

# Research Progress on Laser Induced Breakdown Spectroscopy

Xiaohua Liu, Dan Tian, Yuanxue Cai\*, Yueting Qin

Laboratory of Photonics and Advanced Sensing Technology, School of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Email: \*yuanxue\_cai@tust.edu.cn

Received: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2016; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Laser-induced breakdown spectroscopy is an important invention. It has the characteristics of no damage, high sensitivity and rapid qualitative and quantitative analysis of material elements, so it has been widespread concern of pollutant monitoring, food safety inspection and trace element analysis etc. After years of development, the technology of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is given many technical advantages in the field of multiple with potential appliance value. The LIBS has been widely used abroad, such as nuclear power plant safety monitoring, space exploration and industrial inspection etc. However, study on LIBS in China started late; especially in the field of application, there is a big gap. It described the development of laser-induced breakdown spectroscopy, basic principles, application field and characteristics, and analysed the impact factors of testing result.

## Keywords

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Plasma, Self-Absorption Effect

---

# 激光诱导击穿光谱技术研究进展

刘小华, 田 丹, 蔡元学\*, 秦月婷

天津科技大学理学院光子学与先进传感技术实验室, 天津

Email: \*yuanxue\_cai@tust.edu.cn

\*通讯作者。

文章引用: 刘小华, 田丹, 蔡元学, 秦月婷. 激光诱导击穿光谱技术研究进展[J]. 光电子, 2016, 6(2): 75-81.

<http://dx.doi.org/10.12677/oe.2016.62012>

收稿日期：2016年6月2日；录用日期：2016年6月19日；发布日期：2016年6月22日

## 摘要

激光诱导击穿光谱技术是激光技术的重大发明，因其能够对物质元素进行无损、高灵敏度、快速的定性分析与定量分析，成为污染物检测、食品安全检测、元素痕量分析等领域重要的技术手段。经过多年发展，激光诱导击穿光谱技术以其具有的独有技术优势，在多个领域表现出了巨大的潜在应用价值，并且国外同行已将这项技术应用到核电站安全监控、空间探索、工业检测等领域。相对于国外的研究进展，国内开展此项技术的研究起步较晚，尤其在应用领域存在较大差距。本文综述激光诱导击穿光谱技术的发展历程，概述该技术的基本原理，突出应用领域及其特点，并分析对检测结果的影响因素。

## 关键词

激光诱导击穿光谱，等离子体，自吸收效应

## 1. 引言

激光诱导击穿光谱(Laser-induced breakdown spectroscopy, 简称 LIBS)是一种基于激光烧蚀方法的先进的动态光谱测量技术，可通过测量被强激光束激发产生的等离子体波长及对应的光谱信号强度，实现对构成物质的化学元素进行定性和定量分析。与传统的元素分析技术，如火焰式原子吸收光谱法、石墨炉式原子吸收光谱等方法相比，LIBS 不仅具有高灵敏度、高精度、全元素等特点，而且 LIBS 在整个测量过程中，并不限定样品的形式(固体、液体或者气体)，也无需对样品进行切片、研磨等预处理。因此，此方法能够最大限度地减小测量过程中外界对样品的破坏，保持物体的完整性，保留原有物质的光谱特性。此外，此种方法可远程实时地分析与控制，因此非常适用于在恶劣环境下的检测分析工作。LIBS 的上述特点，使其在各领域展现出非常大的应用潜力，也受到了光谱测量领域各国研究人员的广泛关注，并经过近几年的发展，在技术实现及适用领域等方面都有了长足进步与发展。

## 2. LIBS 的历史

1962 年，由美国 Los Alamos 国家实验室 David Cremers 研究小组提出红宝石微波激光器开始，人类就进入了崭新的激光时代。作为激光的重要应用之一，1962 年 Brech 和 Lee Cross 首次通过将激光作用于金属样品表面，获得了金属原子的发射光谱，而这也预示着新型光谱技术，LIBS 技术的诞生[1]。1966 年，Ford Motor 公司 Dearburn 和 Michigam 所在的研究小组用红宝石激光器 LIBS 技术分析了熔融的不锈钢样品，得到了镍和铬的定标曲线，首次证明了 LIBS 技术应用于物质元素定量分析的可能性[2]。但直到 20 世纪 80 年代，随着先进的可纪录等离子体瞬态发射光谱的 CCD 阵列探测器等先进光谱探测系统被发明，并应用于科研工作中，才使关于激光诱导击穿光谱的基础理论在实验中得到论证，并使其更加完善，同时也使其在实际的应用中得到新的突破。

LIBS 出现伊始，无疑受到了光谱测量领域的广泛关注，并在激光痕量分析、激光薄膜沉积、表面刻蚀、惯性约束核聚变等低维、单通道光谱领域有了良好的应用效果。随着研究的深入及技术的发展，研究人员在更高维度、多通道、高分辨光谱分析领域有了长足发展，并为 LIBS 在宽谱范围内获得更加准确的光谱信息提供了技术支持，也使 LIBS 技术的研究拓展到环境检测[3]，文物鉴定和保护[4]，医疗领域[5]，冶金分析[6]，生物样品[7]，农业[8]及核电站开发与空间探索[9]等多个领域。经过多年发展，LIBS 有了长足发

展,但在准确性与实用性方面还有很多不足。为了进一步完善及发展 LIBS 技术,研究人员目前将研究重点放在了提高信噪比、降低基体效应、增强光谱信号强度、降低相对偏差,以及提高定量分析精度等方面。

### 3. LIBS 基本原理及实验装置

LIBS 技术是将高功率的激光脉冲入射到待测样品表面,并将激光束聚焦到一个很小的分析点(通常直径 10~400 微米),使待测样品表面在高功率的激光脉冲作用下迅速气化,形成高温、高密度的等离子体。由于等离子体内含有大量的激发态原子、离子和中性电子,当激发态的原子或离子从高能态跃迁到低能态时,发射出具有特定波长的光波。同时,通过光谱仪对这些激发态原子所发射的光波进行探测与分析,获得样品中所有元素的光谱信息,并利用计算机对光谱进行定性(如材料性质的鉴别)和定量(如样品中某元素的含量)分析。

利用 LIBS 实现对样品定性和定量分析的实验装置,如图 1 所示。室验装置的主要组成部分:1) 高功率脉冲激光器;2) 高反射率的折射镜及聚焦透镜;3) 透镜-光纤传输系统;4) 新型宽带高分辨率光谱仪,如:增强型电荷耦合装置(ICCD);5) 高时间分辨测量电路-微机等。

## 4. 应用领域

### 4.1. 固体样品

LIBS 应用于固体分析方面的研究比较多,涵盖了土壤、矿石、煤炭、半导体、花卉、含铅污泥、金属、艺术品鉴定等。我国是利用燃煤大国,为了提高燃煤的利用率及减少污染物排放,在线煤质分析是十分必要的。LIBS 在线检测设备[10]自动取样并带有自动清洁系统,分析了输煤管道中煤粉的 C、Ca、Mg、Ti、Si、H、Al、Fe、S 等元素,并将 C 的元素含量与特征谱线强度进行线性拟合。谢承利、陆继东等[11]测定合金中的元素种类与浓度,利用内标法削弱了基底效应。在环境污染检测方面,Aglia 等人[12]用 LIBS 技术分析了土壤中铬、铅等重金属污染元素。鲁翠萍等人[13]用 LIBS 技术分析比较了重金属元素铅、铬的谱线,完成了两元素的定标曲线。1996 年,美国 Los Alamos 国家实验室的 Cremers 研究小组[14]最早推出一款真正意义上的便携式 LIBS 设备,用于土壤污染物铅的现场检测。基于 LIBS 技术对

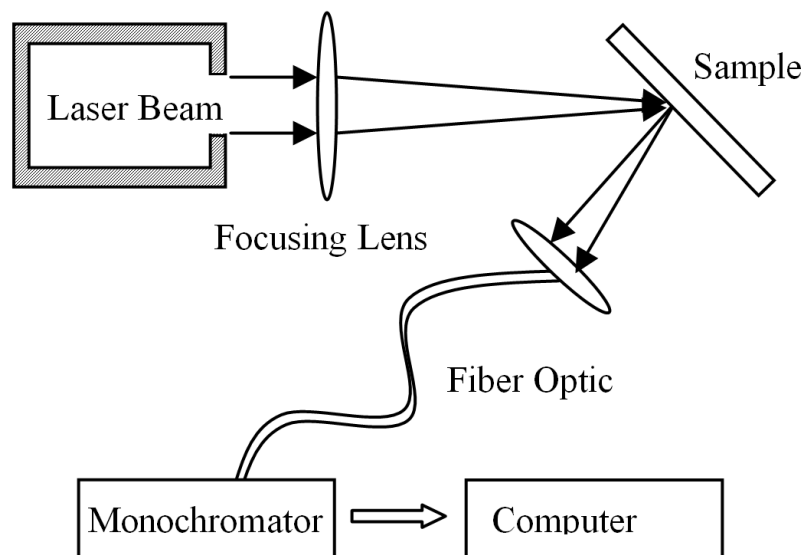


Figure 1. Sketch map of LIBS experiment device

图 1. 激光诱导击穿光谱实验装置示意图

样品破坏小的优点,在艺术品鉴定行业很有优势。2001年,Yoon 等人[15]用 LIBS 技术分析了古陶器釉中的主要元素: Fe、Ca、Si。

#### 4.2. 液体样品

在利用 LIBS 技术探测液体时,由于冲击波会诱导液体表面产生透明气泡,这些气泡会改变激光束的入射角,形成气溶胶吸收激光的能量,同时吸附在探测设备上影响数据的准确性,使得最终得到的 LIBS 光谱线有很大误差。尽管检测液体样品上仍有一定的困难,但目前在液体领域也有了一定的研究。1984年,Cremers D.A 等人首次将双脉冲应用于水体金属元素的检测,发现双脉冲可以提高等离子体的温度和检测限,灵敏度可提高约 5~45 倍,检测限可降低约 2~24 倍,为双脉冲在水体中的研究奠定了基础。1996年,Arca G 等人[16]将 LIBS 技术用于污水检测,并建立了 IFAMCNR 系统,实现了对污水长时间的监测,证明了 LIBS 污水在线检测方面是一种可行的检测方法。孙兰香[17]等基于激光诱导击穿光谱技术,研发了一套钢液成分在线分析系统,实现了钢液中 Cr、Ni、Si、Mn 元素成分的半定量在线分析。

#### 4.3. 气体样品

LIBS 在气体分析方面研究相对较少,Hanafim 等[18]使用红宝石激光器(波长 694.3 nm,脉宽 40 ns)获得了氦气、氮气、氩气、和空气的 LIBS 光谱。McNaghten 等人[19]通过增加激光能量和减小气压来降低三种气体之间相互作用使光谱信号灵敏度降低的方法,测得了氮气氛围中微量氮气和氩气的 LIBS 光谱。1994年,Lazzari 等人[20]用铷玻璃激光器聚集在充满饱和 Hg 蒸汽的气体室里,获得了汞的等离子体并进行了 LIBS 光谱分析。1995年,Zhang [21]等人用 LIBS 技术分析了微粒霍亚明和燃油燃烧气体。这些研究成果有效地促进了 LIBS 在大气污染物实用化检测方面的发展,为该技术应用于大气中多种重金属成分的实时在线检测提供了一种新方法。

#### 4.4. 生命科学

在生命科学领域,LIBS 技术应用于分析骨头、头发、指甲中的元素分布进而得到人体健康信息,涉及到生物遗传、医学诊断、司法破案等领域。Collins 和 Vass [22]把人和动物(兔子、猪、羊、熊、奶牛)的 LIBS 光谱收集并分类,对比后发现人与动物骨头的元素有明显的不同。意大利的 IPCF 研究小组[23]应用 LIBS 分析了吸毒者的头发组织中的矿物质。1999年,Samek 等人[24]成功应用 LIBS 探测到血液中的 Rb 元素。密西西比州立大学的 Kumar 等人[25]分析了恶性组织的 LIBS 光谱,得知正常组织与恶性组织中金属的含量差异,为肿瘤的产生机理提供了有价值的信息。Tamura 等人[26]利用 LIBS 技术比较分析分子序列数据、推断性质,在一定程度上重建了基因进化和物种起源。

在生物分析领域,LIBS 技术还用来分辨火山石中的细菌菌种。Baudeflet 等人[27]利用 LIBS 技术对细菌中 Na、Mg、P、Ga 等元素定量分析,利用元素含量差异区分细菌种类。Singh 等人[28]对三种不同类型的胆结石进行光谱分析,得出 Ca 是胆结石主要成分这一结论。在医药学领域,吴金泉等[29]运用 LIBS 技术定性研究了藏药七十味珍珠丸,检测了该藏药中含有包括汞、铅等重金属元素在内的十种元素。

#### 4.5. 核电站安全与空间探索

传统的核电废液安全检测方法采用切割、移除取样进行实验分析不仅耗时,而且不经济实用。LIBS 技术在核电站安全检测方面显现着巨大优势。Arnab.S 等人采用 LIBS 测量了模拟的高放射性液体废物中 Pt、Pd、Ru 和 Rh 等元素,验证了 LIBS 检测核废料中元素含量的可行性。Applied Photonics Limited 公司开发了 LIBSCAN400 型光纤探头设备对水下被测样品成分(铀、铝、铅、石墨、锆合金)进行分析,检测废弃物的放射性,为冷却池提供安全保障。Sall 等人[30]将 LIBS 应用到空间探索,研究了土壤和粘土

样品所处气压对校正曲线的影响,首先确定了在实验中的限制因素为规模大小、重力、功率、环境(压力及气体氛围),并利用中阶梯摄谱仪量化了压力对定标曲线的影响。

远程 LIBS 技术是发展最迅速的领域,其采用光学望远聚焦系统,将纳秒激光脉冲线性聚焦到远距离样品的方法,使探测距离延展到几十米远甚至更远处。在实际应用上,由于探测位置不断变化,需要实时调整光学系统的焦距,从而增加了实验的繁琐性、误差和难度。远程 LIBS 技术可用于检测爆炸物以及一些人类无法接近的有害环境的物质检测[31]。美国联合应用光子公司开展了以国防安全为应用背景的远程 LIBS 技术的研究,用于探测和判别爆炸危险物。2008 年伊利诺斯大学的 Gordon 小组[32]将两个脉宽均为 80 fs 的双脉冲激光光源作用于 Si,观测到连续谱的近全偏振现象。

## 5. 影响光谱分析的因素

### 5.1. 自吸收效应的影响

自吸收效应是发射体向外辐射的谱线被自身的原子所吸收,而使谱线强度减弱的现象。处于基态的原子收到激光照射后,会吸收电子跃迁到激发态,由于发射体中心的温度高于四周,外围原子多数处于基态或低能态,因而会产生自吸收。通常根据等离子体参数模型来获取自吸收对原子发射谱的影响,但由于激光和样品相互作用机制和等离子体演化速度降低了这种模型的实用性[33]。Sherbini 等通过分析光谱中电子密度和发射谱线的洛伦兹宽度,估算了自吸收效应的影响,所测得的自吸收系数约有 30% 的不确定性。Heh-Young Moon 等人[34]通过在等离子体的另一侧放一球面镜来进行原子发射谱的自吸收校正,改善了激光诱导击穿光谱定标曲线的线性度。

### 5.2. 基体效应的影响

由于被测样品基体成分的变化使元素平均原子序数和质量吸收系数发生改变,直接影响待测元素强度测量的现象称为基体效应。Piscitelli, V.等人[35]通过对两种样品的铅元素的定标曲线对比,得出样品中的微量元素 Al、Cu 等影响了 Pb 在波长 405.78 处的原子发射谱线。Vrenegor, J.等人[36]由实验测得等离子体参数引起的误差和基体效应引起的误差大体相当,因此准确地表征基体效应的影响是非常必要的。Herrera 等人[37]采用两种自由标定方法在真空条件下对不同成分组成的铝合金样品进行了定量分析和对比,从而克服了此实验的基体效应。

### 5.3. 测量时间的影响

宋一中等[38]通过激光诱导 Al 等离子体连续辐射的研究发现,在等离子体演化初期,复合辐射和韧致辐射共同产生连续辐射,其中韧致辐射占主导地位;随着等离子体的演化,复合辐射逐渐减弱,连续辐射主要由韧致辐射产生。一般情况下,等离子体的生命周期在 300 ns 到 40 us,孙兰香[39]等人发现等离子体数值依赖于环境气体和激光波长等因素。

### 5.4. 其他因素的影响

还有很多因素会影响最后的 LIBS 实验结果,例如环境气氛的影响,当激光束穿过环境气体时,在样品表面附近的气体被电离,进而抑制待测样品原子的电离。Chizuru, K.等人认为发射区的形状和强度取决于环境气体的种类和气压。郑贤锋等人[40]发现达到最佳压力值时,谱线强度达到最大值。此外,激光参数的影响,理论分析方法,样品的温度等都是会在一定程度上影响 LIBS 的最终检测结果。

## 6. 展望

激光诱导击穿光谱技术由于其独特的优点,受到了科学家的关注。尤其凭借其独有的无需样品预处理

理、全元素分析、高灵敏度、高精度等优势,使得其在多个领域内被广泛研究和应用。虽然目前 LIBS 存在信噪比低、准确性不高、测量成本偏高等困难,但随着科技的发展,相信 LIBS 的技术会更加完善,在更广泛的领域表现出其价值,发挥更大的作用。

## 基金项目

国家自然科学基金(编号: 61405146); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(编号: 14CQNJC01700)。

## 参考文献 (References)

- [1] Brech, F. and Cross, L. (1962) Optical Microemission Stimulated by a Ruby Laser. *Applied Spectroscopy*, **16**, 59-64.
- [2] Runge, E.F., Bonfiglio, S. and Bryan, F.R. (1966) Spectrochemical Analysis of Molten Metal Using a Pulsed Laser Source. *Spectrochim Acta*, **22**, 1678-1680.
- [3] 王春龙, 刘建国, 赵南京, 马明俊, 王宴, 胡丽, 张大海, 余洋, 孟德硕, 章炜, 刘晶, 张玉钧, 刘文清. 基于支持向量有机回归的水体重金属激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330002.
- [4] Giussani, B., Monticelli, D. and Rampazzi, L. (2009) Role of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry in Cultural Heritage Research: A Review. *Analytica Chimica Acta*, **635**, 6-21.
- [5] Kumar, A. and Sharma, P.C. (2006) Uses of LIBS Technology in Biological Media. *Optics East, International Society for Optics and Photonics*, 637701.
- [6] 董美蓉, 陆继东, 李军, 陈凯, 潘圣华, 姚顺春, 李俊彦. 液相和固相钢铁的激光诱导击穿光谱特性[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0130002.
- [7] 张大成, 马新文, 朱小龙, 李斌, 祖凯玲. 激光诱导击穿光谱应用于三种水果样品微量元素的分析[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6348-6353.
- [8] Lidiane, C.N., Gilmore, A.D.S., Lilian, C.T., Dario, S.J., Ronei, J.P. and Francisco, J.K. (2009) Simultaneous Optimization by Neuro-Genetic Approach for Analysis of Plant Materials by Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*, **64**, 565-572.
- [9] Lanza Nina, L., Wiens Roger, C., Clegg Samuel, M., Ollila Ann, M., Humphries Seth, D., Newsom Horton, E. and Barefield James, E. (2010) Calibrating the Chemcam Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Instrument for Carbonate Minerals on Mars. *Applied Optics*, **49**, C211-C217.
- [10] 胡志裕, 张雷, 尹王保, 马维光, 董雷, 贾锁堂. 激光诱导击穿光谱在燃煤电厂及土壤污染物在线检测中的应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(1): 26-35.
- [11] 谢承利, 陆继东, 李勇, 林兆祥. 用 LIBS 方法测量铝合金中的合金元素[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版. 2008, 36(10): 114-117.
- [12] Gaudiuso, R., Dell'Aglio, M., Pascale, O.D., Senesi, G.S. and Giacomo, A.D. (2010) Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Elemental Analysis in Environmental, Cultural Heritage and Space Applications: A Review of Methods and Results. *Sensors*, **10**, 7434-7468.
- [13] 鲁翠萍, 刘文清, 赵南京, 刘立拓, 陈东, 张玉钧, 刘建国. 土壤重金属铬元素的激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 045206.
- [14] Yamamoto, K.Y., Cremers, D.A., Ferris, M.J. and Foster, L.E. (1996) Detection of Metals in the Environment Using a Portable Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Instrument. *Applied Spectroscopy*, **50**, 222-233.
- [15] Yoon, Y., Kim, T., Yang, M., Lee, K. and Lee, G. (2001) Quantitative Analysis of Pottery Glaze by Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Microchemical Journal*, **68**, 251-256.
- [16] Arca, G., Ciucci, A., Palleschi, V., Rastelli, S. and Tognoni, E. (1997) Trace Element Analysis in Water by the Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Technique. *Applied Spectroscopy*, **51**, 1102-1105. <http://dx.doi.org/10.1366/0003702971941863>
- [17] 孙兰香, 于海斌, 丛智博, 辛勇. 利用 LIBS 技术在线半定量分析液态钢成分[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2602-2608.
- [18] Hanafi, M., Omar, M.M. and Garnal, Y.E.E.-D. (2000) Study of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy of Gases. *Radiation Physics and Chemistry*, **57**, 11-20. [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00344-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00344-8)
- [19] McNaghten, E.D., Parkes, A.M., Griffith, B.C., Whitehouse, A.I. and Palanco, S. (2009) Detection of Trace Concentrations of Helium and Argon in Gas Mixtures by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **64**, 1111-1118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2009.07.011>

- [20] Lazzari, C., De Rosa, M., Rastelli, S., Ciucci, A., Pallesch, V. and Salvetti, A. (1994) Detection of Mercury in Air by Time-Resolved Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Technique. *Laser and Particle Beams*, **12**, 525-530. <http://dx.doi.org/10.1017/S0263034600008387>
- [21] Zhang, H.S., Singh, J.P., Yuen, F.-Y. and Cook, R.L. (1995) Laser-Induced Breakdown Spectra in a Coal-Fired MHD Facility. *Applied Spectroscopy*, **49**, 1617-1623. <http://dx.doi.org/10.1366/0003702953965759>
- [22] Vass, A.A., Madhavi, M., Synsteliën, J. and Collins, K. (2005) Elemental Characterization of Skeletal Remains Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences*, 21-26.
- [23] Hybl, J.D., Lithgow, G.A. and Buckley, S.G. (2003) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Detection and Classification of Biological Aerosols. *Applied Spectroscopy*, **57**, 1207-1215. <http://dx.doi.org/10.1366/000370203769699054>
- [24] Samek, O., Beddows, D.C.S., Telle, H.H., Kaiser, J., Liška, M., Cáceres, J.O. and Ureña, A.G. (2001) Quantitative Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Analysis of Calcified Tissue Samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **56**, 865-875. [http://dx.doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00198-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00198-7)
- [25] Kumar, A., Yueh, F.-Y., Singh, J.P. and Burgess, S. (2004) Characterization of Malignant Tissue Cells by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Optics*, **43**, 5399-5403. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.43.005399>
- [26] Tamura, K., Peterson, D., Peterson, N., Scecher, G., Nei, M. and Kumar, S. (2011) MEGA5: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Using Maximum Likelihood, Evolutionary Distance, and Maximum Parsimony Methods. *Molecular Biology and Evolution*, **28**, 2731-2739. <http://dx.doi.org/10.1093/molbev/msr121>
- [27] Baudalet, M., Yu, J., Bossu, M., Jovelet, J., Wolf, J.P., Amodeo, T., Frejafor, E. and Laloi, P. (2006) Discrimination of Microbiological Samples Using Femtosecond Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 163903. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2361270>
- [28] Singh, V.K., Singh, V., Rai, A.K., Thakur, S.N., Rai, P.K. and Singh, J.P. (2008) Quantitative Analysis of Gallstones Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Optics*, **47**, G38-G47. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.47.000G38>
- [29] 吴金泉, 林兆祥, 刘林美, 常亮. 藏药七十味珍珠丸的激光诱导击穿光谱检测[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 53-56.
- [30] Sallé, B., Cremers, D.A., Maurice, S. and Wiens, R.C. (2005) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Space Exploration Applications: Influence of the Ambient Pressure on the Calibration Curves Prepared from Soil and Clay Samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **60**, 479-490. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2005.02.009>
- [31] 邵妍, 张艳波, 高勋, 杜闯, 林景全. 激光诱导击穿光谱技术的研究与应用新进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2593-2598.
- [32] Liu, Y.M., Singha, S., Witt, T.E., Cheng, Y.T. and Gordon, R.J. (2008) Observation of Near Total Polarization in the Ultrafast Laser Ablation of Si. *Applied Physics Letters*, **93**, Article ID: 161502. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3000966>
- [33] 季振国, 李铁强, 席俊华, 毛启楠. 激光诱导击穿光谱及其在元素分析中的应用[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(3): 455-460+428.
- [34] Moon, H.-Y., Herrera, K.K., Omenetto, N., Smith, B.W. and Winefordner, J.D. (2009) On the Usefulness of Adapting Mirror to Evaluate Self-Absorption Effects in Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **64**, 702-713. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2009.06.011>
- [35] Piscitelli, V., Martine, M.A., Fernández, A.J., González, J.J., Mao, X.L. and Russo, R.E. (2009) Double Pulse Laser Induced Breakdown Spectroscopy: Experimental Study of Lead Emission Intensity Dependence on the Wavelengths and Sample Matrix. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **64**, 147-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2008.11.008>
- [36] Vrengor, J., Noll, R. and Sturm, V. (2005) Investigation of Matrix Effects in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Plasmas of High-Alloy Steel for Matrix and Minor Elements. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **60**, 1083-1091. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2005.05.027>
- [37] Herrera, K.K., Tognoni, E., Gornushkin, I.B., Omenetto, N., Smith, B.W. and Winefordner, J.D. (2009) Comparative Study of Two Standard-Free Approaches in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy as Applied to the Quantitative Analysis of Aluminum Alloy Standards under Vacuum Conditions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **24**, 426-438. <http://dx.doi.org/10.1039/b820494b>
- [38] 宋一中, 李亮. 激光诱导 Al 等离子体连续辐射的时间分布[J]. 光学学报, 2001, 21(4): 404-409.
- [39] 孙兰香, 于海斌, 郭前进, 丛智博, 杨志家. 激光诱导击穿光谱在物质成分定量分析方面的实验研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2235-2240.
- [40] 郑贤锋, 唐晓闯, 凤尔银, 杨锐, 季学韩, 崔执凤. 缓冲气体对激光等离子体光谱特征影响的实验研究[J]. 原子与分子物理学报, 2002, 19(3): 267-271.

**再次投稿您将享受以下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>