

用于激光除草的高功率蓝光半导体模块研制

张以飞¹, 赵梓涵², 王宪涛^{1,3*}

¹长春理工大学物理学院, 吉林 长春

²长春理工大学安全保卫部, 吉林 长春

³长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年8月31日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月14日

摘要

针对激光除草对高功率蓝光激光光源的应用需求, 本文设计并研制了一种波长为450 nm的高功率光纤耦合半导体激光模块。基于单管激光器, 采用阶梯式空间合束和偏振合束方法实现多路蓝光半导体激光的功率叠加, 利用Zemax软件进行光路设计与光纤耦合仿真, 结合SolidWorks实现机械结构设计及样机搭建。仿真结果表明, 合束光束经聚焦后功率约为120 W, 耦合进入芯径100 μm 、NA为0.22的光纤后的输出功率为115 W, 理论耦合效率约为95.8%; 样机实测输出功率达到100.2 W。在此基础上搭建蓝光激光除草实验平台, 对麦瓶草和稗草幼苗开展50.9~509.3 J/cm²不同激光剂量的辐照试验。结果表明, 两种杂草生长点及茎秆的热损伤程度和处理7天后的死亡数量均随激光剂量增加而提高。在本试验剂量梯度下, 麦瓶草在254.7 J/cm²时死亡率达到100%, 稗草在305.6 J/cm²时死亡率达到100%, 继续提高剂量后死亡率均维持在100%。研究结果验证了所研制百瓦级450 nm光纤耦合蓝光激光用于激光除草的可行性, 为高功率蓝光激光器在精准激光除草中的应用及剂量优化提供参考。

关键词

蓝光激光, 空间合束, 光纤耦合, 激光除草

Development of High-Power Blue Light Semiconductor Module for Laser Weed Control

Yifei Zhang¹, Zihan Zhao², Xiantao Wang^{1,3*}

¹School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Security Office, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

³School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

*通讯作者。

文章引用: 张以飞, 赵梓涵, 王宪涛. 用于激光除草的高功率蓝光半导体模块研制[J]. 应用物理, 2026, 16(10): 838-850.
DOI: 10.12677/app.2026.1610077

Received: August 31, 2026; accepted: October 5, 2026; published: October 14, 2026

Abstract

Addressing the application needs of high-power blue laser sources for laser weed control, this paper designs and develops a high-power fiber-coupled semiconductor laser module with a wavelength of 450 nm. Based on a single-tube laser, the power superposition of multiple blue semiconductor lasers is achieved through stepwise spatial beam combining and polarization beam combining methods. Optical path design and fiber coupling simulation are carried out using Zemax software, and mechanical structure design and prototype construction are implemented using SolidWorks. Simulation results show that the power of the combined beam is approximately 120 W after focusing, and the output power after coupling into a fiber with a core diameter of 100 μm and a numerical aperture (NA) of 0.22 is 115 W, with a theoretical coupling efficiency of approximately 95.8%. The measured output power of the prototype reaches 100.2 W. Based on this, a blue laser weed control experimental platform is established, and irradiation experiments are conducted on seedlings of weeds such as *Silene conoidea* L. and barnyard grass at different laser doses ranging from 50.9 to 509.3 J/cm². The results indicate that the thermal damage degree to the growth points and stems of the two weeds, as well as the number of dead plants after 7 days of treatment, increases with the increase of laser dose. At the dose gradient tested in this experiment, the mortality rate of *Silene conoidea* L. reaches 100% at 254.7 J/cm², and that of barnyard grass reaches 100% at 305.6 J/cm². Further increasing the dose maintains the mortality rate at 100% for both weeds. The research results verify the feasibility of using the developed hundred-watt-level 450 nm fiber-coupled blue laser for laser weed control, providing a reference for the application and dose optimization of high-power blue lasers in precision laser weed control.

Keywords

Blue Laser, Spatial Beam Combining, Fiber Coupling, Laser Weeding

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

杂草的有效防控是保障大规模农业生产稳定发展的关键环节之一，其数量变化与人为除草干预密切相关。在农作物早期生长阶段，杂草通过与农作物竞争土壤中的水分、养分等资源，持续积累自身生物量，从而抑制农作物幼苗的正常发育生长。随着生长周期的推进，杂草进一步与作物争夺生长空间和光照资源，最终导致作物产量下降和品质降低[1]。根据相关数学模型预测，在部分农田作物种植体系中，杂草危害可能造成接近 10% 的产量损失[2]；而在全球主要粮食作物种植区域内，严重的杂草危害可能导致高达 50% 的产量损失[3]。针对我国农业生产情况，根据主要作物田草害相关数据统计，我国农田草害发生面积已经超过 0.8 亿公顷，每年因杂草危害造成的粮食损失接近百亿公斤[4]。化学除草是农田杂草防控的主要方式，但长期或者不合理使用化学除草剂可能会引起杂草抗药性增强、农产品农药残留以及土壤和水体污染等问题。因此，研究高效、精准和环境友好的非化学除草技术具有重要意义。

激光除草是一种利用激光热效应对杂草关键组织进行选择性的物理除草技术，具有非接触、作用区域可控、定位精度高和无化学药剂残留等优点，可减少化学除草剂的使用，为农田杂草绿色防控提

供新的技术途径[5][6]。已有研究表明,激光波长、输出功率、照射时间、光斑尺寸、作用位置以及杂草种类和生育阶段等因素均会影响除草效果。Mathiassen 等[7]采用不同功率和辐照时间的激光处理三种杂草的分生组织,发现激光辐照能够显著抑制杂草生长,部分处理可导致植株死亡。Wöltjen 等[8]分别采用 940 nm 半导体激光器和 10600 nm CO₂ 激光器对不同生长阶段的杂草进行辐照,结果表明不同波长激光达到相近除草效果所需的能量密度存在差异,且杂草种类和生育阶段会显著影响其激光响应。Marx 等[9]利用 10600 nm CO₂ 激光对反枝苋进行辐照,指出致命损伤所需能量主要取决于分生组织的能量耦合效率及激光作用精度。Lan 等[10]采用 455 nm 二极管激光辐照薇甘菊茎部,发现组织损伤程度与激光功率密度密切相关。Hu 等[11]对比 980 nm 近红外激光和 450 nm 蓝光激光的除草效果,结果表明杂草对蓝光激光具有更高的吸收效率,在相同功率条件下达到相近除草效果所需的辐照时间更短。

蓝光半导体激光器的输出波长与杂草叶片中叶绿素等光合色素的吸收波段具有较高匹配度,有利于激光能量被植物组织吸收并转化为热能,从而提高组织升温 and 损伤效率。同时,蓝光半导体激光器具有体积小、结构紧凑、电光转换效率高、易于调制和集成等特点[12]-[14],便于与机器视觉、智能识别及农业移动平台相结合。依托激光束良好的方向性和可控性,可实现对杂草目标的精准作用并降低对周围作物的影响。面向智能农业装备的大功率蓝光半导体激光器具有良好的激光除草应用潜力。面向激光除草应用需求,本文设计并研制了一种百瓦级 450 nm 光纤耦合蓝光半导体激光模块,采用空间合束和偏振合束的方式对 24 只激光单管功率进行叠加,使用 Zemax 软件完成光路及光纤耦合设计,根据光路设计完成模块研制。搭建激光除草平台,开展麦瓶草和稗草不同激光剂量下的辐照试验,验证模块除草的效果。

2. 整体设计

2.1. 光路设计

由于半导体激光器存在的普遍性特点,即快慢轴方向发散角严重不对称。所以在进行空间合束前,要对蓝光半导体激光器单管分别进行快慢轴准直,在每个激光单管后都使用了快轴准直镜和慢轴准直镜来对激光单管准直,准直采用的 FISBA 焦距为 1.65 mm 的快轴准直镜(FAC)进行快轴准直,慢轴准直使用的是焦距为 5.6 mm 的慢轴准直镜(SAC)进行准直。然后再通过反射镜使得输出光束形成一组空间叠加的光束,进行光束聚焦,使光束通过聚焦透镜后耦合进入光纤。

模块使用的是欧司朗 5W 450 nm 单管蓝光半导体激光器,工作电流 3 A 时,输出功率 5 W,工作电压 4.3 V,此时快轴方向发散角为 49°,慢轴方向发散角为 9°。利用 Zemax 仿真软件对蓝光单管半导体激光器进行准直仿真,仿真结果如图 1 所示。准直后的快轴方向光斑半宽为 0.44 mm 左右,慢轴方向光斑半宽为 0.27 mm 左右,准直后快轴方向发散角为 0.0324°左右,慢轴方向发散角为 0.0325°左右。

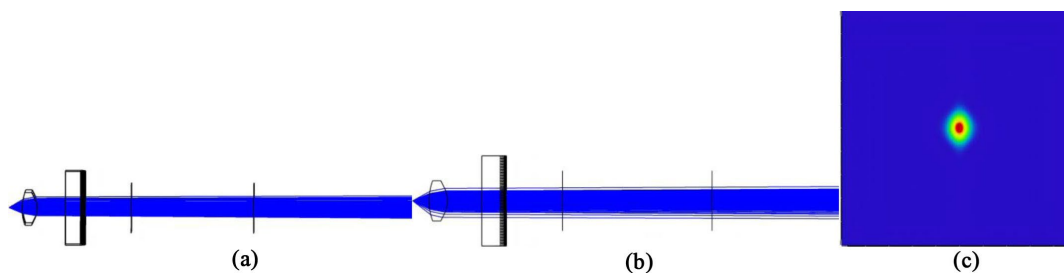


Figure 1. Simulation diagram of blue light single-tube collimation: (a) Schematic diagram of fast axis direction collimation; (b) Schematic diagram of collimation in the slow axis direction; (c) Light spot pattern after fast and slow axis collimation

图 1. 蓝光单管准直仿真图: (a) 为快轴方向准直示意图; (b) 为慢轴方向准直示意图; (c) 为快慢轴准直后的光斑图

蓝光单管半导体激光器经过快慢轴准直后采取反射镜阶梯式排列的方式进行空间合束，空间合束后在利用偏振元件进行偏振合束叠加功率，得到大功率蓝光激光输出。用 Zemax 软件非序列模式进行合束仿真，仿真结果如图 2 所示，24 只单管合束得到的激光光束通过聚焦透镜耦合进芯径 100 μm ，数值孔径 0.22 的光纤进行激光输出，合束后光斑如图 3(a)所示，图 3(b)为光纤输出光斑。经过聚焦透镜输出的激光功率为 120 W，耦合进光纤的激光输出为 115 W，耦合效率约为 95.8%。

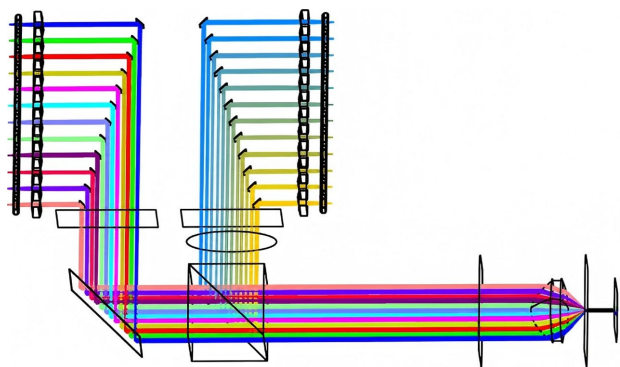


Figure 2. Simulation diagram of laser beam combining
图 2. 激光合束仿真图

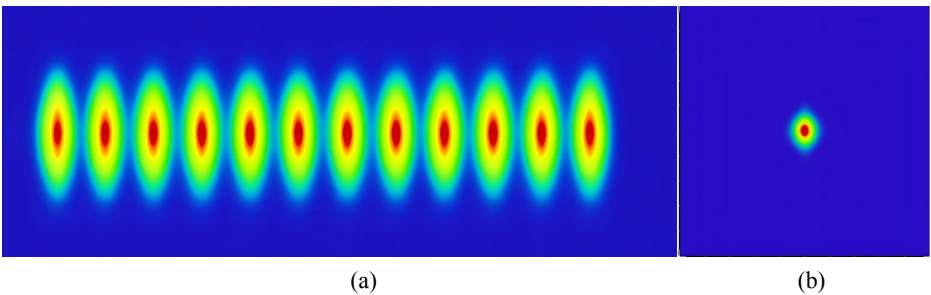


Figure 3. Output spot after beam combining simulation: (a) Polarization beam combining simulated spot; (b) Fiber-coupled simulated light spot
图 3. 合束仿真后输出光斑: (a) 偏振合束仿真光斑; (b) 光纤耦合仿真光斑

2.2. 机械结构设计

根据上述的光路设计，使用 SolidWorks 软件进行机械结构设计，模块的机械结构图如图 4 所示。

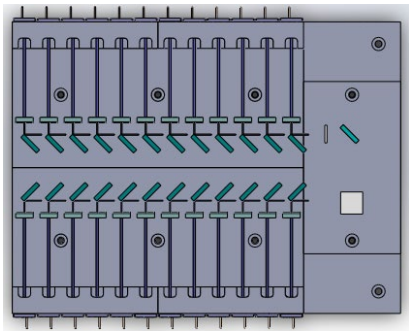


Figure 4. Schematic diagram of the mechanical structure of the blue light module
图 4. 蓝光模块机械结构示意图

根据光路设计与机械结构设计的结果，使用复坦希六维调整架对蓝光模块进行安装调试。安装调试好后实物如图 5 所示，实际测试输出功率为 100.2 W，见图 6(b)。

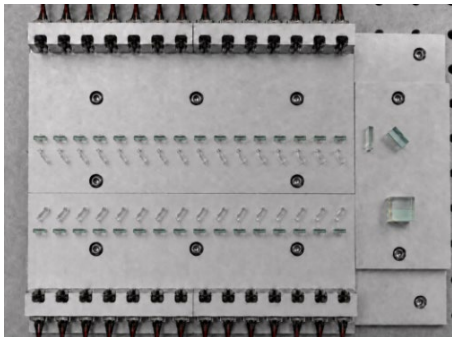


Figure 5. Physical image of the Blu-ray module
图 5. 蓝光模块实物图

3. 实验与方法

激光除草主要依靠激光辐照产生的生物热效应对杂草茎秆组织造成损伤，从而阻断植株正常生长或抑制其后续再生。当高能量激光作用于植物表面时，植物组织会在较短时间内吸收激光能量，并将其转化为热能，使受照区域温度迅速升高。随着热量不断积累，局部组织的结构和功能逐渐受到破坏，严重时表面会出现灼伤甚至碳化现象。当激光束集中照射杂草茎秆时，产生的高温可直接破坏茎秆内部组织；在激光能量较高的情况下，可进一步导致茎秆被切断。即使激光能量不足以使茎秆完全断裂，受损组织也会影响植株内部水分和养分的正常运输，使其生理活动受到抑制，进而阻碍植株后续生长，最终达到除草目的。为了验证研制模块的激光除草效果，搭建实验平台进行除草实验。

3.1. 实验平台搭建

为检验蓝光模块除草的可能性，搭建了如图 6 所示的实验平台并开展了相应实验。



Figure 6. Blue light weeding experiment platform: (a) Weeding experiment platform;
(b) Fiber output power of the blue light module
图 6. 蓝光除草实验平台: (a) 除草实验平台; (b) 蓝光模块光纤输出功率

图 6(a)为实验平台，平台由蓝光激光模块、激光光纤输出头、冷却水箱组成。蓝光激光系统提供稳定的激光输出，蓝光系统通过冷却水箱进行循环散热，带走激光器工作时产生的热量，保证蓝光模块正常

工作。右图为光纤输出的激光功率大小。

对激光模块进行十分钟功率测试，激光模块输出功率随时间的变化情况如图 7 所示。

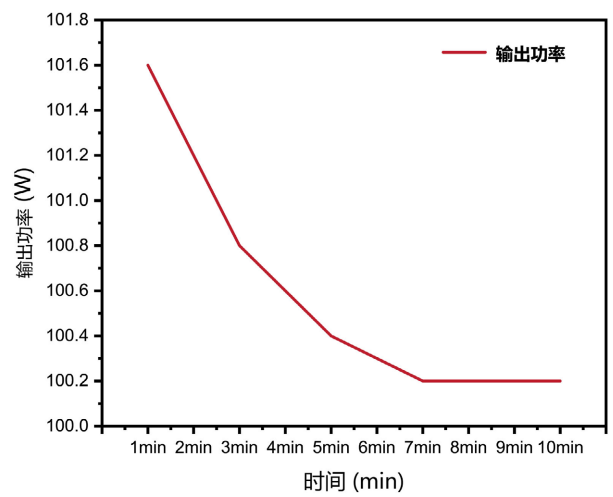


Figure 7. Curve of blue light module output power varying with time
图 7. 蓝光模块输出功率随时间变化曲线

当工作电流为 3 A 时，测得蓝光模块输出功率为 100.2 W；此时对应的工作电压为 103 V，蓝光模块电光转换效率计算如下：

$$\eta = \frac{P}{UI} \times 100\% = \frac{100.2}{103 \times 3} \times 100\% \approx 32.4\% \quad (1)$$

3.2. 实验材料与实验剂量

农田杂草的种类很多，本实验选取两种农田比较常见的杂草在室内人工种植以供除草试验。供试杂草分别为稗草和麦瓶草。这两种杂草不仅在东北地区的玉米田中较为常见，也在中国各地广泛分布，对小麦、油菜、水稻等多种作物的种植亦有影响。

通过支架将激光模块光纤输出头固定在距离地面高度为 20 cm 时，测量激光输出到植株叶片上的受照区域大小，通过调节激光模块照射时间，对叶片进行多次照射，然后用游标卡尺测量照射区域直径，如图 8 所示，多次测量取平均值得到激光束照射在地表的光斑是一个尺寸为 5.0 mm 的圆形。



Figure 8. Measurement of output light spot of blue light module
图 8. 蓝光模块输出光斑测量

测量发现,玉米农田中常见杂草在普通苗期的茎秆直径在 1 mm 到 3 mm 之间,激光束的作业面积能够完全覆盖杂草茎秆,因此在激光除草试验中,可以不考虑激光束的移动问题,只需要调节光束对准杂草茎秆并固定激光器,通过控制激光照射时间和激光器的输出功率来控制激光的剂量。

在实际除草作业时,激光除草的效果取决于激光器输出功率以及照射时间,照射在地面作业区域的光斑可以视为一个点,这个点的激光强度取决于激光器的功率和激光照射时间,这个点的激光强度也称为激光剂量 D (J/cm^2),用式(2)表示。

$$D = \frac{Pt}{A} \tag{2}$$

其中 P 表示激光器功率,单位: W ; t 表示激光器工作时间;单位: s ; A 表示激光光斑面积,单位: cm^2 。

本文实验设计了 9 组逐渐增大的激光剂量,对应不同的激光能量,具体剂量组合方式见表 1。

Table 1. Laser dosage table
表 1. 激光剂量表

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
激光功率	100	100	100	100	100	100	100	100	100
工作时间	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1
激光剂量	50.9	101.9	152.8	203.7	254.7	305.6	356.5	407.4	509.3

3.3. 实验方法

首先在室内人工培育两种杂草,准备培育盒若干,待杂草发芽后,挑选 4~6 叶期的杂草植株移栽到培育盒里并放在室内生长,杂草稳定生长三天后,即可进行激光除草试验。

控制激光束自上而下照射杂草的茎秆表面,破坏植物茎秆的结构和功能,模拟除草作业。首先,使用固定架将激光照射点固定在距离地面 20 cm 的位置,调整实验杂草的位置,使激光束可以自上而下准确地照射在杂草茎秆上并确保光斑可以覆盖杂草茎秆。按照表 1,进行不同激光剂量实验,在激光照射试验后,保持杂草原有的生长环境不变,继续在室内培育。观察激光照射后 7 天杂草的存活情况。

3.4. 激光除草实验

人工培育麦瓶草幼苗和稗草幼苗若干,按照表 1 中的激光剂量对麦瓶草进行实验,每个剂量的实验植株是 6 株,其中一株为空白对照组,另外 5 株则正常进行激光实验。1~5 号激光剂量实验结果如图 9, 6~9 号激光剂量实验结果见图 10。



(a) 1~5 号激光剂量照射前麦瓶草形态



(b) 1~5 号激光剂量照射后麦瓶草形态

Figure 9. Morphology of *Silene conoidea* L. before and after laser irradiation with laser doses of 1~5

图 9. 1~5 号激光剂量激光照射前后麦瓶草形态

由图 9 可见，随着激光剂量由 50.9 J/cm^2 逐渐增加至 254.7 J/cm^2 ，麦瓶草热损伤程度逐渐增强。低剂量处理下植株整体形态变化较小，仅在生长点附近出现轻微褐变；随着剂量增加，生长点及叶片组织的褐变、失水和萎蔫现象逐渐明显，在高剂量下，植株中心组织出现明显坏死，叶片发生失绿、卷曲和萎蔫。



(a) 6~9 号剂量激光照射前麦瓶草形态



(b) 6~9 号剂量激光照射后麦瓶草形态

Figure 10. Morphology of *Silene conoidea* L. before and after laser irradiation at doses of 6~9

图 10. 6~9 号剂量激光照射前后麦瓶草形态

在 $305.6 \sim 509.3 \text{ J/cm}^2$ 的高剂量范围内，麦瓶草均表现出比较明显的热损伤。随着剂量不断增加，生长点及茎部坏死范围也随之扩大，叶片失水、卷曲和萎蔫现象更加明显。高剂量处理下植株关键生长组织受到严重破坏，整体生长状态受到抑制。

不同剂量激光照射 7 天后麦瓶草幼苗的死亡情况如图 11 所示。

由图 11 可知，麦瓶草处理 7 天后的死亡数量随激光剂量增加呈明显上升趋势。当激光剂量 50.9 J/cm^2 时，未出现死亡植株；剂量增加至 101.9 J/cm^2 和 152.8 J/cm^2 时，死亡数量分别为 1 株和 2 株。当剂量提

高至 203.7 J/cm² 时，死亡数量增加至 4 株，死亡率达到 80%。表明随着激光剂量增加，对麦瓶草造成的致死损伤显著增强。当激光剂量达到 254.7 J/cm² 时，5 株麦瓶草全部死亡，死亡率达到 100%。随着剂量逐渐增加至 509.3 J/cm²，死亡数量始终保持为 5 株，激光致死效应逐渐趋于饱和。在本试验设置的剂量范围内，509.16 J/cm² 为实现麦瓶草处理 7 天后完全死亡的最低试验剂量。

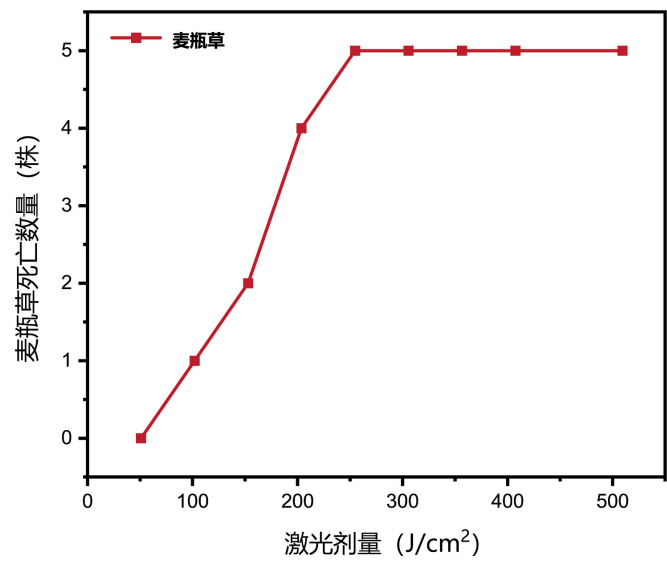


Figure 11. Death situation of wheatgrass seedlings after 7 days of laser irradiation at different doses
图 11. 不同剂量激光照射麦瓶草幼苗 7 天后的死亡情况

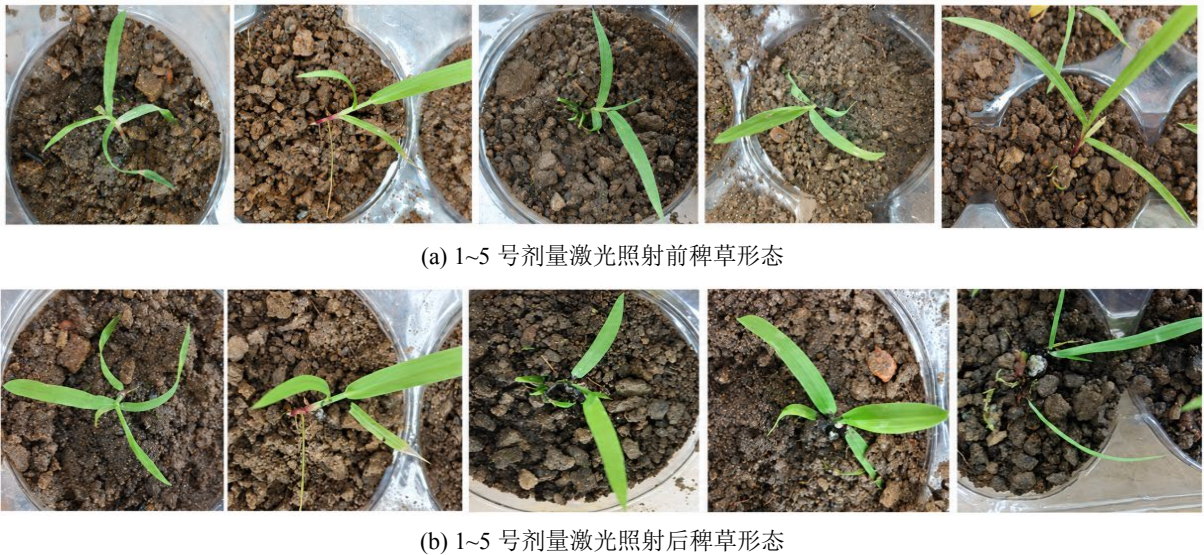


Figure 12. Experimental diagram of barnyardgrass under laser irradiation at doses of 1~5
图 12. 1~5 激光剂量照射稗草实验图

由图 12 可见，50.9~254.7 J/cm² 激光处理后，稗草损伤程度随剂量增加而增强。低剂量下植株整体形态变化较小；随着剂量加大，生长点和茎秆部逐渐出现发黑、焦化和坏死，部分叶片发生萎蔫。结果表明，激光热损伤主要集中于稗草生长点及茎基部等关键组织。

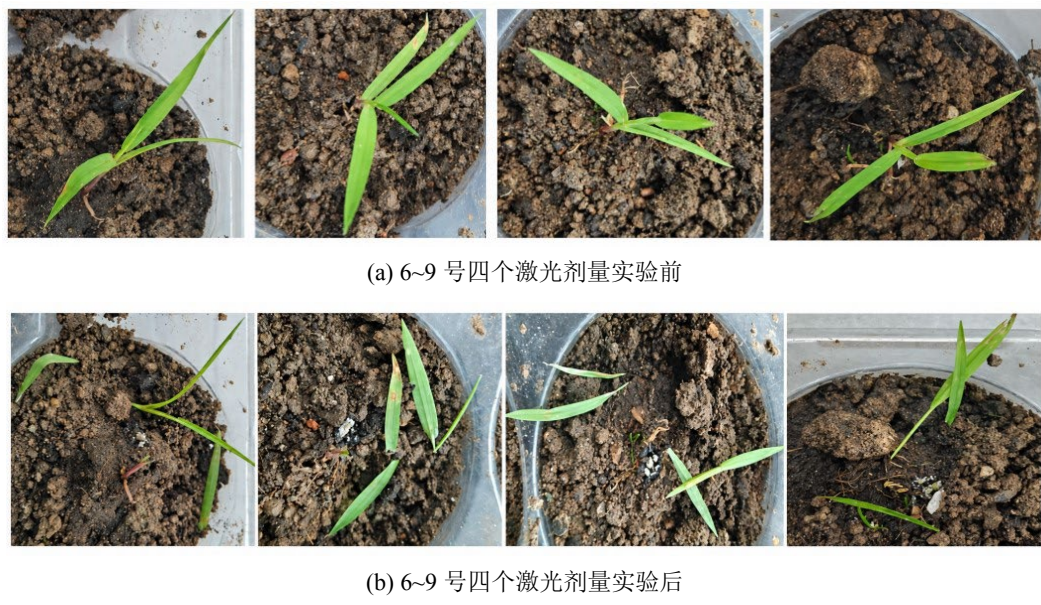


Figure 13. Irradiation experiment on barnyardgrass with four laser doses at No. 6~9
图 13. 6~9 号四个激光剂量对稗草的照射实验

如图 13 所示，当激光剂量提高至 $305.6\sim509.3\text{ J/cm}^2$ 时，稗草生长点和茎基部均出现明显灼伤和坏死，叶片失水萎蔫程度加重。说明该剂量范围已经能够对稗草关键生长组织产生较强破坏作用。不同剂量激光照射 7 天后稗草幼苗的死亡情况如图 14 所示：

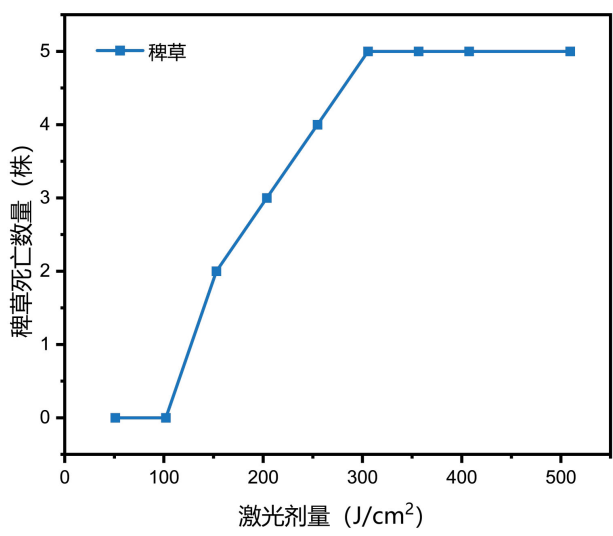


Figure 14. Death status of barnyardgrass after 7 days of laser irradiation at different dosages
图 14. 不同剂量激光照射 7 天后稗草的死亡情况

随着激光剂量增加，稗草处理 7 天后的死亡数量总体也随之增加。当激光剂量低于 100 J/cm^2 时，植株均未死亡；激光剂量处于 $100\sim300\text{ J/cm}^2$ 时，植株死亡数量快速增加。当剂量提高至 305.6 J/cm^2 时，5 株稗草全部死亡，死亡率达到 100%，此后，随着激光剂量继续增加至 509.3 J/cm^2 ，死亡数量始终维持在 5 株，说明达到一定剂量后，激光处理的致死效果趋于饱和。在本试验设置的剂量范围， 305.6 J/cm^2 为实

现稗草 7 天后完全死亡的最低试验剂量。

4. 结果与讨论

4.1. 激光除草能量需求与草种响应差异

本研究在 100 W 功率下, 麦瓶草和稗草分别经 0.5 s 和 0.4 s 照射后达到处理 7 天全部试验植株死亡, 对应输出光能为 50 J 和 60 J。Hu 等[11]采用 100 W 蓝光和近红外激光处理马齿苋, 实现三次试验均成功的最低已测试照射时间分别为 0.25 s 和 0.4 s, 对应 25 J 和 40 J, 蓝光所需输出光能降低约 37.5%, 显示出一定的节能潜力。但该研究以叶片脱落或茎秆烧损判定成功, 与本研究的死亡率指标不同, 因此该比例不能直接代表本装置的节能幅度。Wöltjen 等[8]对 940 nm 和 10,600 nm 激光的研究也表明, 除草效果受草种和生育期影响, 跨波长比较需充分考虑试验条件及评价指标的差异。本试验麦瓶草的最低完全致死处理能量较稗草低 16.67%, 可能与茎秆粗细、组织厚度及生长点遮挡程度影响关键组织的能量耦合有关[9]。色素组成和含量也可能改变蓝光吸收; Lan [10]发现薇甘菊茎部维管束和髓组织的吸收光谱存在差异, 提示应关注实际受照组织的光学特性。此外, 含水量可通过热容量、蒸发耗热及热传递影响损伤形成, 其与致死能量的关系不宜简单视为单向变化。由于每个剂量仅处理 5 株植株, 且两种杂草的最低完全致死处理水平仅相差一个剂量梯度, 上述差异尚不足以证明草种敏感性存在统计学显著差异。本文未测定色素含量、含水量及组织温度, 因此相关机制仍需验证。

4.2. 实验结果分析

本文采用快慢轴准直、阶梯式空间合束及偏振合束的方法对多路 450 nm 蓝光半导体激光进行光束整形与功率合成。Zemax 仿真结果表明, 合束后的激光经聚焦后输出功率约为 120 W, 耦合进入芯径 100 μm 、数值孔径 0.22 光纤后的输出功率约为 115 W, 理论耦合效率达到 95.8%。在完成光路设计和机械结构设计后搭建了蓝光激光模块样机, 实际测试光纤输出功率达到 100.2 W。实测功率低于仿真结果, 可能与实际系统中准直镜、反射镜及偏振合束元件存在透射和反射损耗, 以及激光单管输出功率差异、光学元件安装角度误差和聚焦位置偏差等因素有关。Zemax 仿真条件相对理想, 而实际样机中多路光束经过准直、反射、合束和聚焦后, 各环节产生的光学损耗及装调误差会逐渐累积, 造成实际输出功率与理论仿真值之间存在一定差异。样机能够实现百瓦级 450 nm 蓝光激光输出, 可满足后续激光除草试验对高功率蓝光光源的需求。

不同激光剂量处理后, 麦瓶草和稗草均表现出较为明显的剂量响应关系。随着激光剂量由 50.9 J/cm² 逐渐增加至 509.3 J/cm², 两种杂草生长点及茎基部的损伤程度逐渐加重, 其组织损伤由低剂量下的局部灼伤和轻微褐变, 逐渐发展为高剂量下的焦化、坏死, 并伴随叶片萎蔫、卷曲及倒伏等现象。从处理 7 天后的死亡情况来看, 麦瓶草在 50.9 J/cm² 时未出现死亡植株, 随着剂量增加, 死亡数量逐渐提高, 在 203.7 J/cm² 时死亡率达到 80%, 当剂量增加至 254.7 J/cm² 时 5 株处理植株全部死亡, 继续增加激光剂量, 死亡率均维持在 100%。因此, 在本试验的剂量梯度范围内, 254.7 J/cm² 为实现麦瓶草处理 7 天后 100% 死亡的最低试验剂量。稗草表现出类似的剂量响应规律, 在低于 100 J/cm² 时无植株死亡, 100~300 J/cm² 剂量植株死亡数量快速增加, 当剂量增加至 305.6 J/cm² 时 5 株处理植株全部死亡, 继续提高剂量后死亡率保持为 100%, 说明 100~305.6 J/cm² 可能是本试验条件下稗草死亡响应快速变化的关键剂量区间。

上述结果表明, 450 nm 蓝光激光对杂草的作用效果具有明显的剂量依赖性, 可大致表现为低剂量损伤、死亡率快速增加以及高剂量致死效果趋于饱和三个阶段。低剂量处理主要造成杂草局部组织热损伤, 部分植株仍具有继续生长或恢复的能力; 随着剂量增加, 激光产生的局部热效应进一步破坏生长点和茎基部等关键组织, 使植株正常的水分和养分运输受到影响, 死亡数量随之增加; 当剂量达到能够使全部

试验植株死亡的水平后,继续提高剂量虽然可能进一步加重组织烧蚀程度,但已经不能提高最终死亡率。该变化规律与已有激光除草研究中激光能量输入增加会增强杂草生长抑制和组织损伤的结果总体一致,已有研究同时表明,激光波长、作用位置、杂草种类以及生育阶段等均会影响最终除草效果。

在相同试验条件和剂量梯度下,麦瓶草在 254.7 J/cm^2 时即达到 100% 死亡,而稗草需要提高至 305.6 J/cm^2 才能达到 100% 死亡,说明两种杂草对 450 nm 蓝光激光的剂量响应存在一定差异。这种差异可能与两种杂草的茎秆形态、生长点位置、组织结构以及不同组织对 450 nm 激光的吸收和热传导特性有关。由于本试验每个剂量设置 5 株激光处理植株,现有结果更适合用于判断不同剂量下的总体响应趋势及最低完全致死试验剂量。

5. 展望

本文以蓝光单管激光器为基础,研制了蓝光模块,并对其进行除草试验,验证了该模块除草的可行性。但是由于试验条件有限仍存在不足,主要体现在以下方面:

(1) 本研究的生物学试验仍存在一定局限。后续研究将各处理组的生物学重复数增加至 20 株或更多,配置数量充足且覆盖完整观察周期的同期空白对照,尚不能充分反映致死损伤、长期恢复及再生。后续将各处理组生物学重复增加至 15~20 株或更多,并设置数量充分、贯穿整个观察期的同期空白对照,并通过随机分组和独立批次重复提高结果的可靠性。在处理 14 天内定期记录株高、存活状态及再生情况。再结合植株鲜重与干重数据,提高除草效果评价的准确性。

(2) 受实验条件限制,本研究尚未对激光模块输出光斑的能量密度空间分布进行定量表征。后续可借助光束分析仪等设备开展测量,明确光斑内能量分布的均匀性,量化平均能量密度与峰值能量密度之间的差异,并进一步评估能量分布不均匀性对实验结果的影响。

(3) 本文对激光模块实测输出功率与仿真结果之间的偏差进行了初步分析。后续研究需对光路各环节功率进行分阶段测量,依次记录蓝光单管出光、单管准直、空间合束、偏振合束、聚焦透镜汇聚后进入光纤前及光纤输出端的光功率。在此基础上,建立各环节功率损耗统计表,量化功率损失及传输效率,进一步识别主要损耗环节并分析其产生机理,为光学系统优化与光纤耦合效率提升提供依据。

参考文献

- [1] Jabran, K. and Chauhan, B.S. (2018) Non-Chemical Weed Control. Academic Press, 123-347.
- [2] Zhang, Z., Li, R.H., Zhao, C. and Qiang, S. (2021) Reduction in Weed Infestation through Integrated Depletion of the Weed Seed Bank in a Rice-Wheat Cropping System. *Agronomy for Sustainable Development*, **41**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00660-1>
- [3] Dille, J.A., Stahlman, P.W., Thompson, C.R., Bean, B.W., Soltani, N. and Sikkema, P.H. (2020) Potential Yield Loss in Grain Sorghum (*Sorghum bicolor*) with Weed Interference in the United States. *Weed Technology*, **34**, 624-629. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.12>
- [4] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2010 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [5] 秦伟博, 于合龙, 毕春光, 等. 激光技术在植物保护中的应用与研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2025, 47(4): 618-625.
- [6] 余忠义, 王洪宇, 何雄奎, 等. 激光除草机器人关键技术与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(2): 132-145.
- [7] Mathiassen, S.K., Bak, T., Christensen, S. and Kudsk, P. (2006) The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. *Biosystems Engineering*, **95**, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010>
- [8] Wölftjen, C., Haferkamp, H., Rath, T. and Herzog, D. (2008) Plant Growth Depression by Selective Irradiation of the Meristem with CO₂ and Diode Lasers. *Biosystems Engineering*, **101**, 316-324. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.006>
- [9] Marx, C., Pastrana Pérez, J.C., Hustedt, M., et al. (2012) Investigations on the Absorption and the Application of Laser Radiation for Weed Control. *Landtechnik*, **67**, 95-101.

- [10] Lan, Y.P. (2022) Laser-Optics-Based Method to Suppress Mikania Micrantha Growth. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 19864. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24451-8>
- [11] Hu, R., Niu, L. and Su, W. (2024) A Novel Mechanical-Laser Collaborative Intra-Row Weeding Prototype: Structural Design and Optimization, Weeding Knife Simulation and Laser Weeding Experiment. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1469098. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1469098>
- [12] 李明月, 何君. 国外军用大功率半导体激光器的发展现状[J]. 半导体技术, 2015, 40(5): 321-327.
- [13] 谭昊, 吴华玲, 蒋全伟, 等. 高亮度蓝光半导体激光光纤耦合实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 47-50.
- [14] 张洋, 徐鹏. GaN 基激光器的研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(1): 54-60.