

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2024.02.015

基于平凸柱面镜的 LIBS 光束整形系统设计

陈姿颖¹ 李红莲^{1*} 殷啸林¹ 方立德¹ 李莹莹^{2*}

(1. 河北大学 质量技术监督学院, 河北 保定 071000;

2. 河北白沙烟草有限责任公司 保定卷烟厂 供应部, 河北 保定 071000)

摘要 为改善激光诱导击穿光谱(Laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)技术激光能量不均匀分布的问题,利用仿真软件对半径为 12.5 mm 的不同焦距型号的平凸柱面镜进行光路成像模拟,模拟显示满足激光器条件的最佳焦距为 100 mm,在此基础上搭建基于 LIBS 光束的整形系统。实验表明,相比于无平凸柱面镜整形,样品中锶元素的焦斑光强均方差系数平均降低了 41.91%,焦斑光强峰谷比系数平均降低了 41.27%,而能量均匀度平均提高了 17.23%,拟合决定系数由 0.860 提高到了 0.914。结果显示,使用平凸柱面镜可提高光束能量的均匀性,验证了平凸柱面镜是激光光束整形的一种有效方法。

关键词 激光诱导击穿光谱;光束整形;平凸柱面镜;均匀性

中图分类号: O657.38 O433.4 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-1035(2024)02-0247-08

Design of LIBS Beam Shaping System Based on Plano-Convex Cylindrical Mirror

CHEN Ziyang¹, LI Honglian^{1*}, YIN Xiaolin¹, FANG Lide¹, LI Yingying^{2*}

(1. School of Quality and Technology Supervising, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China;

2. Department of Supply, Baoding Cigarette Factory, Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract In order to improve the uneven distribution of laser energy in laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology, simulation software was used to simulate the optical path imaging of flat convex cylindrical mirrors with different focal lengths of 12.5 mm radius. The simulation showed that the optimal focal length meeting the laser conditions was 100 mm. On this basis, a shaping system based on LIBS beam was built. Compared with the non-convex mirror, the mean square error coefficient of focal spot light intensity for the strontium element in the sample decreased by an average of 41.91%, the peak-to-valley ratio of focal spot intensity decreased by an average of 41.27%, the energy uniformity increased by

收稿日期: 2023-09-21 **修回日期**: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62173122); 河北省自然科学基金重点项目(F2021201031); 河北省引进留学人员资助项目(C20210312)

作者简介: 陈姿颖, 女, 硕士研究生, 主要从事光谱检测及其应用研究。E-mail: m13996889863@163.com

* **通信作者**: 李红莲, 女, 副教授, 主要从事光谱检测技术及其在气体以及固体测量中的应用和可调谐光纤激光器及应用等方面的研究。

E-mail: lihonglian@hbu.edu.cn

李莹莹, 男, 助理工程师, 主要从事烟用辅料上机适用性的研究。E-mail: lylylycs@126.com

引用格式: 陈姿颖, 李红莲, 殷啸林, 等. 基于平凸柱面镜的 LIBS 光束整形系统设计[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(2): 247-254.

CHEN Ziyang, LI Honglian, YIN Xiaolin, et al. Design of LIBS Beam Shaping System Based on Plano-Convex Cylindrical Mirror[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(2): 247-254.

an average of 17.23%, and the coefficient of determination for the fitting increased from 0.860 to 0.914. The results show that the plano-convex cylindrical mirror can improve the uniformity of beam energy, proving that it is an effective method for laser beam shaping.

Keywords laser-induced breakdown spectroscopy; beam shaping; plano-convex cylindrical mirror; uniformity

在食品原料、中药材、烟草等植物生长过程中,土壤受到工业排放的污染,根部会吸收土壤中的金属微量元素,这些微量金属随着植物的生长被转移到其他部分。随着传统电化学分析法和应用中子活化分析法在微量元素测试方面的应用减少,金属微量元素检测分析逐渐向快速多元素仪器测定的方向发展^[1-3],如:原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法、原子发射光谱法、激光诱导击穿光谱法等。其中激光诱导击穿光谱技术利用激光和物质间直接接触产生直接作用,省略了以往中间繁琐复杂的制作流程并具备了快捷分析的优点^[4-5],在近年的地质^[6]、生物^[7]和环保^[8]等领域普遍运用。根据研究发现,单模激光光束的波形能量密度呈现出中心强边缘弱的高斯分布,在光学材料应用中可能导致材料表面发生热灼烧效应,从而引起裂纹、溅射等缺陷使探测灵敏度降低,影响后续相关分析。因此,改善高斯激光光束能量分布均匀性成为了 LIBS 技术的研究热点之一。

改变高斯光束光斑能量密度分布,则需要对其进行一定程度的整形,整形成同一外形轮廓或不同轮廓的平顶光束。平顶光束是在光束横截面上具有均匀光强能量和均匀相位分布的一类傍轴光束,具有填充因子大、强度调制小、对光学系统内光学元器件的损伤风险比较小等优点^[9]。在优化理论算法整形方面,根据计算形式和使用的理论方法有几何理论、标量理论和矢量理论三类。常用优化算法基础是标量理论,其中包括 G-S 算法、Y-G 算法、输入-输出算法等。PANG 等^[10]提出了一种采用具有特殊球形初始相位的 Gerchberg-Saxton(GS)算法计算纯相位全息图的新方法,实现了降噪平顶光束整形。LIU 等^[11]提出了一种基于矢量衍射的光束整形方法,利用麦克斯韦方程组的时间反转对称性,对瑞利矢量衍射积分进行了修正。然而与标量衍射方法相比,约束了光场各分量的设计。在实验光学元件整形方面,光阑拦截是最初取得平顶光束的一种整形

措施^[12]。张浩等^[13]利用设计的开普勒型非球面整形镜实现了大口径激光的均匀光束。翟中生等^[14]提出了一种基于组合光栅的任意形状光束整形方法,利用外光栅阻挡非 0 级光束,内光栅改善几何掩模能量分布获得均匀性较好的平顶光束。刘文静等^[15]采用一种可有效抑制散斑噪声的衍射元件设计方法,通过选择一种特殊的初始相位,在不降低衍射效率的同时生成了环形平顶光束。

上述研究方法虽然可以实现一定程度的光束整形,但是部分平顶光在加工应用中局限性很大,整形效果不够理想,适用的光束范围特殊。因此本文提出一种基于平凸柱面镜的光束整形方法改善激光光束的能量密度分布。使用光学仿真软件,分别对平凸柱面镜的不同焦距尺寸进行成像模拟,确定整形实验元件的具体参数。并利用其设计和搭建光束整形实验系统,对平凸柱面镜的整形效果进行测试和验证。

1 实验仿真

1.1 平凸柱面镜的模拟设计

光学软件在序列模式下设置波长 1 064 nm,镜头材料 BK7,光源标准面的曲率半径为无限,厚度为无限,成像平面曲率半径为无限,平凸柱面镜中平面的曲率半径为无限、半直径 12.5 mm,柱面的曲率半径 51.680 mm、半直径 12.5 mm,改变其焦距即改变平面和柱面厚度的代数和。在 90~10 mm 的焦距大区间中,选取 90、96、104 和 110 mm 四个值进行模拟仿真,得到了如图 1 分别对应 $f=90$ 、96 mm 的两个光路三维布局图和光线追迹后图 2 分别对应 $f=104$ 、110 mm 的两个光束成像标准点列图。可以看出,前两个焦距中心部分光束聚焦在接收屏以前且焦距越大焦点越接近接收屏,而 104 mm 和 110 mm 的点列图中心部分光束较为发散,表现出滞后聚焦在接收屏之后且焦距越大越发散,由此将焦距控制在 96~104 mm 后继续模拟。

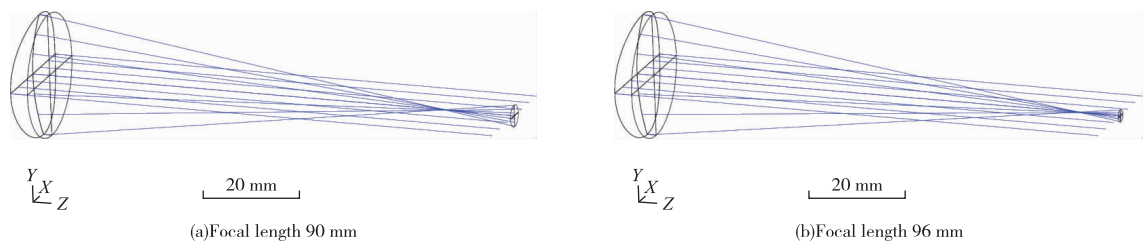


图 1 光路三维布局图

Figure 1 3D layout of optical path chart.

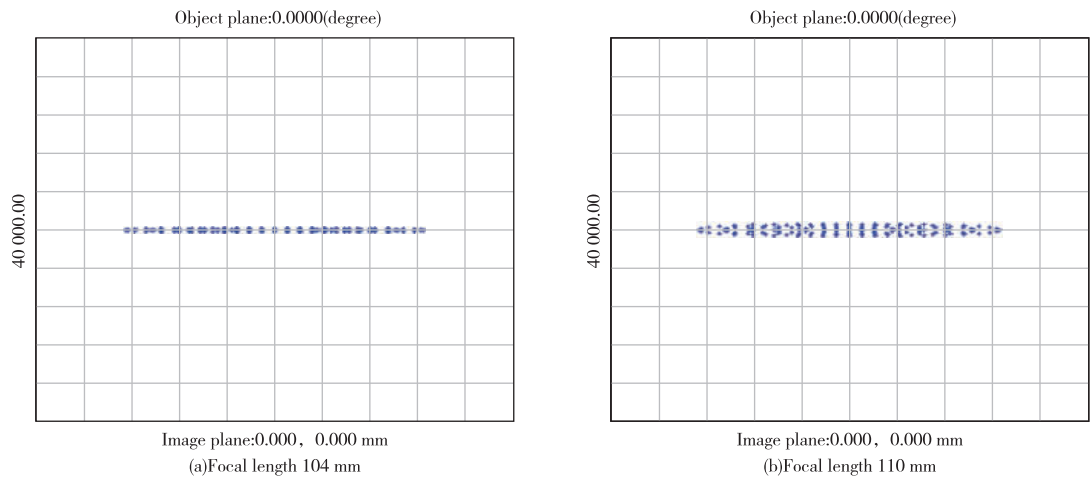


图 2 光束成像标准点列图

Figure 2 Beam imaging standard point chart.

其次,选取中间值 100 mm 焦距即平面和柱面厚度的代数和为 100 mm,设置平面厚度 3 mm,柱面厚度 97 mm。模拟得到通过平凸柱面镜透射后的图 3(a)三维布局成像和 3(b)光束成像点列图,可以看出焦点刚好在接收屏上,不提前也不滞后。由此确定满足实验条件的合适焦距为 100 mm。光学软件转换模式,在非序列模式下设置波长 1 064 nm,镜头材料 BK7,光源的陈列光线条数 20 条,分析光线条数

10^5 条,能量 1 W,X 半宽 5 mm,Y 半宽 10 mm。柱面透镜 Z 位置 10 mm,径向高度 10 mm,X 半宽 5 mm,厚度 10 mm,直径 1 为 0,直径 2 为 -25 mm,矩形探测器 Z 位置 60 mm,X 半宽 5 mm,Y 半宽 10 mm,像元数 100×100 ,X/Y 最小角为 -90° ,X/Y 最大角为 90° 。分析模拟得出如图 4 所示的三维光束透射平凸柱面镜光路成像图,包括 NSC(非序列模式)实体模型和 NSC 三维布局成像图。

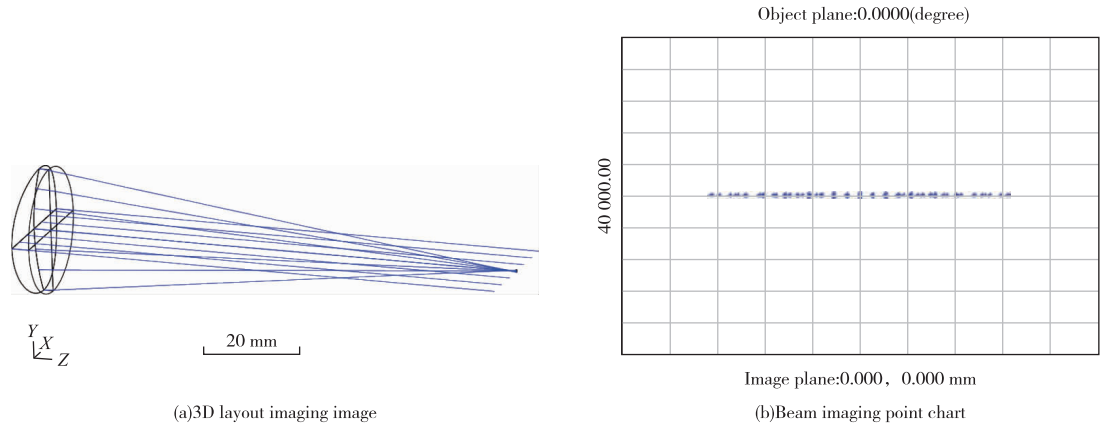


图 3 焦距 100 mm:(a)三维布局成像图;(b)光束成像点列图

Figure 3 Focal length 100 mm:(a) 3D layout imaging image;(b) Beam imaging point chart.

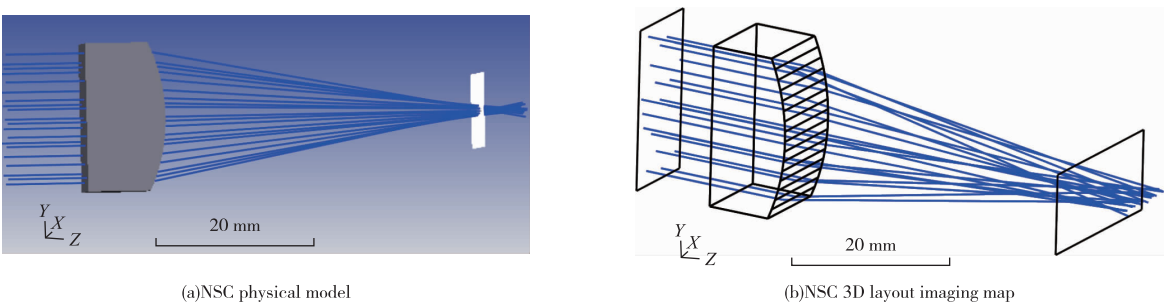


图 4 光束光路图:(a)NSC 实体模型;(b)NSC 三维布局成像图

Figure 4 Beam path chart:(a) NSC physical model;(b) NSC 3D layout imaging chart.

1.2 LIBS 光束整形系统确立

结合光学模拟结果和实验操作平台的各影响因素,拟采用 $f=100\text{ mm}$, $r=12.5\text{ mm}$ 的平凸柱面镜作为实验光学整形元件。光学软件在序列模式下模拟的表面矢高图如图 5 所示,宽度为 25 mm ,单面相对于光轴的偏心 $x=0\text{ mm}$, $y=0\text{ mm}$ 。

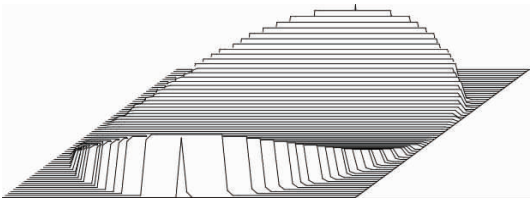


图 5 表面矢高图

Figure 5 Surface vector height chart.

光学系统一般分为共轴式光学系统和非共轴式光学系统两种^[16],本实验采用的非共轴式光学系统原理图如图 6 所示,为保证系统工作时处于稳定状态,首先需要进行预热。整个实验采集过程在空气环境下完成,采用输出波长为 $1\,064\text{ nm}$ 、脉宽为 6.4 ns 和 M^2 为 1.5 左右的 Nd: YAG 激光器(DAWA 系列)作为激发光源。激光器发出带有一定能量的高斯激光脉冲通过焦距为 100 mm ,半径为 12.5 mm 的圆形平凸柱面镜,经整形后的光束聚焦在样品表面,光纤对烧蚀激发产生的等离子体进行采集耦合,得到的光信号经过光谱仪放大转换成电信号传输至 PC 端后进行数据处理和光谱分析。其中延迟时间设置为 $1.9\text{ }\mu\text{s}$,光谱的检测波长 $199\sim 517\text{ nm}$,并根据实验得出最佳的透镜到样品的距离为 103 mm 。

2 结果与分析

2.1 样品制备

采集土壤样品经过自然风干、去除杂质和过筛,形成细致的小颗粒土壤样品后,用电子天平称取

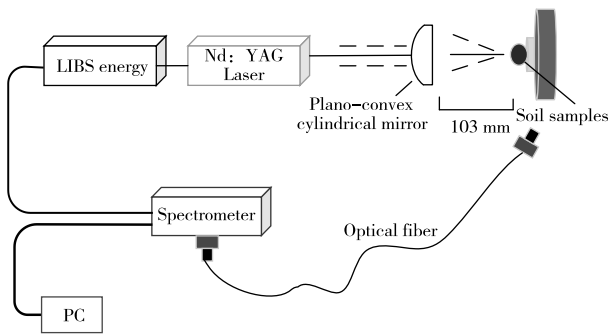


图 6 整形光学系统框图

Figure 6 Block diagram of shaping optical system.

10 份等量样品,通过准确计算分别在样品中加入不等量的光谱纯试剂 SrCl_2 ,配制成 Sr 的浓度如表 1 所示分别为: 0.01% 、 0.02% 、 0.05% 、 0.08% 、 0.15% 、 0.3% 、 0.5% 、 0.7% 、 0.9% 、 1.1% 。经过 1 h 的研磨后,添加蔗糖溶液再次进行研磨,研磨好的土壤粉末经 769YP-15A 型压片机在 15 MPa 压力下压片 10 min ,制成直径为 15 mm 、厚度为 5 mm 的圆片状样品,放入 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘干箱,烘干备用。

表 1 土壤样品制备表

Table 1 The preparation table of soil samples

Sample number	Sr concentration/ %
C ₀	0.01
C ₁	0.02
C ₂	0.05
C ₃	0.08
C ₄	0.15
C ₅	0.30
C ₆	0.50
C ₇	0.70
C ₈	0.90
C ₉	1.10

2.2 光斑能量变化

光斑能量分布能够反映激光光束的均匀性程度。如图 7 所示,激光光源最初是一个高斯分布的

圆形激光光束,中间能量高边缘能量弱。经过平凸柱面镜的整形后激光光束变成了较为狭长的且能量相对均匀的线性激光光束。其实际光束光斑如图 8 所示。

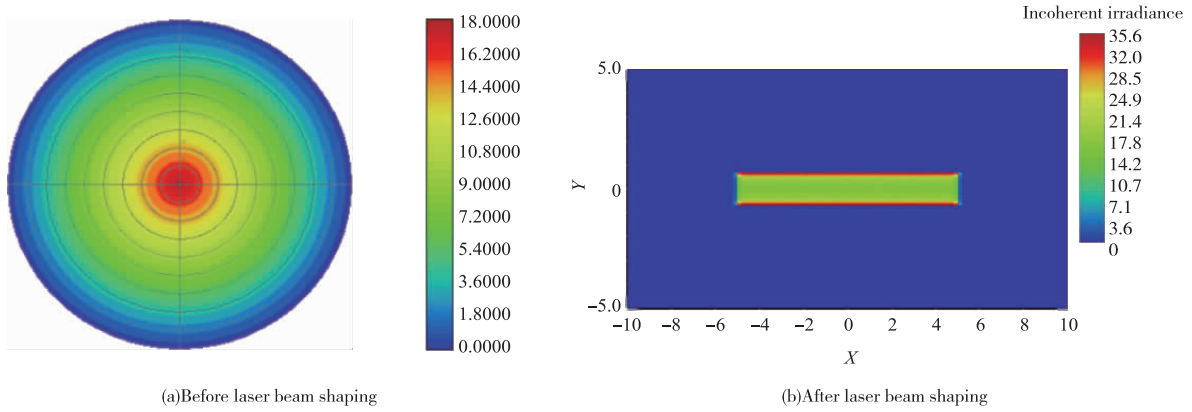


图 7 光斑能量图
Figure 7 Spot energy map.

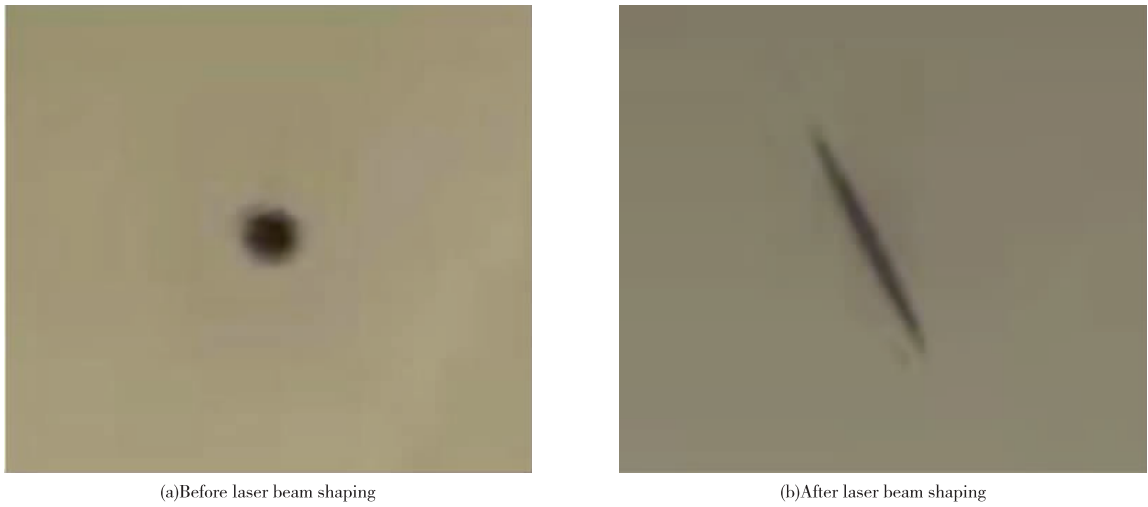


图 8 实际光斑图
Figure 8 Actual spot image.

2.3 焦斑光强均方差系数

焦斑光强均方差系数能够反映出一组数据的离散程度,间接表明光强的平均性,其表达式^[17]为:

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |I - \bar{I}|^2 / \bar{I}^2}{N - 1}} \tag{1}$$

式中, I 为实际输出光强, $\bar{I}$ 为输出光强的平均值, N 为实验次数, f_{RMS} 为光强均方差系数,值越小则均匀性越好。将实验所得的谱线强度带入式(1),计算绘制如表 2 所示。光束整形后样品光谱强度的焦斑光强均方差系数均降低了,且平均降低率达到了 41.91%,故可知通过平凸柱面镜整形后焦斑光强在均匀性方面有所改善。

表 2 激光整形前后焦斑光强均方差系数
Table 2 Mean square error coefficients of focal spot intensity before and after laser shaping

Sample number	Before shaping	After shaping	Decrease rate/%
C_0	0.400	0.258	35.48
C_1	0.415	0.105	74.61
C_2	0.300	0.244	18.74
C_3	0.402	0.139	65.46
C_4	0.304	0.285	6.49
C_5	0.367	0.122	66.68
C_6	0.200	0.130	35.28
C_7	0.244	0.161	34.02
C_8	0.237	0.126	46.88
C_9	0.400	0.258	35.48

2.4 焦斑光强峰谷比

焦斑光强峰谷比系数能够反映光强的波动程度,如果波动越大则值越大,波动越小值越小,其表达式^[17]:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \tag{2}$$

式中, $I_{\max}$ 为输出光强的最大值, $I_{\min}$ 为输出光强的最小值, V 为输出光强峰谷值比系数,值越小则光强均匀性越好。将实验所得的谱线强度带入式(2),计算绘制如表 3 所示。光束整形后样品光谱强度的焦斑光强峰谷比系数明显下降,且平均降低率达到 41.27%。由此说明平凸柱面镜整形后光强能量均匀性提高,可以有效改善后期金属微量元素的检测灵敏性。

表 3 激光整形前后焦斑光强峰谷比系数

Table 3 Peak to valley ratio coefficient of focal spot intensity before and after laser shaping

Sample number	Before shaping	After shaping	Decrease rate/%
C ₀	0.614	0.507	17.42
C ₁	0.576	0.223	61.39
C ₂	0.989	0.370	62.58
C ₃	0.650	0.339	47.83
C ₄	0.904	0.496	45.17
C ₅	0.615	0.261	57.51
C ₆	0.329	0.146	55.52
C ₇	0.455	0.406	10.82
C ₈	0.487	0.307	37.07
C ₉	0.614	0.507	17.42

2.5 能量均匀度

对于光束整形系统,输出的光束在空间中的照度分布需要进行均匀性评价。引入能量均匀度的概念,它是一种标准的均匀性评价方法^[18]。计算公式^[19]如下:

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - \bar{E}|}{n \times \bar{E}} \tag{3}$$

式中, n 是检测点个数, E_i 是 ($i \geq 2$) 检测点数值, $\bar{E}$ 是所有检测点的平均值。能量均匀度反映了截面内的整体光强偏离平均光强的程度,其值越大,表明能量分布越均匀。将实验所得的谱线强度带入式(3),计算绘制如表 4 所示能量均匀度变化表。使用平凸柱面镜后,光学系统成像的能量均匀度呈上

涨的趋势,且平均上升率达到了 17.23%。能量均匀度数值越大,平面内整体光强接近平均光强的程度越高,由此可知,平凸柱面镜对激光光束整形的有效性。

表 4 激光整形前后能量均匀度

Table 4 Energy uniformity before and after laser shaping

Sample number	Before shaping	After shaping	Increase rate/%
C ₀	0.675	0.825	22.21
C ₁	0.665	0.920	38.51
C ₂	0.878	0.888	1.14
C ₃	0.677	0.896	32.28
C ₄	0.799	0.866	8.33
C ₅	0.725	0.902	24.53
C ₆	0.913	0.940	2.98
C ₇	0.802	0.892	11.26
C ₈	0.839	0.914	8.88
C ₉	0.675	0.825	22.21

2.6 拟合决定系数

根据 NIST 数据库,选取 Sr I 421.5 nm 为特征谱线(图 9),对待检测土壤样品进行每组 40 次重复实验测量分析。随着土壤样品中 Sr 浓度含量的逐渐增多,激光击穿诱导迸发出的等离子体也在增加,对应的光谱强度也逐渐增强。由图 10 可知高斯光束下 Sr 的光谱强度平均值曲线拟合决定系数为 0.860,线性光束下 Sr 的光谱强度平均值曲线拟合决定系数为 0.914。结果表明,通过使用平凸柱面镜进行激光光束整形后,光谱强度曲线的回归拟合度更好即高斯光束得到了有效的改善。

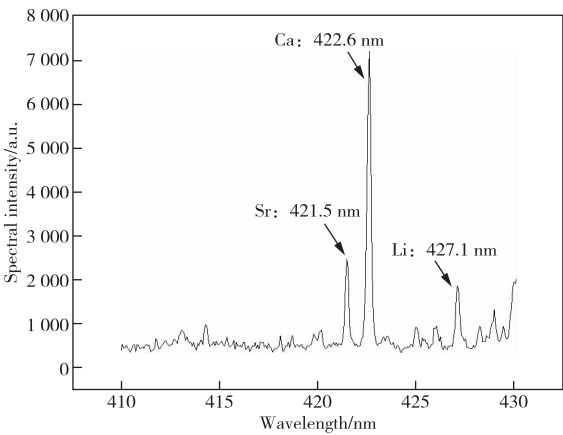


图 9 锶元素的特征谱线

Figure 9 Characteristic spectral lines of strontium element.

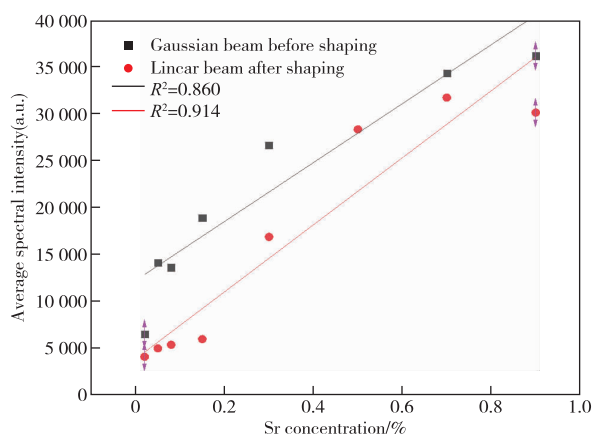


图 10 整形前后样品光谱强度平均值

Figure 10 Average spectral intensity of samples before and after shaping.

3 结论

本文以激光诱导击穿光谱技术为理论基础,通过光学仿真模拟光束成像,确定了平凸柱面镜的最佳实验焦距,然后基于最佳的平凸柱面镜进行高斯光束整形实验系统的搭建,并以土壤中的锶元素为例检测实验系统对光束整形的有效性。通过比较使用平凸柱面镜和聚焦透镜后光斑能量变化、焦斑光强均方差系数、焦斑光强峰谷比系数、能量均匀度以及锶元素整形前后的拟合决定系数,得出了平凸柱面镜可以有效改善激光中心强边缘弱的不均匀分布,使其转换成相对均匀能量分布的结论,证明了平凸柱面镜整形的有效性。

参考文献

- [1] 侯亚茹,陆继龙,范玉超,等. 原子吸收光谱法测定岩石中铜、铅和锌的不确定度评定及方法改进[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7): 2101-2106.
HOU Yaru, LU Jilong, FAN Yuchao, et al. Uncertainty evaluation and method improvement of determination of copper, lead and zinc in rocks by atomic absorption spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(7): 2101-2106.
- [2] 陈波,马玲,王金云,等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定复垦土壤中有效铜、锌、铁、锰、硫的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(2): 166-172.
CHEN Bo, MA Ling, WANG Jinyun, et al. Simultaneous determination of bioavailable forms of copper, zinc, iron, manganese and sulfur in reclaimed soil by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2022, 58(2): 166-172.
- [3] 马菲,周健民,杜昌文. 激光诱导击穿原子光谱在土壤分析中的应用[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 643-654.
MA Fei, ZHOU Jianmin, DU Changwen. Application of laser-induced breakdown atomic spectroscopy in soil analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 643-654.
- [4] YANG D Q, YAN C W, ZHANG J, et al. Chloride threshold value and initial corrosion time of steel bars in concrete exposed to saline soil environments[J]. Construction and Building Materials, 2020, 267(3): 120979. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120979
- [5] 李红莲,谢红杰,吕贺帅,等. 基于激光诱导击穿光谱技术的金属基体辅助测量研究[J]. 光电子激光, 2021, 32(2): 166-172.
LI Honglian, XIE Hongjie, LYU Heshuai, et al. Research on metal matrix-assisted measurement based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2021, 32(2): 166-172.
- [6] 张鹏鹏,徐进力,胡梦颖,等. 激光诱导击穿光谱分析土壤样品中的锆、铪和铌元素含量实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7): 2163-2168.
ZHANG Pengpeng, XU Jinli, HU Mengying, et al. Determinations of Zr, Hf and Nb contents in soil samples by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(7): 2163-2168.
- [7] BERLO K, XIA W, ZWILLICH F, et al. Laser induced breakdown spectroscopy for the rapid detection of SARS-CoV-2 immune response in plasma[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1614-1624.
- [8] YUN Z, MAHAMED L G, XING X, et al. Deep learning associated with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for the prediction of lead in soil[J]. Applied Spectroscopy, 2019, 73(5): 565-573.
- [9] 姜嘉琪, CARMELO R G, 朱智涵. 完美平顶涡旋光束[J]. 量子电子学报, 2022, 39(1): 136-141.
JIANG Jiaqi, CARMELO R G, ZHU Zhihan. Perfect flat-top vortex beams[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(1): 136-141.
- [10] PANG H, LIU W J, CAO A X, et al. Speckle-reduced holographic beam shaping with modified Gerchberg-Saxton algorithm[J]. Optics Communications, 2018, 433: 44-51. DOI:10.1016/j.optcom.2018.09.076.
- [11] LIU Y, TAO S H. Vectorial diffraction based beam shaping[J]. Applied Physics B, 2023, 129(9): 144. DOI:10.1007/S00340-023-08086-9.
- [12] 姜其畅,张存,苏艳丽,等. 平顶光束在不同系统中的传

- 输特性比较[J]. 量子电子学报, 2022, 39(3): 334-342.
- JIANG Qichang, ZHANG Cun, SU Yanli, et al. Comparison of propagation properties of flat-top beams in different systems[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(3): 334-342.
- [13] 张浩, 樊红英, 赵琦, 等. 基于非球面镜组的大口径激光匀化技术研究[J]. 激光技术, 2023, 47(3): 340-344.
- ZHANG Hao, FAN Hongying, ZHAO Qi, et al. Large aperture laser shaping research based on aspheric homogenizer[J]. Laser Technology, 2023, 47(3): 340-344.
- [14] 翟中生, 张艺, 吕清花, 等. 基于组合光栅的光束整形方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1-9.
- ZHAI Zhongsheng, ZHANG Yi, LYU Qinghua, et al. Beam shaping method based on combined gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1-9.
- [15] 刘文静, 庞辉, 曹阿秀, 等. 低散斑环形光束整形器件的设计及实验[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 99-107.
- LIU Wenjing, PANG Hui, CAO Axiu, et al. Design and experiments of annular beam shaping device with low speckle noise[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 99-107.
- [16] 李红莲, 王红宝, 康沙沙, 等. 基于背景扣除法消除土壤基底中 Al 元素干扰的 LIBS 实验研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(1): 257-262.
- LI Honglian, WANG Hongbao, KANG Shasha, et al. LIBS experimental study of eliminating the interference of Al element in soil base based on background subtraction method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(1): 257-262.
- [17] 李珂, 石鹏, 张晓波, 等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1972-1977.
- LI Ke, SHI Peng, ZHANG Xiaobo, et al. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 1972-1977.
- [18] 霍虹宇, 苟于单, 杨擎东, 等. 激光无线能量传输接收端光束匀化装置设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 253-261.
- HUO Hongyu, GOU Yudan, YANG Qingdong, et al. Design of beam homogenizing device at receiving end for laser wireless power transmission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12): 253-261.
- [19] 黄珊, 邓磊敏, 杨焕, 等. 基于 ZEMAX 的半导体激光器匀光设计[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 522-526.
- HUANG Shan, DENG Leimin, YANG Huan, et al. Homogenization design of laser diode based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2014, 38(4): 522-526.