

应用于激光农业的高性能 730 nm 锥形半导体激光器的研究

刘 倩^{1,2,3}, 贾 鹏^{2*}, 秦 莉², 刁书涵^{2,4}, 陈浩飞^{2,4}, 刘柏亨^{2,4},
王 双^{2,4}, 栗 博¹, 李再金⁵, 曲 轶⁵, 雷宇鑫², 梁 磊², 宋 悦²,
邱 橙², 王玉冰², 陈泳屹², 宁永强², 王立军², 魏志鹏^{1*}

- (1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 长春理工大学 中山研究院半导体激光及应用实验室, 广东 中山 528437;
4. 中国科学院大学 大珩学院, 北京 100049;
5. 海南师范大学 物理与电子工程学院, 海南海口市 571158)

摘要: 为满足精准农业与植物光生物学研究对 730 nm 远红光光源在高功率密度、高光束质量及精准光谱匹配方面的迫切需求, 本研究设计并制备了一种锥形角度(θ)在 2° 至 6° 范围内可调的 730 nm 高功率锥形激光器。系统测试表明, 锥角设计对器件性能具有关键影响, 通过定义综合品质因数 Q 对功率、光束质量与光谱宽度进行平衡评估。在锥角为 3° 时, 器件在 20°C 、1.1 A CW 驱动电流下实现了超过 360 mW 的高功率输出, 且光束质量因子 $M^2 < 3$, 光谱半高全宽(FWHM)窄至 0.5 nm。本研究为面向农业生物光学应用的高性能半导体激光器设计提供了重要的器件基础与理论依据。

关键词: 730 nm 激光器; 锥形波导; GaAsP/AlGaInP; 光束质量; 农业光生物学

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260038

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260038

High Performance 730 nm Tapered Semiconductor Lasers for Laser Agriculture

LIU Qian^{1,2,3}, JIA Peng², QIN Li², DIAO Shuhan^{2,4}, CHEN Haofei^{2,4}, LIU Baiheng^{2,4},
WANG Shuang^{2,4}, LI Bo¹, LI Zaijin⁵, QU Yi⁵, LEI Yuxin², LIANG Lei², SONG Yue², QIU Cheng²,
CHEN Yongyi², WANG Yubing², NING Yongqiang², WANG Lijun², WEI Zhipeng^{1*}

- (1. State Key Laboratory of High-Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;
2. Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, & State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;
3. Semiconductor Laser and Application Laboratory, Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, Guangdong, China;
4. Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, Beijing, China;
5. College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, Hainan, China)

* Corresponding Authors, E-mail: jiapeng@ciomp. ac. cn; zpweicust@126. com

Abstract: To address the urgent demand for 730 nm far-red light sources with high power density, excellent beam quality, and precise spectral matching in precision agriculture and plant photobiology research, this study designs and fabricates a 730 nm high-power tapered laser with an adjustable taper angle (θ) ranging from 2° to 6° . Systemat-

收稿日期: 2026-02-01; 修订日期: 2026-02-16

基金项目: 吉林省科技发展计划项目[20250201056GX]; 国家自然科学基金[62274164]; 延边州院地科技合作项目[2024HZ13]; 海南省院士创新平台专项科研基金项目(YSPTX202513)资助项目。

ic characterization reveals that the taper angle critically influences device performance. A comprehensive figure of merit Q is defined to evaluate the trade-offs among output power, beam quality, and spectral width. At a taper angle of 3° , the device delivers over 360 mW of output power at 1.1 A under 20°C , with a beam quality factor $M^2 < 3$ and a narrow spectral full width at half maximum (FWHM) of 0.5 nm. This work provides an essential device foundation and theoretical basis for the design of high-performance semiconductor lasers tailored for agricultural biophotonic applications.

Keywords: 730 nm laser; Tapered waveguide; GaAsP/AlGaInP; Beam quality; Agricultural photobiology

1 引 言

随着精准农业与植物光生物学研究的不断深入,对高性能人工光源提出了日益增长的需求^[1,2]。特定波长的光不仅为光合作用提供能量,更是调控植物光形态建成、代谢途径以及产量与品质的关键环境信号。其中,位于 730 nm 附近的远红光已被证实是光敏色素系统的核心调控波段,能够显著影响种子萌发、茎伸长、开花时间以及避荫反应等重要生理过程^[3-7]。因此,研制具有高功率与高光束质量的 730 nm 光源,对于深化植物光响应机理研究、推动光调控农艺应用具有重要的科学意义与应用价值。

然而,当前农业领域主流的远红光 730 nm LED 光源存在半宽较宽($\sim 20\text{-}30\text{ nm}$)、方向性差、能量利用率低、功率密度低、光束发散角大、光谱易漂移等局限^[8],难以实现高通量种子处理、远距离精准辐照及与大范围均匀光照的需求。相较 LED 宽谱冗余辐照,激光器具有电光效率高、谱宽窄、光束质量好、易于高速调制等优点,同时可精准激发光敏色素 Pfr 态光转化,避免非目标波段对植物花期、株高的干扰效应^[9,10],此为半导体激光器在智慧农业中不可替代的核心价值。然而,传统激光器在提升输出功率时常伴随光束质量下降,限制了其在高亮度农业照明中的应用。

针对上述问题,本文聚焦于 730 nm 高功率锥形激光器的器件设计,深入研究锥形角度对激光器性能的影响。通过制备并评估

不同角度锥形激光器的器件,最终结果表明 3° 锥角的器件展现出最佳的综合性能,在 1100 mA 驱动电流下可实现超过 360 mW 的输出功率,同时保持 $M^2 < 3$ 的优良光束质量以及约 0.5 nm 的窄光谱宽度,为高性能 730 nm 锥形激光器的设计制备提供可行的技术路径,并为其在农业与生物学领域的进一步应用奠定器件基础。

2 锥形波导激光器设计原理与角度优化理论

本研究采用如图 1 所示的锥形激光器波导结构。第一段为窄直波导,宽度 $W_1=4\ \mu\text{m}$,长度 $L_1=1\ \text{mm}$,用于抑制高阶横模,保证基模注入^[11]。在 GaAs 材料体系中,当脊宽 $W_1 \leq 5\ \mu\text{m}$ 时,该波导在设计刻蚀深度下可维持单模传输,选取 $W_1=4\ \mu\text{m}$ 兼顾了单模条件与工艺容差^[12,13]。第二段为锥形放大区长度 $L_2=1\ \text{mm}$,其作用是在避免腔面灾变性光学损伤(COD)的前提下对光场进行放大。

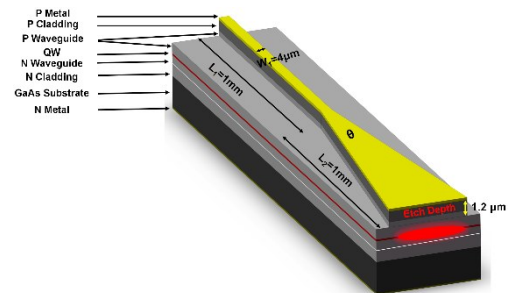


图 1 典型 730nm 半导体锥形激光器结构示意图

Fig.1 Structural schematic of a typical 730 nm semiconductor tapered laser.

在农业光生物学应用中,730 nm 激光光源需同时具备高功率、良好光束质量与高光谱纯度,以满足大范围均匀辐照及与光敏色素 Pfr 窄吸收谱有效匹配的需求,本研究构建如下综合品质因数 Q ,以系统评估不同锥角 θ 下器件的整体性能:

$$Q(\theta) = \frac{P(\theta)}{M^2(\theta) * \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{total}}}{\Delta\lambda_0} \right)} \quad (1)$$

其中, $P(\theta)$ 为器件输出功率, $M^2(\theta)$ 为光束质量因子, $\Delta\lambda_{\text{total}}$ 为光谱宽度, $\Delta\lambda_0$ 为参考光谱宽度(对应吸收谱半高宽)。式中, $\Delta\lambda_0$ 对应于光敏色素 Pfr 活性形式的典型吸收谱半高宽,用于量化激光输出光谱与植物光受体有效吸收带的匹配程度。

该评价函数借鉴了半导体激光器常用品质因子 FOM (Figure of Merit) 的构建思想^[14], 采用乘法形式综合权衡功率与光束质量、光谱纯度之间的制约关系。功率置于分子位置体现应用端对高光强输出的首要需求, 发散角与光谱宽度置于分母位置表征对光束方向性与光谱选择性的约束要求。为系统研究功率、光束质量与光谱宽度之间的平衡关系, 本研究设计并制备了锥角在 2° 至 6° 范围内的锥形波导结构。通过对不同角度器件的性能进行测试与 Q 值评估, 以实现面向农业应用的高性能 730 nm 锥形激光器的最优设计。

3 器件制备

本研究基于有源区压应变 GaAsP 量子阱和波导 AlGaInP 体系, 采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术在 n 型 GaAs 衬底上生长了针对 730 nm 发光优化的外延结构。利用高精度光刻与电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀工艺制备了不同角度的锥形脊波导, 随后沉积钝化层, 并制备电极注入窗口。同时为保证变量唯一性, 不同锥角器件的电注入区域 (即脊波导宽度及锥形区张角) 严格按设计比例调整, 但脊波导段长度、锥形区长度及器件宽度在所有器件中保持一致。最后在 p 面和 n 面分别蒸镀 Ti/Pt/Au 与 AuGe/Ni/Au 电极, 并经 400°C 快速热退火形成欧姆接触。通过解理获得腔长为 2 mm 的巴条, 前后端面分别镀制增透膜 (反射率 $<1\%$) 与高反膜 (反射率 $>95\%$)。

器件的电光特性测试在室温 (25°C) 下、脉冲驱动条件下进行, 以最小化热效应影响。输出功率通过经过校准的积分球探测器与功率计测量。光谱特性由分辨率为 0.1 nm 的光谱分析仪采集, 重点分析中心波长与光谱半高全宽 (FWHM)。光束质量通过光束分析系统进行表征, 测量远场光斑分布并计算光束质量因子 M^2 。所有器件均安装于带有热电冷却器的铜热沉上进行测试, 以确保测试条件的一致性。

4 结果与讨论

4.1 功率-电流特性

在 20°C 的 CW 测试条件下, 2° - 6° 的不同锥角器件的 LIV 曲线如图 2 所示, 锥角在 3° 时, 器件的功率最高, 在 1100 mA 的连续电流下, 功率可达 360 mW。图 3 对比了不同角度的阈值电流和斜率效率, 锥角从 2° 增加到 3° , 阈值电流从 304 mA

增加 324 mA, 增幅仅为 20 mA, 但锥角从 3° 增加到 6° , 阈值电流呈现出快速增加的趋势, 从 3° 的 324 mA 增加到 6° 的 721 mA。另外, 斜率效率曲线在 3° 时达到峰值, 为 0.46 W/A。这是因为较小锥角下 (2° - 4°) 模式维持较好但输出端宽度有限, 限制功率提升, 而锥角过大 ($>4^\circ$) 导致散射损耗增加、热积累加剧, 进而引起阈值上升与效率下降^[15], 同时锥区加宽也导致电流扩展路径延长, 泵浦区域的面积增加, 进一步提高阈值电流。

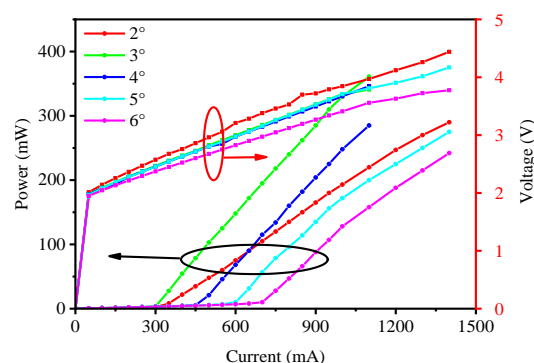


图 2 不同锥角器件的 LIV 曲线

Fig.2 L-I-V characteristics of the devices with different taper angles.

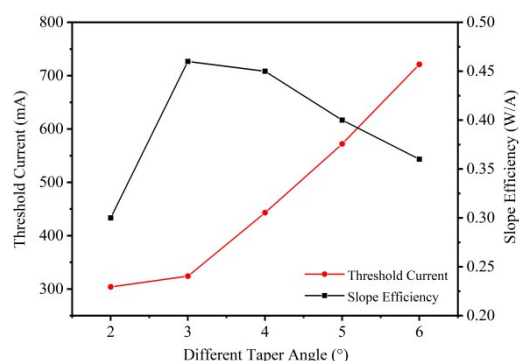


图 3 不同锥角器件 SE 和 Ith 对比

Fig.3 Comparison of SE and Ith for devices with different taper angles.

功率随锥角增大呈现先增后降趋势。主要原因是小锥角 (2°) 下模式受限强, 但光功率密度过高易引起端面灾变性光学损伤 (COD); 最佳锥角 (3°) 条件下有效扩大了激射面积, 降低了端面功率密度, 同时保持良好的光束质量; 而过大锥角 (6°) 条件下高阶横模起振, 光束质量劣化导致耦合损耗增加, 且注入电流在过宽区域分布稀疏, 增益效率下降。同时, 随着锥角增大, 串联电阻略微降低, 这是由于电流扩展区域几何宽度增加所致。该研究器件的电压同比其他相同结构器件更高^[16,17], 主要由

于测试采用探针直接压在未开窗的p面电极上,会导致接触电阻率偏高。在4A以上的大电流下,接触电阻贡献的电压降会线性增加,使得I-V曲线在大电流区的斜率(即微分电阻)看起来较大。

4.2 光束质量分析

光束质量因子 M^2 的测量结果直接验证了锥角设计的核心目标。图4展示了900 mA电流下,不同角度锥形激光器的远场分布。该电流位于所有器件激射阈值之上且热饱和拐点之下,而且该电流下不同锥角器件的功率差异较小,排除了热效应对远场可比性的干扰。从图中可以看出,水平发散角随着锥形角度的增加而逐渐增加。根据

光束质量的计算公式:

$$M^2 = \frac{1}{2} \omega \frac{1}{2} \theta \frac{\pi}{\lambda} \quad (2)$$

计算不同锥形角度的光束质量如图5所示。 2° 锥角器件表现出最佳的光束质量,慢轴方向 M^2 约为1.8,接近衍射极限。随着锥形角度的增加,高阶横模被显著激发,导致慢轴 M^2 值迅速升高。 M^2 随锥角增大而恶化,其主要物理机制在于较大的锥角导致波导横向尺寸变化率增加,降低了波导对基横模的约束能力,使得高阶横模更易达到阈值并被激发。同时,锥形区中光场的绝热膨胀条件被破坏,引发多模干涉与模式竞争,从而显著劣化了慢轴方向的光束质量^[18]。

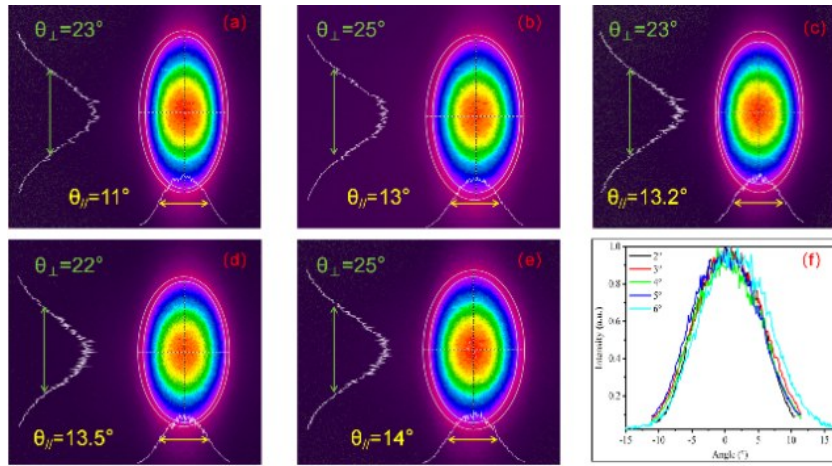


图4 不同锥角器件在0.9 A连续电流注入下的远场光斑分布及慢轴截线对比。(a) - (e) 锥角 $2^\circ - 6^\circ$ 对应的二维伪彩色光强分布图(快轴经柱透镜准直后,慢轴为原始发散光),强度已归一化至各图峰值;(f) 对应(a) - (e)中各光斑沿慢轴几何中心提取的归一化光强截线对比图

Fig.4 Far-field spot distributions and slow-axis linescan profiles of devices with different taper angles under continuous-wave (CW) operation at 0.9 A. (a) - (e) Two-dimensional pseudo-color intensity maps for taper angles of $2^\circ - 6^\circ$ (fast axis collimated by a cylindrical lens, slow axis exhibiting native divergence), with intensities normalized to the peak value of each map; (f) Corresponding normalized intensity linescan profiles extracted along the geometric center of the slow axis from (a) - (e).

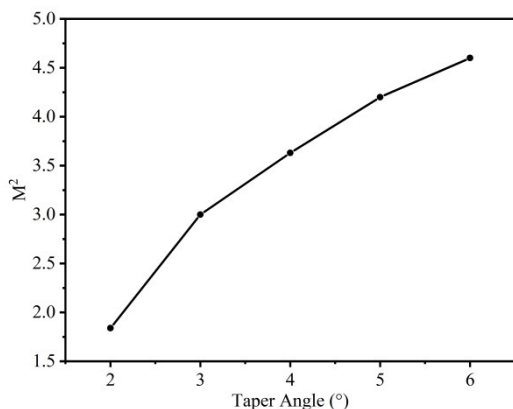


图5 不同锥形角度的 M^2 对比

Fig.5 Comparison of M^2 for different taper angles.

4.3 谱宽特性

图6展示了 20°C 900 mA 电流下,不同锥形角度的光谱。在 $2-5^\circ$ 范围内,器件光谱宽度较窄,FWHM 约为 0.4-0.6 nm,表现出优异的单色性。随着锥角增大至 6° ,光谱变差,并伴随多模出现。这归因于较大锥角波导中高阶模的激发及模式竞争。

4.4 综合性能分析与讨论

基于公式(1)定义的品质因数 Q ,对不同锥角器件的综合性能进行量化评估的结果如图7所示。计算结果表明, Q 值随锥角呈现先增后减的趋势,在 $\theta=3^\circ$ 区间达到峰值。该角度的器件在维

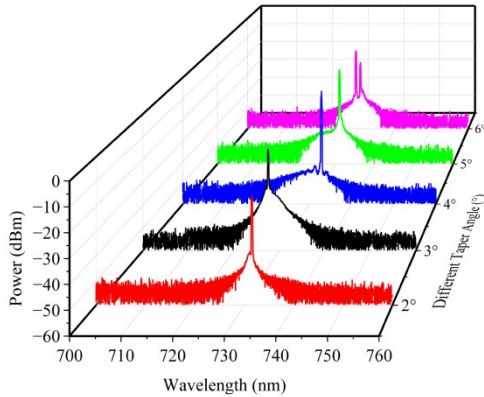


图 6 20°C 900 mA 测试条件下,不同锥形角度的光谱对比

Fig.6 Spectral comparison for different taper angles under test conditions of 20°C and 900 mA.

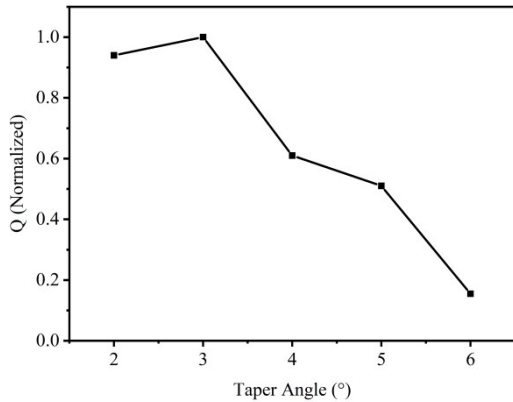


图 7 不同锥角的 Q 因子对比

Fig.7 Comparison of Q-factor for different taper angles.

持高功率输出 (>300 mW)、优良光束质量 ($M^2 < 3$) 和高光谱纯度 (FWHM~0.5 nm) 之间实现了最佳平衡。

图 8 展示了不同温度下 3° 锥形激光器的 LIV 特性曲线。随着温度从 20°C 升至 60°C, 阈值电流 (I_{th}) 由约 350 mA 增加至约 420 mA, 增幅 20%, 呈现稳定的上升趋势; 斜率效率 (SE) 则呈线性下降, 从 0.46 W/A 降至 0.35 W/A。在 1100 mA 驱动电流下, 输出功率随温度升高显著衰减, 相较 20°C 时, 60°C 下的输出功率衰减仅为 30%。该器件温变较小主要归因于 GaAsP/AlGaInP 高势垒结构降低了载流子热泄漏效应, 使得有源区内较少的载流子越过量子阱势垒参与非辐射复合, 从而抑制了阈值的进一步攀升。同时, 输出功率的衰减是阈值电流上升与斜率效率下降共同作用的结果, 清晰地反映了热效应对激光器输出能力的制约。

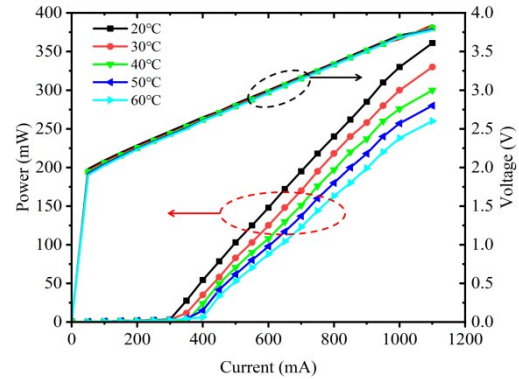


图 8 锥角 3° 的锥形激光器不同温度的 L-I-V 曲线

Fig.8 L-I-V curves of the tapered laser with a 3° taper angle under different temperatures.

尽管高温会导致器件性能衰减, 但在 60°C 的极端温室温度下, 优化后的 3° 锥角器件仍能提供超过 250 mW (1100 mA) 的 730 nm 激光输出。该功率水平可以触发植物光敏色素 (Pfr) 响应、实现光形态调控。本测试数据为后续农业激光系统的热管理设计提供了关键依据。

图 9 展示了不同温度下 3° 锥形激光器的光谱特性曲线。中心波长变化稳定在 730 ± 5 nm 范围内, 与光敏色素 Pfr 的吸收峰良好匹配^[19]。此优化结果为面向大范围、高均匀性农业辐照应用的光源设计提供了明确的工程指导。

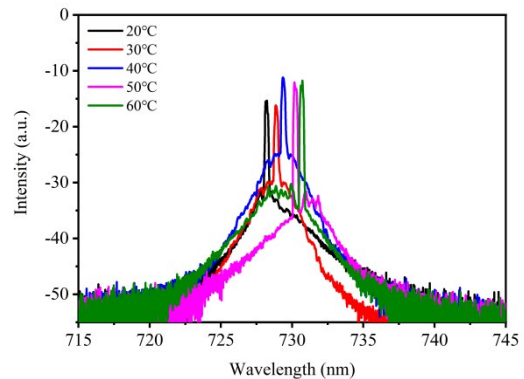


图 9 锥角 3° 的锥形激光器不同温度的光谱曲线

Fig.9 Spectral curves of the tapered laser with a 3° taper angle under different temperatures.

5 结 论

本研究成功设计、制备并系统地表征了一系列锥角 (2° 至 6°) 可调的 730 nm 高功率 GaAsP/AlGaInP 锥形激光器。实验结果表明, 锥角是调控器件输出功率、光束质量与光谱性能的核心设计参数, 3° 锥角的器件展现出最佳的综合性能, 在 1100

mA 驱动电流下可实现超过 360 mW 的输出功率,同时保持 $M^2 < 3$ 的优良光束质量以及约 0.5 nm 的窄光谱宽度。该器件性能满足了农业光生物学应用对远红光光源高亮度、高准直性与高光谱纯度

的关键要求。本研究不仅为高性能植物光照用半导体激光器提供了一种有效的设计范例,其揭示的锥角与性能关系也为未来开发面向精准农业的定制化光电芯片奠定了坚实的理论与实验基础。

参 考 文 献:

- [1] LV B, HUANG M, CHEN M, *et al.* Achievement of Possibly Maximum Photosynthetic Performances for Multi-Primary Laser Lighting for Indoor Farming [J]. *IEEE Photonics J.*, 2023, 15(4): 1-6.
- [2] 杨明来, 马强, 卞婷, 等. 一种采用激光辐照加速育种方法: 中国, 202311464920 [P]. 2023.
YANG M L, MA Q, BIAN T, *et al.* A method for accelerating breeding using laser irradiation: *China*, CN202311464920 [P]. 2023. (in Chinese)
- [3] LUKENS L N, ZHAN S. The plant genome's methylation status and response to stress: implications for plant improvement [J]. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2007, 10(3): 317-322.
- [4] ZHANG Y, LIN X, MA C, *et al.* Structural insights into plant phytochrome A as a highly sensitized photoreceptor [J]. *Cell Res.*, 2023, 33(10): 806-809.
- [5] MAGDY A M, FAHMY E M, EL-RAHMAN M A-AABD, *et al.* Improvement of 6-gingerol production in ginger rhizomes (*Zingiber officinale* Roscoe) plants by mutation breeding using gamma irradiation [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2020, 162: 109193.
- [6] ZHU Z, LI N, LI W, *et al.* Laser mutagenesis of *Phellinus igniarius* protoplasts for the selective breeding of strains with high laccase activity [J]. *Appl. Biochem. Biotech.*, 2020, 190: 584-600.
- [7] 陈文成. 730nm 远红光 LED 在植物照明中的应用 [J]. 中国照明电器, 2015, (8): 3.
CHEN W C. Application of 730 nm far-red LED in plant lighting [J]. *Chin. Light. Light.*, 2015, (8): 3. (in Chinese)
- [8] DOU H, LI X, LI Z, *et al.* Supplementary far-red light for photosynthetic active radiation differentially influences the photochemical efficiency and biomass accumulation in greenhouse-grown lettuce [J]. *Plants*, 2024, 13(15): 2169.
- [9] QIN X, YU T, YAN Y, *et al.* Light-quality-directed plant growth strategy controlled by SnRK2s [J]. *Developmental Cell*, 2026, 61(2): 292-307.
- [10] SZABÓ C M, BÁN B, SINKA B, *et al.* A comparative study of femtosecond pulsed and continuous wave lasers on physiological responses through activation of phytochromes in seeds [J]. *Sci. Rep.*, 2025, 15(1): 26719.
- [11] 汪丽杰, 佟存柱, 王延靖, 等. 半导体激光器侧向模式控制技术的研究进展 [J]. 中国光学(中英文). 2022, 15(05): 895-911.
WANG L J, TONG C Z, WANG Y J, *et al.* Research progress of lateral mode control technology for semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 895-911. (in Chinese)
- [12] 张程程, 张东亮, 王锐, 等. 大功率脉冲量子级联激光器锥形波导光学与热学仿真设计 [J]. 红外与激光工程. 2024, 53(5): 38-49.
ZHANG C C, ZHANG D L, WANG R, *et al.* Optical and thermal simulation design of tapered waveguide for high-power pulsed quantum cascade laser [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2024, 53(5): 20240015. (in Chinese)
- [13] MA D-Z, CHEN Y-Y, LEI Y-X, *et al.* 1045 nm purely gain coupled semiconductor laser based on periodic electric injection [J]. *J Lumin.*, 2020, 225: 117372.
- [14] YAMADA M J S. *Theory of semiconductor lasers* [M]. Springer, 2014.
- [15] 杨晔, 刘云, 秦莉, 等. 850nm 高亮度锥形半导体激光器的光电特性 [J]. 发光学报. 2011, 32(06): 593-7.
YANG Y, LIU Y, QIN L, *et al.* Electro-optical characteristics of 850 nm high brightness tapered semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(6): 593-597. (in Chinese)
- [16] ADAMIEC P, RUDIGER I, FRICKE J, *et al.* Tapered lasers emitting at 650 nm with 1 W output power with nearly diffraction-limited beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(16): 2456.
- [17] CHEN Z H, QU H W, MA X L, *et al.* High-Brightness Low-Divergence Tapered Lasers with a Narrow Taper Angle [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2019, 36(8).

- [18] 薛正群, 池炳坤, 陈玉萍. 1.55 μm 高功率单横模半导体激光器的研制 [J]. 发光学报. 2024, 45(07): 1189-95.
XUE Z Q, CHI B K, CHEN Y P. Development of 1.55 μm high-power single transverse mode semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(7): 1189-1195. (in Chinese)
- [19] 刘倩, 贾鹏, 陈泳屹, 等. 高功率、高温稳定 730 nm 激光器研究 [J]. 中国激光, 2026, 53(18): 06. (First online)
LIU Q, JIA P, CHEN Y Y, *et al.* Research on high-power and high-temperature stable 730 nm laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2026, 53(18): 06. (in Chinese) (First online)



刘倩(1993-),女,山西省吕梁人,博士研究生。2020年于闽南师范大学获得硕士学位,主要从事半导体激光器的设计和研究工作。

E-mail: qianliu0118@163.com



魏志鹏(1978-),男,教授,博士生导师,2008年获得中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位,主要从事半导体光电子器件及应用研究。

E-mail: zpweicust@126.com



贾鹏(1986-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副研究员,博士生导师,2015年于中国科学院大学获博士学位,主要从事高功率与窄线宽分布式布拉格反射激光二极管研究。

E-mail: jiapeng@ciomp.ac.cn