution of iron on the surface of jade sample

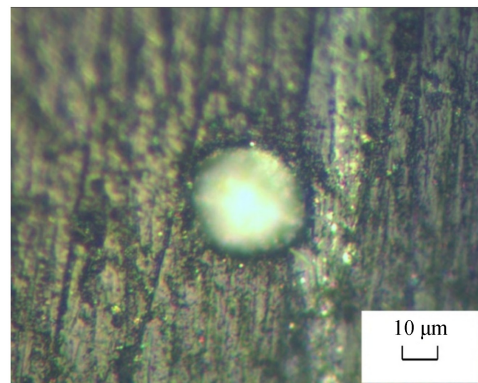


图 8 玉石表面烧蚀坑洞的光学显微照片

Fig.8 Microscopic photo of crater formed on jade sample's surface

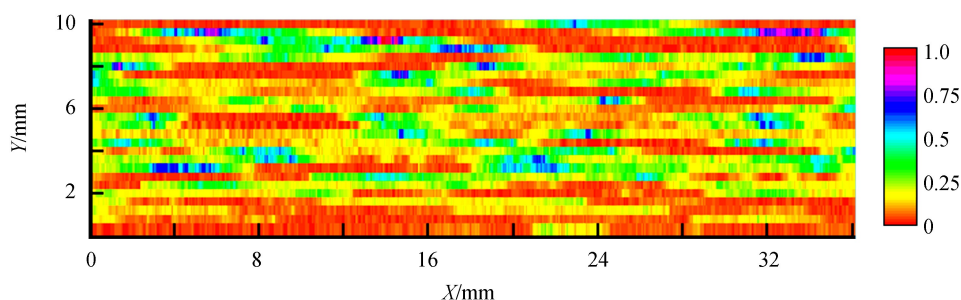


图9 玉石样品表面 Fe 元素扫描分析图
Fig.9 Concentration distribution of Fe element for jade sample

测技术,通过选取适当的采样门来降低背景干扰.这里数据采样门选择位于 $1.5\sim 4.5\ \mu\text{s}$ 之间,分别求得信号与背景的谱线面积积分强度,进而求得信背比.结合我们自行编制的数据处理软件,以信背比的大小表征元素相对含量的高低,进行归一化处理对应采样点的空间坐标生成 Fe 元素相对含量的二维分布,如图 9 所示.由于在石英质玉石中,Fe 作为微量元素其浓度与谱线强度具有线性相关性^[17-18],因此我们这里获得的 Fe 元素相对含量的分布也可用来区分 Fe 元素绝对浓度的高低.从 Fe 元素的扫描分布图像和玉石样品的表面形貌对比可以看出,Fe 元素含量越高,对应的玉石表面颜色越深.天然玉石样品中 Fe 元素的浓度和分布的不均匀性将导致其色泽,透明度的变化.因此,采用再加热正交双脉冲 LIBS 技术能够对石英质玉石样品表面元素含量不均匀分布进行分析,可以作为玉石鉴定的一种有效手段.

值得说明的是,采用再加热正交双脉冲 LIBS 技术进行二维元素成像分析时,分析速度取决于激光脉冲频率.这里我们激光器工作频率为 5 Hz,采用 22 500 个像素点的元素分布图像所需时间约 75 分钟,若需获得更高像素点、更大区域的元素扫描分布,耗时将进一步增加.下一步我们将采用高重频(激光脉冲的重复频率 $\geq 1\ \text{kHz}$)激光光源来提高扫描成像速度.而这里的探测系统也同样适用于高重频激光光源,由于 GPIB 接口的数据传输速率可以高达 8 MB/s,以固纬数字存储示波器为例,一幅时域图含 500 字节,即 4 kB,一个 GPIB 接口最快每秒可以传送 2 000 幅时域图.考虑到数据运算的时间,实现每秒 500 像素的图像扫描是没有问题的,所以若采用重复频率为 1 kHz 的高重频激光器,成像速度将提高 100 倍.通过采用高重频光源结合再加热正交双脉冲 LIBS 技术,将同时兼顾扫描成像速度、空间分辨率和光谱分析灵敏度,可以实现固体样品的二维元素分布的高分辨快速扫描成像分析.

3 结论

采用再加热正交双脉冲 LIBS 技术对玉石样品中的 Fe 元素分布进行了成像分析.相较于单脉冲 LIBS 技术,双脉冲延长了原子特征谱线的衰减时间以及提高了谱线的信背比,在相同的样品损伤条件下有效地提高了检测灵敏度.利用原子辐射信背比表征元素相对含量的高低,得到了玉石样品中的横向空间分辨为 $30\ \mu\text{m}$ 的 Fe 元素相对含量分布图.该方法不仅可以用于玉石样品的表面微区分析,为玉石的特性评定提供参考,还可扩展到珠宝鉴定、冶金矿石分析等领域,具有较好的应用价值.

参考文献

- [1] LU Ren. Color origin of lavender jadeite: an alternative approach [J]. *Gems & Gemology*, 2012, **48**(4):1214001.
- [2] ZHANG Yong, LU Tai-jin, YANG Tian-chang, *et al.* A study of quartzite jade's color and trace elements [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2014, **33**:83-88.
张勇,陆太进,杨天畅等. 石英质玉石的颜色分布及其微量元素分析 [J]. 岩石矿物学杂志, 2014, **33**:83-88.
- [3] ZHOU Zhen-hua, FENG Jia-rui. A petrological and mineralogic comparison between Xinjiang nephrite and Xiuyan nephrite [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2010, **29**(3):331-340.
周振华, 冯佳睿. 新疆软玉、岫岩软玉的岩石矿物学对比研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2010, **29**(3):331-340.
- [4] Palida Awailijiang, Aierkin Abulimu, Nueradilijiang Abulimiti. Non-destructive analysis and research on Xinjiang jade by fluorescence X-ray method [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015, **35**(8):775-779.
帕丽达·阿外勒江,艾尔肯·阿布列木,努尔阿迪力江·阿布力米提. XRF 法无损检测新疆玉石中微量元素含量 [J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(8):775-779.
- [5] WANG X, MOTTO-ROS V, PANCZER G, *et al.* Mapping of rare earth elements in nuclear waste glass-ceramic using

- micro laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochim Acta Part B*, 2013, **87**: 139-146.
- [6] SHETA S A, CARLO G D, INGO G M, *et al.* Surface heterogeneity study of some reference Cu - Ag alloys using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2015, **47** (4): 514-522.
- [7] HOU H M, CHENG L, RICHARDSON T, *et al.* Three-dimensional elemental imaging of Li-ion solid-state electrolytes using fs-laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectroetry*, 2015, **30**(11): 2295-2302.
- [8] GIMENEZ Y, BUSSER B, TRICHARD F, *et al.* 3D imaging of nanoparticle distribution in biological tissue by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Science Report*, 2016, **6**: 29936.
- [9] CACERES J O, PELASCINI F, MOTTO-ROS V, *et al.* Megapixel multi-elemental imaging by laser-induced breakdown spectroscopy, a technology with considerable potential for paleoclimate studies [J]. *Science Report*, 2017, **7**: 5080.
- [10] HAUSMANN N, SIOZOS P, LEMONIS A, *et al.* Elemental mapping of Mg/Ca intensity ratios in marine mollusc shells using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectroetry*, 2017, **32**:1467-1610.
- [11] MONCAYO S, TRICHARD F, BUSSER B, *et al.* Multi-elemental imaging of paraffin-embedded human samples by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2017, **133**:40-44.
- [12] KRAJCAROVÁ K, NOVOTNÝ K, KUMMEROVÁ M, *et al.* Mapping of the spatial distribution of silver nanoparticles in root tissues of *Vicia faba* by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. *Talanta*, 2017, **173**: 28-35.
- [13] XU Tao, LIU Jie, QI Shi, *et al.* Multi-elemental surface mapping and analysis of carbonaceous shale by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2016, **115**: 31-39.
- [14] CHEN Qi-meng, DU Min, HAO Zhong-qi, *et al.* Mapping application in Laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(5): 1473-1477.
陈启蒙, 杜敏, 郝中骐, 等. 激光诱导击穿光谱技术成分面扫描分析与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(5): 1473-1477.
- [15] ZHANG Yong, JIA Yun-hai, CHEN Ji-wen, *et al.* Segregation bands analysis of steel sample using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(12): 3383-3387.
张勇, 贾云海, 陈吉文, 等. 激光诱导击穿光谱法对钢铁偏析样品的分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(12): 3383-3387.
- [16] BABUSHOK V I, DELUCIA Jr F C, GOTTFRIED J L, *et al.* Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, **61**:999-1014.
- [17] MA Fang-li, DONG Qian-min, LIANG Pei, *et al.* Quantitative analysis of Mg, Fe and Ca in jade with laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(10): 3337-3340.
马芳丽, 董前民, 梁培, 等. 激光诱导击穿光谱定量分析玉石中的 Mg, Fe 和 Ca [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(10): 3337-3340.
- [18] WANG Ya-jun, YUAN Xin-qiang, SHI Bin, *et al.* The research for quantitative analysis of iron in Myanmar jades using laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, **38**(1): 263-266.
王亚军, 袁心强, 石斌, 等. 缅甸翡翠中铁元素的激光诱导击穿光谱定量检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, **38**(1): 263-266.

Foundation item: National Key Basic Research Program of China(No.2012CB921900) and National Natural Science Foundation of China (Nos.11274123, 11304100)

引用格式: ZHUANG Er-tian, KANG Juan, WANG Ya-rui, *et al.* Two-dimensional Elemental Mapping and Analysis of Natural Jade by Reheating Orthogonal Dual-pulse Laser-induced Breakdown Spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0847008
庄尔填, 康娟, 王亚蕊, 等. 天然玉石的再加热正交双脉冲激光诱导击穿光谱二维元素成像分析[J]. 光子学报, 2018, **47**(8):0847008