



·激光物理·

# 高亮度蓝光半导体激光光纤耦合实验研究<sup>\*</sup>

谭 昊<sup>1,2</sup>, 吴华玲<sup>1,2</sup>, 蒋全伟<sup>1,2</sup>, 张兰平<sup>1,2</sup>, 郭林辉<sup>1,2</sup>, 傅 波<sup>1,2</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 高功率蓝光半导体激光可广泛应用于高反射高导电材料的加工中。阐述了一种高效紧凑的高功率高亮度蓝光半导体激光光纤耦合的实现方法, 将 27 只蓝光单管组成 3×9 阵列并耦合进 100 μm/NA0.2 的光纤中。研制出的光纤耦合模块可实现 450 nm 波段蓝光 LD 输出, 功率约 75 W, 电光效率约 28%, 还可采用偏振合束进一步提升光纤耦合激光功率。

**关键词:** 半导体激光器; 光纤耦合; 高亮度; 蓝光激光; 可见光

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210274

## Experimental study on high brightness blue diode laser fiber coupling

Tan Hao<sup>1,2</sup>, Wu Hualing<sup>1,2</sup>, Jiang Quanwei<sup>1,2</sup>, Zhang Lanping<sup>1,2</sup>, Guo Linhui<sup>1,2</sup>, Fu Bo<sup>1,2</sup>, Gao Songxin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Based on the advantages of diode laser, such as high efficiency and high integration, blue diode laser source can be widely used in highly-reflective and highly conductive materials processing. This paper introduces a high power high brightness blue diode laser fiber coupling module based on 3×9 single emitter diode laser array, which can realize 75 W single polarization 450 nm diode laser output from 100 μm 0.2 NA fiber. Polarization beam combining can also be used to further improve the fiber coupling blue diode laser power.

**Key words:** semiconductor laser, fiber coupling, high brightness, blue laser, visible laser

二极管激光器具有波长覆盖范围广、电光效率高、体积小等特点, 特别是 900~1000 nm 波段的二极管激光技术因在材料加工、固体激光泵浦等领域的广泛应用而得到了长足的发展。但在材料加工领域, 常用的 900~1000 nm 波段的激光对高反射高导电材料(HRMs)的加工效率很低<sup>[1-6]</sup>, 例如金、铜等材料, 需求更短的波长以实现更高的吸收率<sup>[2]</sup>。近年来得益于电动汽车用电池组电极焊接、基于铜粉的增材制造等需求的激增, 大功率 GaN 基蓝光半导体激光技术得到了迅速发展, 德国 laserline 公司、美国 Nuburu 公司、北京凯普林光电等公司均推出了相应的蓝光半导体激光光纤耦合模块产品<sup>[7-10]</sup>。其中 Nuburu 公司推出的 AI 系列模块, 可实现 125 μm 光纤输出蓝光半导体激光功率最高 1500 W; 日本 Panasonic 公司则基于光谱合束技术路线实现了上百只蓝光半导体激光管芯输出激光的共孔径合束输出, 功率最高可达 135 W, 为全世界最高亮度的蓝光半导体激光输出。

本文阐述了一种高效紧凑的高功率高亮度蓝光半导体激光光纤耦合的实现方法。通过采用 ZEMAX 光学仿真软件进行耦合参数优化设计, 结合自由空间合束与台阶式封装排布提升耦合功率与紧凑性, 最终实现了高功率高亮度的蓝光半导体激光光纤耦合输出光源。另外, 由于所用的 LD 为 TE 偏振, 因此还可在光纤耦合前采用偏振合束进一步提升光纤耦合的光功率。

### 1 实验原理与设计

本文拟采用多 LD 芯片的台阶式封装, 经过自由空间合束, 通过光学聚焦系统实现百瓦级光纤耦合输出的技术路线, 光纤参数为 100 μm/NA0.2。蓝光 LD 采用德国 Osram 公司的 447 nm 蓝光 LD 作为光纤耦合光源, 其参数如表 1 所示。

\* 收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金项目(HEL2020-03)

联系方式: 谭 昊, [tanhaomf@163.com](mailto:tanhaomf@163.com)。

表 1 蓝光 LD 参数表

Table 1 Parameters of the blue laser diode chip

central wavelength/nm	emitter width/ $\mu\text{m}$	cavity length/mm	operating current/A	fast axis divergence/( $^\circ$ )	slow axis divergence/( $^\circ$ )	output power/W	polarization
447	40	1.2	2.2	46	9	3	TE(100:1)

根据表 1 的输出参数,单管 LD 快轴采用商用 310  $\mu\text{m}$  焦距的快轴准直镜(FAC)进行准直,准直后剩余发散角约 4~5 mrad,光束尺寸约 0.3 mm,对应束参积为 0.4 mm·mrad;慢轴束参积则为 1.6 mm·mrad。为使得准直后快慢轴方向发散角一致,以便于实现高效率的光纤耦合,慢轴选择有效焦距 9 mm 的柱透镜进行准直,单元 LD 快轴准直模拟如图 1 所示。准直后快轴方向光束尺寸为 0.32 mm,发散角为 5 mrad,慢轴方向光束尺寸为 1.4 mm,发散角 6 mrad。

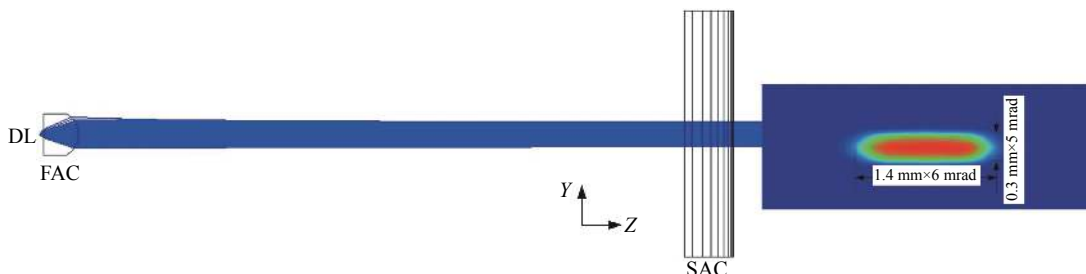


Fig. 1 Beam collimation of single blue laser diode chip

图 1 单管准直的模拟结果

选用光纤芯径 100  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 NA0.2, 因此沿慢轴方向可排列的单管数量为 3.5, 沿快轴方向可排列的单元数量为 11。考虑到微透镜的装配误差与光纤耦合效率等因素,在考虑一定容差的前提下最终设计定为使用 27 个单管构成 3 $\times$ 9 排列, 27 个 LD 单元与光纤参数的匹配关系如图 2 所示。

由于快慢轴准直后发散角比较接近, 聚焦耦合系统可采用单个非球面聚焦镜。由理论计算可知, 选择有效焦距 12~14 mm 的非球面透镜比较合适。因此选择商用成品 12.5 mm 的非球面聚焦镜。

综上, 拟采用 27 支 447 nm 高亮度 LD 作为耦合光源, 单支 LD 额定输出功率~3 W, 将 27 只管芯分为 3 列, 每列 9 只管芯, 采用台阶式封装, 9 只管芯按照 0.4 mm 的垂直间距与 6 mm 的水平间距封装在管壳中。每列 9 只管芯均经过 310  $\mu\text{m}$  焦距的快轴准直镜与 9 mm 焦距的慢轴准直镜进行准直, 通过反射镜实现 9 只管芯输出激光沿垂直方向的排列。同样采用反射镜将 3 列管芯的输出激光沿水平方向排列起来。

图 3 为聚焦焦斑与光纤耦合输出激光的强度分布模拟结果, 可以看出, 光纤耦合效率高达 99%, 系统整体光光效率为 98%。考虑菲涅尔反射损失 5% 的效率, 装调允许 10% 的损失, 最终光光效率 84%, 可获得大于等于 68 W

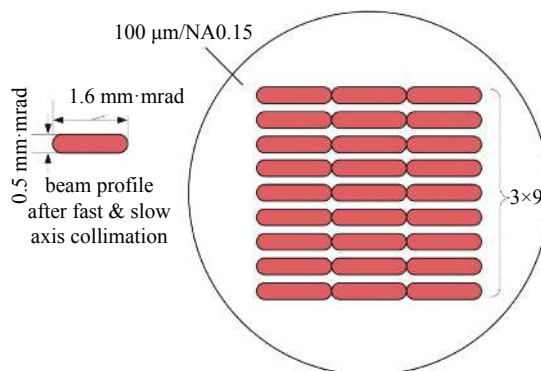


Fig. 2 Scheme of 3 $\times$ 9 blue diode laser fiber coupling

图 2 LD 单元束参积与光纤束参积的匹配关系

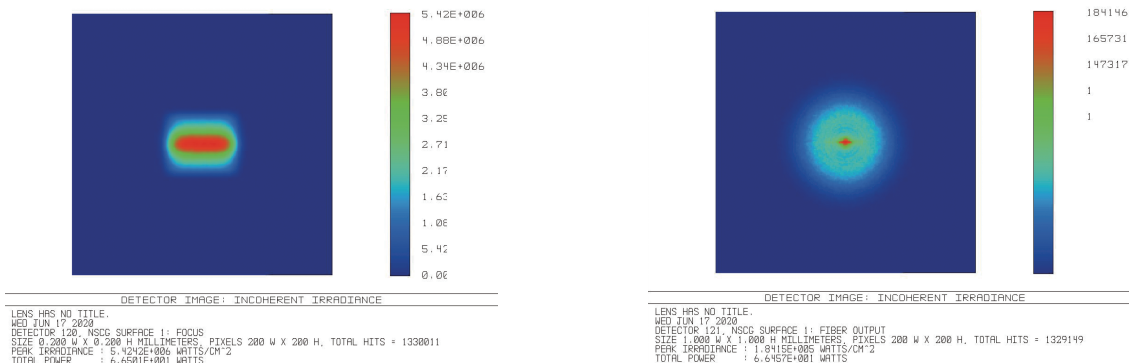


Fig. 3 Beam pattern after beam focus lens(a) & fiber cable(b)

图 3 焦斑(a)与光纤耦合输出光斑(b)模拟

的蓝光半导体激光光纤耦合输出。

另外,由于文中所用的 GaN 基的蓝光 LD 芯片所需的加载电压较 GaAs 基的近红外芯片高出约一倍左右,额定电流工作时约 4 V。为了防止因电压过高可能导致的短路,本文的蓝光 LD 光纤耦合模块采用了串联并联相结合的方式控制模块的整体加载电压,即每一列的 9 只 LD 相互串联,3 列间并联的方式。

## 2 实验结果与分析

实验首先基于蓝光芯片开展了封装与测试,将蓝光单管 LD 封装至 4.5 mm×4.5 mm×0.2 mm 的 AlN 陶瓷次热沉上,陶瓷表面覆铜、镀金并预制了 Au80Sn20 合金焊料。蓝光单管 LD 的测试结果如图 4 所示。基于上述设计开展了 100 μm 高功率蓝光尾纤耦合模块研制。模块实物照片与输出测试曲线分别如图 5~6 所示,可实现最高 75 W 的 100 μm 光纤蓝光 LD 输出,电光效率约 28%。整体模块尺寸约 100 mm×90 mm×20 mm。

亮度  $B$  的计算公式<sup>[4]</sup>

$$B_{\text{diode}} = \frac{P_{\text{av}}}{16 \cdot \text{BPP}_{\text{fast}} \cdot \text{BPP}_{\text{slow}}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{av}}$  为激光功率;  $\text{BPP}_{\text{fast}}$  为快轴光束参量积;  $\text{BPP}_{\text{slow}}$  为慢轴光束参量积。

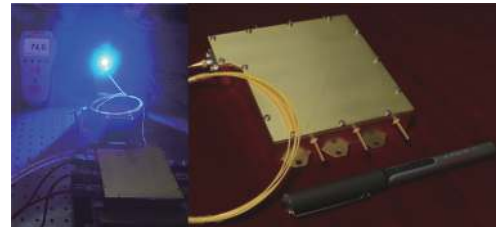


Fig. 5 Blue diode laser fiber coupling module  
图 5 蓝光尾纤耦合模块照片

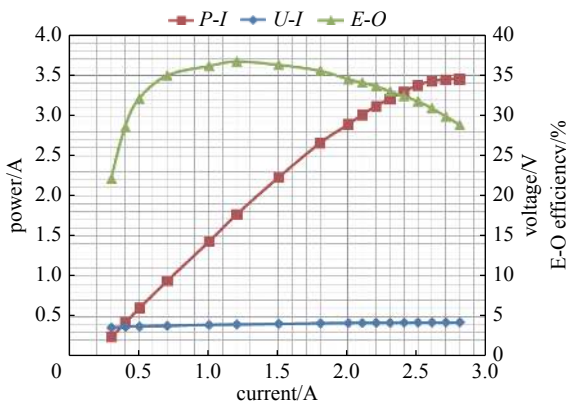


Fig. 4 Output characteristic of single blue laser diode chip  
图 4 蓝光单管 LD 输出特性曲线

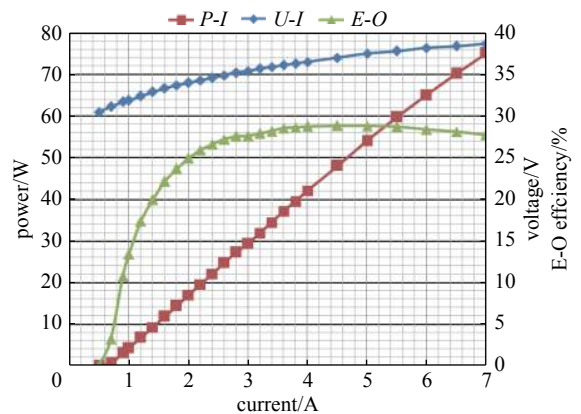


Fig. 6  $P$ - $I$ - $V$  curve of 27 blue diode laser fiber coupling  
图 6 蓝光尾纤耦合模块输出特性曲线

由于耦合光学设计考虑了快慢轴光束质量的一致性以及与光纤参数的匹配,因此可近似认为耦合激光束经光纤匀化后的两个轴向 BPP 相近且约等于光纤自身的芯径与数值孔径乘积,因此由公式(1)可以计算出输出光斑亮度  $B \approx 4.69 \text{ MW}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。

## 3 结论

本文基于 ZEMAX 的光学仿真设计、结合自由空间合束与台阶式封装排布,设计了一种高效紧凑的高功率高亮度蓝光半导体激光光纤耦合方法,基于该设计完成了高功率高亮度的蓝光半导体激光光纤耦合模块的研制,输出功率最高约 75 W、亮度  $4.69 \text{ MW}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ ,完成了该高效紧凑高功率蓝光半导体激光光纤耦合模块设计方法的验证,为后续更高亮度与功率的蓝光半导体直接光源的实现提供了支撑。

### 参考文献:

- [1] Riva M, Rossi G, Braglia A, et al. High brightness 100 W-50 μm delivery blue laser diode module[C]//Proceedings of SPIE 11262 High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 112620O.
- [2] Balck A, Baumann M, Malchus J, et al. 700 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm[C]//Proceedings of SPIE 10514 High-Power Diode Laser Technology XVI. 2018: 1051403.
- [3] Asano K, Tsukamoto M, Funada Y, et al. Copper film formation on metal surfaces with 100 W blue direct diode laser system[J]. *Journal of Laser Applications*, 2018, 30: 032602.
- [4] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers technology and applications[M]//Rhodes W T. Springer Series in Optical Sciences. New York:

Springer, 2007: 121-124.

- [5] 王立军, 彭航宇, 张俊. 高功率半导体激光器研究现状与发展[C]//第13届全国MOCVD学术会议. 2014. (Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Research status and development of high power semiconductor lasers[C]//The 13th National MOCVD Conference of China, 2014.)
- [6] 顾波. 高功率蓝光半导体激光器为金属加工打开了新的大门[J]. 金属加工:热加工, 2021(3): 1-6. (Gu Bo. High power blue-light semiconductor laser has opened a new door for metal processing[J]. Machinist Metal Forming, 2021(3): 1-6)
- [7] 段程芮, 赵鹏飞, 王旭葆, 等. 高亮度蓝光半导体激光器光纤耦合技术[J]. 光电工程, 2021, 48: 200372. (Duan Chengrui, Zhao Pengfei, Wang Xubao, et al. Fiber coupling technology of high brightness blue laser diode[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48: 200372)
- [8] 谢文君. 激光照明用蓝光半导体激光器光纤耦合技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018. (Xie Wenjun. Research on fiber coupling technology of blue-light semiconductor laser for laser illumination[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018)
- [9] 吴鹏. 百瓦级高功率蓝光半导体激光器研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017. (Wu Peng. Study on 100 W level high-power blue diode laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017)
- [10] 向康, 刘在洲, 李海速. 高功率光纤耦合蓝光激光器设计与实现[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(1): 27-31. (Xiang Kang, Liu Zaizhou, Li Haisu. Design and realization of high-power fiber-coupled blue laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(1): 27-31)