

非平坦样品激光诱导等离子体光谱特性研究

雷冰莹^{1,2}, 许博坪^{1,2}, 王屹山^{1,2}, 朱香平^{1,2}, 段忆翔³, 赵卫^{1,2}, 汤洁^{1*}

1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119
2. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049
3. 西北大学化学与材料科学学院, 合成与天然功能分子教育部重点实验室, 陕西 西安 710127

摘要 激光诱导击穿光谱(LIBS)作为一种快速、实时的元素分析技术, 由于其在痕量元素探测、地质环境监测等领域有着广阔的应用前景, 而受到人们极大的关注。在实际应用中, 样品表面是影响等离子体产生及其特性的关键环境因素之一。在大气环境下, 利用脉宽为 8 ns、波长为 1 064 nm 的纳秒脉冲激光产生等离子体, 对比研究了天然岩石样品在非平坦和平坦表面条件下等离子体的发射光谱。基于激光辅助辐射波模型, 阐释了非平坦样品表面对其光谱特性的影响。通过对比等离子体时间积分光谱, 发现非平坦样品的谱线强度相比于平坦样品的谱线强度减弱了近 70%, 该结果说明非平坦样品表面对 LIBS 真实测量数据的负面影响不可忽视。针对褐铁矿样品中的谱线 Fe I 404.58 nm 和 Fe I 438.35 nm, 研究了在平坦和非平坦样品表面下的峰值强度以及其衰减因子随激光能量的变化规律, 结果表明非平坦样品表面条件下采集的光谱强度始终低于平坦样品表面的光谱强度。光谱强度的衰减因子先随激光能量增大而逐渐降低, 并在激光能量 33 mJ 达到最小值, 后随激光能量的进一步增大而增大。实验结果进一步表明在非平坦样品表面条件下产生了密度较低的等离子体, 并且非平坦与平坦样品的电子密度的比值在激光能量 33 mJ 时达到最小, 此结果与光谱强度的衰减因子随激光能量的变化趋势一致, 这是源于非平坦样品表面会形成较大激光入射角度, 使得激光等离子体能量吸收区厚度变薄, 产生等离子体屏蔽效应所对应的激光能量阈值升高。此外, 样品表面状态和激光能量对等离子体温度的影响甚微。阐述了非正入射时等离子体特征参数与正入射时等离子体特征参数的联系和差异, 揭示了非平坦样品激光等离子体特征参量变化的内在物理机制, 为室外 LIBS 探测技术在元素定性和定量分析中光谱强度的校正提供参考。

关键词 激光诱导击穿光谱; 非平坦样品; 原子光谱; 等离子体温度; 电子密度

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)10-3024-07

引言

LIBS 是基于原子发射光谱学的物质成分和浓度分析技术, 其采用高能量脉冲激光烧蚀材料, 使材料表面的微量样品瞬间气化形成高温、高密度的激光等离子体, 发射出带有样品内元素特征波长的等离子体光谱, 谱线的波长和强度分别反应了样品中的元素组成与含量^[1-4]。利用 LIBS 技术具有无需对样品进行复杂的预处理、样品需求微量、可以实现远距离在线探测等优点, 在对材料进行远程无损分析、定性识别物质以及定量物质成分分析等方面具有重要的应用^[5-7]。

LIBS 技术凭借上述优势, 已经被广泛用于深空行星探

索、地质、法医、冶金、生物医药、以及环境监测等众多领域^[1-5]。然而在实际应用环境中, 样品表面作为重要的环境因素, 对 LIBS 探测结果有着直接和显著的影响。在 LIBS 痕量元素的诊断和分析应用领域, 样品表面对 LIBS 分析灵敏度和可靠性起着至关重要的作用。针对室外 LIBS 探测, 不规则目标物, 即非平坦样品, 几乎随处可见。不同于实验室中预处理样品或标准样品的平坦表面, 由于非规则样品的表面状态复杂多样且不可预测, 所以当激光聚焦在样品表面上时就无法确保其垂直入射。此时, 大角度的激光入射将降低激光功率密度和激光烧蚀效率, 从而减少样品烧蚀量, 进而削弱激光等离子体光谱的信号强度, 此对痕量元素的诊断和分析带来了极大困难。在 LIBS 测量过程中, 由非平坦样品

收稿日期: 2021-07-30, 修订日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877210, 52177166), 陕西省自然科学基金项目(2020JM-309)资助

作者简介: 雷冰莹, 1994 年生, 中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: leibingying2016@opt.cn

* 通讯作者 e-mail: tangjie@opt.ac.cn

表面而引起的负面效果也被 Li 和 Han 等多个研究团队证实^[8-9]。实验结果说明样品表面的不均匀性会严重影响等离子体光谱信号的强度。为了探究不平整样品表面对 LIBS 探测结果的影响,为室外 LIBS 探测技术在痕量元素分析和环境监测方面提供更可靠的矫正和优化策略,针对非平坦样品激光诱导等离子体光谱及特征参数表征的研究十分必要。

迄今为止,针对非平坦样品(即在激光非正入射的条件下),特别是具有宏观毫米尺度以上不平整表面的固体目标,几乎没有系统性的工作以全面探究 LIBS 特征参数随样品表面状态的变化情况。鉴于此,本工作实验对比研究了天然岩石样品在非平坦和平坦表面条件下等离子体的时间积分光谱。此外,在不同激光能量下,本文对比分析了等离子体温度和电子密度,阐释了非平坦样品激光等离子体特征参量变化的物理机制。

1 实验部分

实验原理如图 1 所示,该 LIBS 设备配备了 1 064 nm 波长的 Nd:YAG 单脉冲激光器(Quantel, Ultra 100),脉冲时间宽度为 8 ns。为了探究不同激光能量下的光谱信号以及等离子体特性参数的变化规律,激光能量范围设置为 18~48 mJ 并且重复频率保持在 10 Hz。激光器发出的脉冲光束首先经过分束镜(BS, THORLABS BST11),分出的少部分能量用能量计(Energy meter display)对激光的能量大小进行监测,然后经过透镜(L1, $f=150$ mm)聚焦于固定在三维平移台上的样品表面。激光激发产生的等离子体辐射光经光纤探头收集会聚耦合到光纤,经光纤传输至光谱仪(Andor Tech., Shamrock 303i),光谱分辨率为 0.05 nm。实验前,使用汞灯获得光谱并以 NIST 数据库为标准校准光谱波长^[10]。

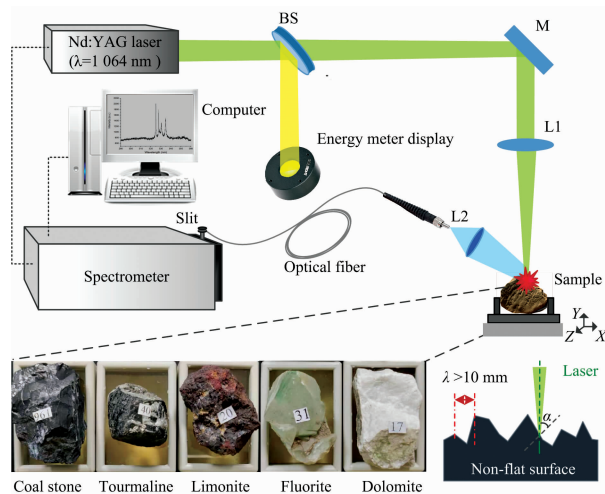


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

为了模拟实际应用中非平坦样品表面对激光等离子体特性的影响,5 块天然岩石标本(煤矿石,电气石,褐铁矿,萤石和白云石)被选为实验样品,并固定于 XYZ 三维平移台。图中样品上标注的数字,如 17(白云石)和 31(萤石),分别表

示不同样品对应的种类编号。本实验中,通过调节三维平移台使固定的样品在 XY 平面内移动,从而改变激光脉冲的烧蚀位置;通过调节三维平移台沿 Z 轴移动,使不同样品表面上的目标点与聚焦透镜之间的距离保持一致。在实际应用中,凹凸不平的样品表面极易导致激光束非正入射。因而,以激光的非正入射和正入射激发,来分别示意 LIBS 非平坦和平坦样品表面的实际应用。实验中改变脉冲激光能量,分别在激光束非正入射和正入射两种方式下激发等离子体,并通过对比光谱强度以及相应等离子体特征参数,探究非平坦样品表面对 LIBS 探测结果的影响。

在聚焦光斑直径(D)约 200~400 μm 的情形下,激光与样品作用位置的法线方向所对应接触面的面积可达毫米甚至亚毫米尺度。考虑到实验样品均为未打磨的天然岩石,其表面状态随机复杂。以激光正入射为例,当烧蚀平面的尺度(L)远大于激光烧蚀尺度($L > 10 D$)时,可以认为该区域内的样品表面平坦并且与入射的激光束正交;当考察的接触面形状误差局限于激光烧蚀尺度时,样品表面的朝向因激光与样品之间作用位置的微小变化会发生大幅改变,从而导致在当前实验条件受限的情况下,无法精确控制和测量激光脉冲烧蚀样品时的激光入射角度。为了避免激光入射时因样品表面形貌突变所带来的影响,实验以直径~4 mm 作为烧蚀平面尺度的选择标准,在每个样品中预先筛选和确定出两个目标烧蚀范围,分别作为 LIBS 作用于非平坦样品和平坦样品表面的对照组进行研究。不同于标准样品,天然岩石样品除了表面形貌变化之外还存在明显的不均匀性。为了降低样品不均匀性对 LIBS 探测结果的影响,基于已选定的目标烧蚀范围,实验分别在平坦和非平坦样品表面的情况下选取 5 个激光烧蚀点,每个目标点采集 10 次光谱,并对不同激光烧蚀点的 10 个光谱测量结果做平均值处理,最终基于处理出的 5 组数据计算出误差棒。

根据表面结构参数的国家标准(GB/T 3503—2009),产品或零件的表面轮廓特征可按波距(λ)划分为三种类型,即表面粗糙度、表面波纹度和形状误差。值得注意的是,本文所研究非平坦表面特指由样品的形状位置误差造成的表面不平整,即波距 $\lambda > 10$ mm。仅在激光聚焦尺度及以下的固体目标(微观几何形状误差),其样品表面的变化对激光等离子体的影响可忽略不计,因此样品表面粗糙度的影响并不在本次实验的考虑范畴。如图 1 所示,当激光入射于非平坦样品表面时极易发生激光非正入射,在此情况下入射角 $\alpha > 0^\circ$ 。

2 结果与讨论

2.1 非平坦样品表面对等离子体光谱的影响

对于不同种类的岩石样品,平坦和非平坦样品表面处采集的 LIBS 积分光谱如图 1 所示。实验中激光能量均设置为 33 mJ。延迟时间和采集门宽分别设置为 300 ns 和 100 μs 。如图所示,相比于平坦样品表面,在非平坦样品表面的情况下,不同样品中光谱强度都有明显的减弱趋势。在图 1(a)煤矿石样品中,平坦样品表面情况下 Al I 309.27 nm 特征谱线的信号质量较高,但在非平坦样品表面情况下其信号强度

迅速降低约四倍,导致该特征谱线几乎无法辨别。可见,当 LIBS 应用于非平坦的样品表面时,光谱强度被大大削弱,从

而降低了室外 LIBS 探测灵敏度。

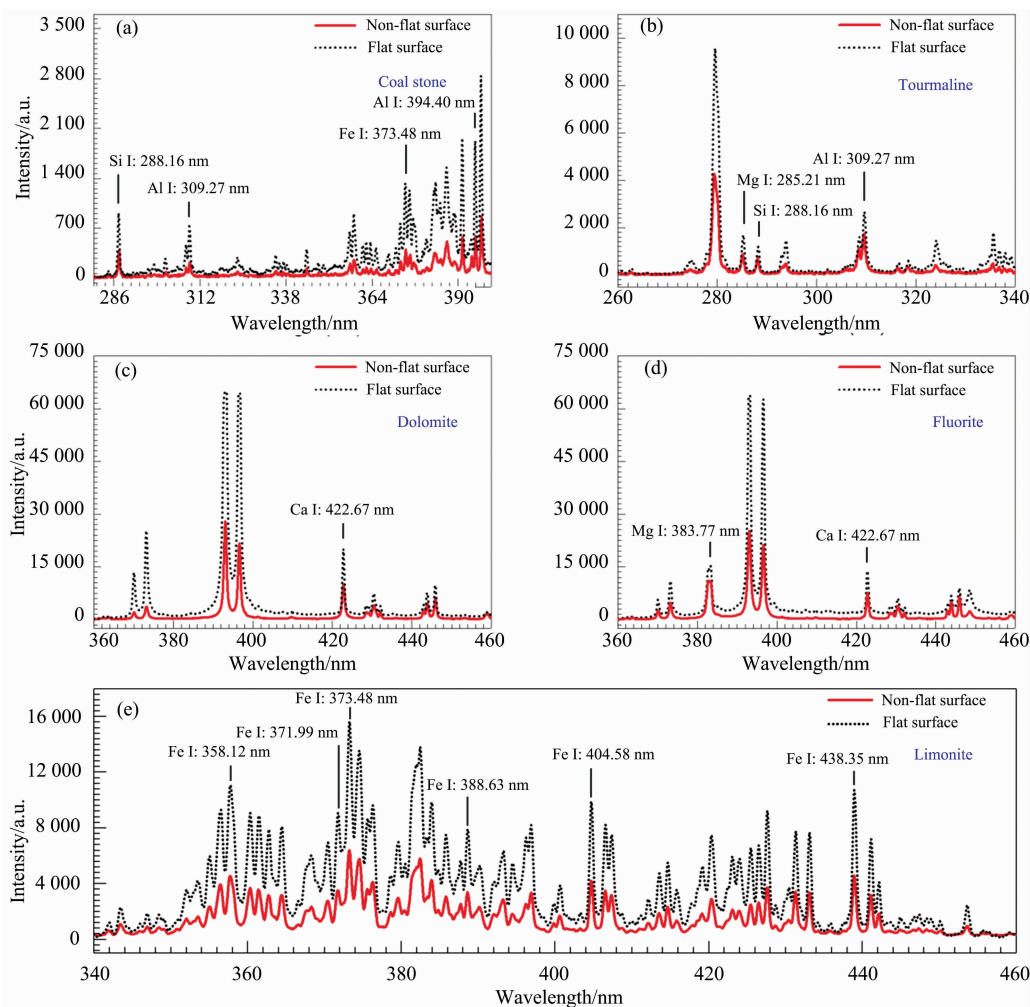


图 2 非平坦和平坦样品表面条件下的时间积分光谱对比

岩石样品分别为(a)煤矿石, (b)电气石, (c)白云石, (d)萤石以及(e)褐铁矿

Fig. 2 Comparison of the time-integrated spectra under the conditions of non-flat and flat sample surfaces

The rock samples are (a) Coal stone, (b) Tourmaline, (c) Dolomite, (d) Fluorite, and (e) Limonite, respectively

激光能量作为 LIBS 技术中的关键参数之一,直接影响激光诱导等离子体的产生和膨胀过程。为了研究不同激光能量下样品表面对 LIBS 光谱探测结果的影响,实验中激光能量以 5 mJ 为间隔在 18~48 mJ 调节范围中变化,对褐铁矿样品的两种不同样品表面情况下的谱线(Fe I 404.58 nm 和 Fe I 438.35 nm)强度随激光能量的变化进行分析。如图 2(a)所示,随激光脉冲能量的增大,平坦表面和非平坦表面条件下的谱线强度均呈现显著增强趋势。然而在各个激光能量下,非平坦样品表面条件下测得的谱线强度明显小于在平坦样品表面情况下获得的结果。若定义衰减因子(Reduction factor)为非平坦样品表面情况下获得谱线的强度与平坦表面情况下获得谱线的强度的比值,图 2(b)给出了衰减因子随激光能量的变化曲线。结果表明,衰减因子先随激光能量增大而逐渐降低,并在激光能量 33 mJ 达到最小值,后随激光能量的进一步增大而增大。由于激光功率密度直接影响 LIBS

中样品烧蚀量,从而影响等离子体的辐射光谱强度。根据激光功率密度公式 $I = E / (S \times \tau)$,其中 E 为激光能量; S 为激光与样品表面的接触面积; τ 为激光的脉宽。当样品表面非平坦时,较大激光入射角度使得激光与样品表面的接触面积变为类椭圆形。假设在非平坦样品表面条件下的激光入射角大于 0° ;平坦样品表面条件下的激光束为垂直入射,可计算得出 $S(\text{非平坦表面}) > S(\text{平坦表面})$,由此可推出非平坦表面条件下的激光功率密度更小^[11]。因此,激光等离子体发射光谱强度的降低可归因于非平坦样品表面情况下更弱的激光烧蚀过程。

2.2 非平坦样品表面对等离子体特性参数的影响

电子密度可采用 Stark 展宽法计算^[12]。实验采用 Lorentz 函数对原子谱线进行拟合,并获得该谱线的实验拟合线宽($\Delta\lambda_L$)。通过检测低压汞灯发射谱线,确定仪器展宽($\Delta\lambda_L^{\text{Instrument}}$)为 0.048 nm。Stark 展宽($\Delta\lambda_L^{\text{Stark}}$)可通过 $\Delta\lambda_L^{\text{Stark}} =$

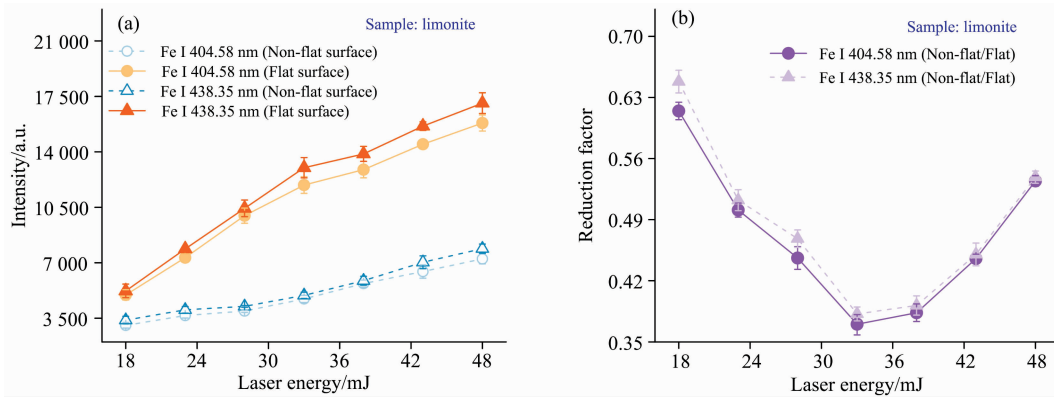


图 3 非平坦和平坦样品表面条件下的激光能量对光谱 (Fe I 404.58 nm 和 Fe I 438.35 nm) 峰值强度的影响

(a): 谱线峰值强度; (b): 衰减因子随激光能量的变化

Fig. 3 The influence of laser energy on spectral peak intensity (Fe I 404.58 nm and Fe I 438.35 nm) under the conditions of non-flat and flat sample surface

The variation of (a) the spectral intensity and (b) the reduction factor with laser energy

$\Delta\lambda_L - \Delta\lambda_{L, \text{Instrument}}$ 进行计算^[13]。

图 4(a)和(b)分别展示了激光能量 33 mJ 时在不同样品表面情况下 Fe I 438.35 nm 谱线的 Stark 展宽轮廓。在非平坦样品表面情况下,电子密度为 $1.67 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 然而平坦样品表面情况下的电子密度为 $1.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。图 4(c) 为非平坦和平坦样品表面条件下的电子密度随激光脉冲能量变化,其中激光能量范围设置为 18~48 mJ,延迟时间和采集门宽分别设置为 300 ns 和 100 μs 。对比结果可知:在不同激光能量下,非平坦样品表面情况下的电子密度明显低于平坦表面情况下的电子密度;两种样品表面条件下的电子密度随激光能量增大都有明显上升的趋势。其中值得注意的是,非平坦样品表面条件下的电子密度在激光能量 33 mJ 时呈现区域平缓的趋势,而平坦样品表面条件下的电子密度在激光能量 28 mJ 时就开始趋于平缓。对比非平坦与平坦样品表面状态下的电子密度的比值,可看出电子密度比值先随激光能量的增大而降低,在 33 时达到最小值,后随激光能量的增大而升高。由于在相同激光能量下非平坦样品表面导致了更低的激光功率密度,非平坦样品表面条件下的激发过程比平坦表面条件下激发过程的效率更低,所以在非平坦样品表面状态下观察到了更低的电子密度。

非平坦和平坦样品表面条件下电子密度随激光能量变化可用等离子体屏蔽效应进行解释:在激光脉冲的初始阶段,当激光功率密度低于击穿阈值时,LIBS 中等离子体处于激光辅助辐射波(LSD)状态。此时冲击波前沿的强度足以加热气体,并且随着激光能量的进一步升高,其能量大部分将被吸收,使得激光脉冲无法完全到达样品表面继续烧蚀作用。当激光能量处于较低水平时,产生的电子密度还不高,对光子的吸收效果很弱。因此,非平坦和平坦样品表面条件下的脉冲激光束都可以在几乎无衰减的前提下直接接触样品表面,此时电子密度随激光能量的增大而快速上升。当激光能量继续增大使得电子密度增大至某临界值,等离子体开始对激光变得不透明,并对激光能量形成了一个有效的吸收区。由于吸收区的厚度与激光入射角度呈反比,在非平坦样品表

面条件下的激光入射角较大,对应于较薄的能量吸收区。而在平坦样品表面,激光的垂直入射对应于较厚的能量吸收区。因此相比于非平坦样品表面,等离子体屏蔽效应在平坦样品表面情况中更加显著。非平坦样品表面情况下的薄吸收区可确保更多的激光能量穿过,使得电子密度的增长在较高激光能量(33 mJ)趋于平缓,而在平坦样品表面情况下,因为厚吸收区的存在,较低激光能量处(28 mJ)就会产生明显等离子体屏蔽效应,从而使得电子密度增长缓慢,出现图 3(b)中谱线强度的衰减在 33 mJ 处达到最小值这一现象。

等离子体温度(T_e)作为激光等离子体的另一个关键物理参数,可通过 Saha-Boltzmann 方法进行计算。在目前的实验条件下,采用褐铁矿样品中的 Fe 原子谱线来计算等离子体温度。计算等离子体温度所使用的参数均来自 NIST 数据库,参数详见表 1^[10]。

图 4(d)展示了非平坦和平坦样品表面条件下的等离子体温度随激光脉冲能量变化。当激光能量为 33 mJ 时,非平坦样品表面条件下的等离子体温度约为 8 545.8 K,平坦样品表面条件下的等离子体温度约为 8 763.8 K。当激光能量范围扩大至 18~48 mJ 时,对比结果可以发现:在不同激光能量下,非平坦样品表面条件下的等离子体温度略低于平坦表面情况下的等离子体温度。然而,考虑到 LIBS 测量过程中存在 10%~15%的不确定性,非平坦样品表面条件下等离子体温度相比于平坦表面下的降低趋势并不明显。

基于激光辅助辐射波模型^[11],等离子体温度可由式(1)表示

$$T_p \approx \left\{ \frac{I_{\text{laser}} e_i}{\sigma \epsilon E} \right\}^{0.18} \quad (1)$$

式(1)中, I_{laser} 、 σ 和 ϵ 分别表示激光能量密度,Stefan-Boltzmann 常数以及等离子体辐射率; e_i 为等离子体在燃点时的比内能; E 表示等离子体内能与等离子体温度之间的相关系数。在式(1)中, $\frac{e_i}{E}$ 的取值依赖于电离势,等离子体辐射率 ϵ 与初始粒子密度有关。公式右边的指数项较低,仅为 0.18,

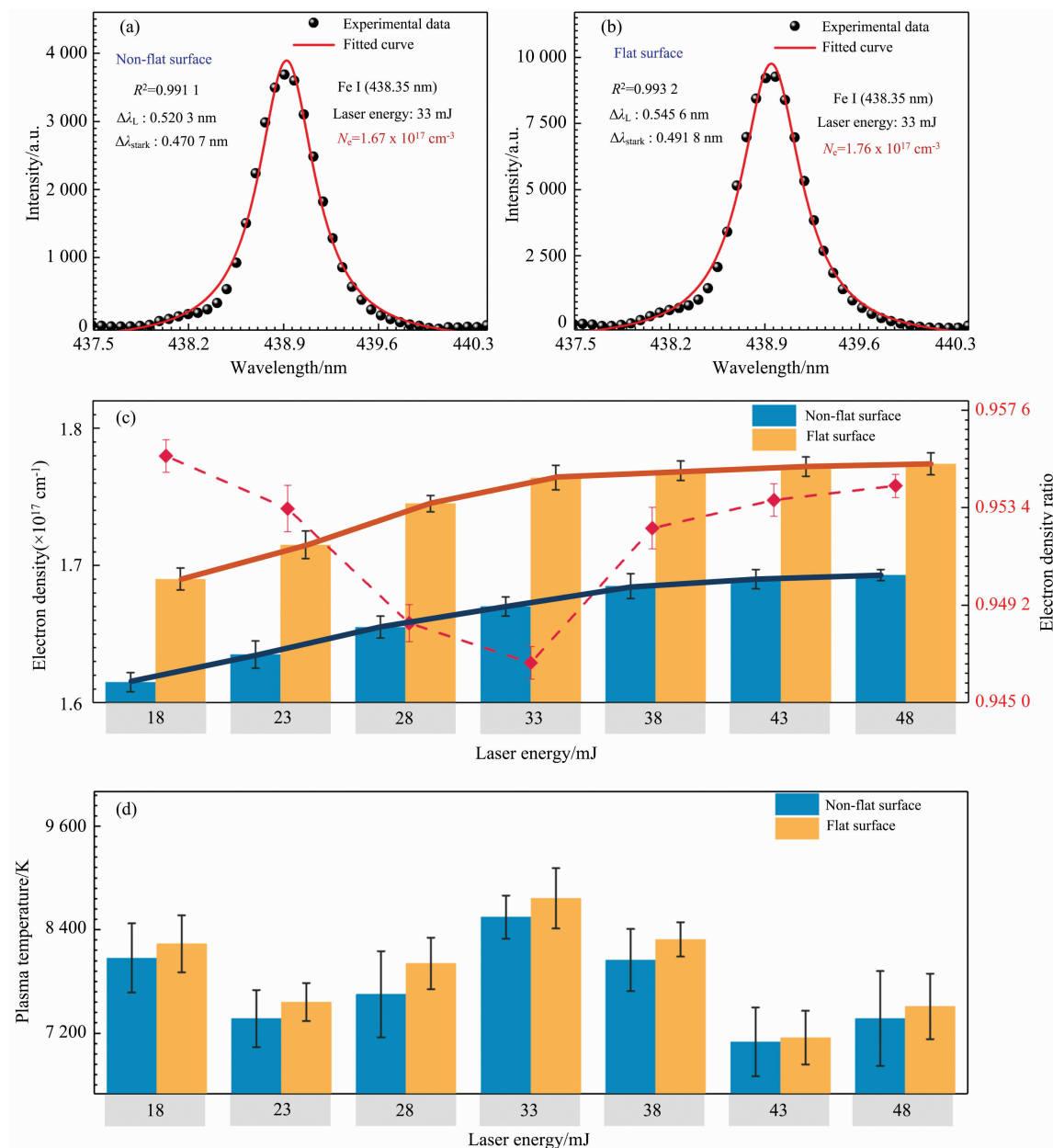


图 4 电子密度和等离子体温度的计算

Fe I 438.35 nm 谱线在(a)非平坦和(b)平坦样品表面条件下的 Stark 展宽轮廓图；(c)非平坦和平坦样品表面条件下，电子密度随激光能量的变化；(d)非平坦和平坦样品表面条件下，等等离子体温度随激光能量的变化

Fig. 4 Calculation of electron density and plasma temperature

Stark broadening profile of Fe I 438.35 nm under the conditions of (a) non-flat and (b) flat sample surface; (c) The variation of electron density with laser energy under the conditions of non-flat and flat sample surface; (d) The variation of the plasma temperature with laser energy under the conditions of non-flat and flat sample surface

表 1 褐铁矿样品中 Fe(I)谱线的光谱参数
Table 1 Spectroscopic parameters of Fe(I) lines in limonite sample

Wavelength λ/nm	Statistical weight of upper level of the transitions g_m	Transition probability $A_{mm}/(\times 10^7 \text{ s}^{-1})$	Energy of the upper level E_m/cm^{-1}
358.12	13	10.2	34 843.96
371.99	11	1.6	26 874.55
373.48	11	9.0	33 695.40
388.63	7	0.5	26 140.18
404.58	9	8.6	36 686.18
438.35	11	5.0	34 782.42

说明等离子体温度对激光辐照度、原子密度和组分电离势的依赖较弱,进一步阐释了激光能量和样品表面对等离子体温度的微弱影响。

3 结 论

开展了非平坦和平坦样品表面条件下,激光诱导等离子体光谱及特征参数表征的研究。结果表明,由于较低的激光

功率密度和较少的样品烧蚀量,非平坦样品表面情况下的谱线强度低于平坦样品表面情况下的谱线强度。此外,研究发现非平坦与平坦样品表面情况下的电子密度的比值在激光能量 33 mJ 时达到最小值,与 Fe I 谱线强度的衰减因子随激光能量变化的规律一致。这是源于非平坦样品表面会形成较大激光入射角度,使得激光等离子体能量吸收区厚度变薄,相对于平坦样品表面,产生等离子体屏蔽效应所对应的激光能量阈值升高。

References

- [1] Guo L, Zhang D, Sun L, et al. *Frontiers of Physics*, 2021, 16(2): 22500.
- [2] Zhang Y, Sun C, Gao L, et al. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2020, 166: 105802.
- [3] Li J, Lei B, Wang J, et al. *Communications Physics*, 2021, 4: 64.
- [4] Li J, Wang J, Lei B, et al. *Advanced Science*, 2020, 7: 1902616.
- [5] YUAN Ru-jun, WAN Xiong, WANG Hong-peng(袁汝俊, 万 雄, 王泓鹏). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2021, 41(4): 1265.
- [6] Xue B, Tian Y, Li N, et al. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2020, 35: 2880.
- [7] Cui M, Deguchi Y, Wang Z, et al. *Plasma Sci. Technol.*, 2019, 21(3): 034007.
- [8] Li X, Wang J, Li H, et al. *Applied Physics B*, 2019, 125: 236.
- [9] Han D, Joe Y J, Ryu J S, et al. *Spectrochimica Acta Part B*, 2018, 146: 84.
- [10] National Institute of Standards and Technology. August 20, 2020. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>.
- [11] Lei B, Wang J, Li J, et al. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20541.
- [12] Lei B, Xu B, Wang J, et al. *RSC Advances*, 2020, 10: 39553.
- [13] Lei B, Wang J, Li J, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2018, 57(10): 106001.

Investigation of the Spectral Characteristics of Laser-Induced Plasma for Non-Flat Samples

LEI Bing-ying^{1, 2}, XU Bo-ping^{1, 2}, WANG Yi-shan^{1, 2}, ZHU Xiang-ping^{1, 2}, DUAN Yi-xiang³, ZHAO Wei^{1, 2}, TANG Jie^{1*}

1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Synthetic and Natural Functional Molecule Chemistry of Ministry of Education, College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), a fast and real-time tool for elemental analysis, has attracted great attention due to its broad applications in trace detection, geological environment monitoring, and other fields. The sample surface is one of the key environmental factors that affect the generation and characteristics of plasma. In this work, a 1 064 nm-laser beam with a pulse width of 8 ns is used to produce plasma in ambient air and comparatively investigate the emission spectra of a series of natural rock samples under non-flat and flat samples surfaces. Based on the laser-supported detonation wave model, the influence of non-flat sample surface on spectral characteristics of laser-induced plasmas is discussed. For time-integrated spectra, the results show that the spectral intensities of the atomic lines of the non-flat sample are reduced by nearly 70% compared to those of the flat sample. This indicates that the negative effect of the non-flat sample surface on the LIBS cannot be ignored. According to the signal intensity of the spectral lines, Fe I 404.58 nm and Fe I 438.35 nm from limonite sample under different laser energies, the variation of their peak intensities and reduction factor with the change of laser energy were studied under the conditions of flat and non-flat sample surfaces. It is found that the spectral intensity under the condition of the non-flat sample surface is lower than that under the condition of the flat sample surface. It is worth noting that the reduction factor of spectral intensity first decreases gradually with laser energy, reaches the minimum value at 33 mJ, and then increases with the further increase of laser energy. Further observations show that laser-plasma with lower electron density is generated on the non-flat sample surface, and the ratio of the electron density of the non-flat sample to that of the flat sample reaches its minimum at the laser energy of 33 mJ, which is consistent with the changing trend of reduction factor with laser energy. This mainly arises because a thinner energy absorption region in laser-plasma is formed due to the large laser incident angle on the non-flat sample surface, thereby increasing the laser energy threshold corresponding to the plasma shielding. Moreover, it is found that the sample surface and the laser energy have little effect on the plasma temperature.

Keywords Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS); Non-flat sample; Atomic lines; Plasma temperature; Electron density

(Received Jul. 30, 2021; accepted Feb. 15, 2022)

* Corresponding author