

文章编号: 1000-7032(2023)07-1308-07

高功率蓝光半导体激光加工光源

张继业¹, 王靖博¹, 张俊¹, 彭航宇^{1,2*}, 陈磊²,
杨莹², 王峙皓³, 张春林⁴, 王立军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 吉光半导体科技有限公司, 吉林 长春 130022; 3. 东莞方孺光电科技有限公司, 广东 东莞 523822;
4. 陆军装备部驻北京地区军事代表局, 北京 100166)

摘要: 针对目前铜、金等金属材料加工的实际应用需求, 开展了连续输出功率 500 W 的光纤耦合输出蓝光半导体激光加工光源研究。基于平面窗口 TO 封装的蓝光半导体激光单管器件, 设计采用长后工作距的快轴准直镜和慢轴准直镜分别准直, 获得低发散角、高光束质量的单元准直光束; 结合二维空间合束、偏振合束和光纤耦合, 将 144 个蓝光单管器件耦合进 200 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.22 光纤, 通过 ZEMAX 软件对半导体激光光路进行光线追踪模拟; 并从实验上实现, 3 A 电流驱动下, 200 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.22 光纤输出连续功率 523 W, 电光转换效率 29%。该激光光源具有直接加工铜、金等材料的能力。

关键词: 蓝光半导体激光器; 光纤耦合; 激光合束; 激光加工

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230144

High Power Blue Diode Laser Source for Material Processing

ZHANG Jiye¹, WANG Jingbo¹, ZHANG Jun¹, PENG Hangyu^{1,2*}, CHEN Lei²,
YANG Ying², WANG Zhihao³, ZHANG Chunlin⁴, WANG Lijun¹

(1. State key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Jiguang Semiconductor Technology Co., Ltd, Changchun 130022, China;
3. Dongguan Fangru Optoelectronic Technology Co., Ltd, Dongguan 523822, China;
4. Beijing Martial Delegate Agency, Equipment Department of Army, Beijing 100166, China)

* Corresponding Author, E-mail: penghy@ciomp.ac.cn

Abstract: Aiming at the current requirement for processing of pure copper, pure gold and other metal materials, a fiber coupled blue diode laser source with continuous output power up to 500 W was fabricated. According to the ray paths simulation of diode laser by ZEMAX, the experiment of high-power blue diode laser source for material processing was carried out. In the experiment, a TO packaged blue laser diode single emitter was adopted as the emitting unit. Due to the TO packaged structure with flat output window mirror, it was designed for fast and slow axis collimator with longer back working distance to obtain collimating beam with low divergence angle and high beam quality. The beam of 144 single-tube blue diode laser devices were combined by space and polarization combination to couple into a 200 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.2 fiber. Under the cooling with industrial water, the output power of 523 W and the wall-plug efficiency of 29% for blue diode laser source were demonstrated from the 200 $\mu\text{m}/\text{NA}$ 0.2 fiber at the 3 A drive current. The laser light source had the potential application in non-ferrous metal processing.

Key words: blue diode laser; fiber-coupled; laser beam combination; laser processing source

收稿日期: 2023-06-06; 修订日期: 2023-06-27

基金项目: 广东省院士成果转化基地院士成果转化项目; 国家自然科学基金(62104225); 吉林省科技发展计划重点项目(20230201046GX)
Supported by The Academician Achievement Transformation Project of Guangdong Academician Achievement Transformation base; National Natural Science Foundation of China(62104225); Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan(20230201046GX)

1 引言

随着时代的发展,越来越多的有色金属材料登上了轻量化装备的舞台,而金属的激光吸收率对于激光加工应用来说,具有决定性的意义^[1]。作为金属材料加工领域中的通用工具,高功率连续激光器在经历了CO₂激光器、固体YAG激光器之后,进入了半导体激光器(Laser diode, LD)以及光纤激光器的应用时代。然而,LD因其广阔的波长范围以及直接的电泵浦方式,在波长设计、高电光效率、连续光输出、长期寿命上具有不可比拟的优势,使其在金属加工领域备受青睐^[2-3]。目前,近红外高功率LD已经被有效地应用在激光加工中,成为工业激光器的主力军之一^[4-5]。由于有色金属材料对近红外激光辐射具有高反射率的特点^[6],导致其在激光加工过程中极易产生焊接飞溅物以及在焊接接缝处形成孔隙^[7-8]。然而,波长较短的蓝光激光器具备更高的光子能量和金属材料吸收效率,能够更好地加工有色金属材料,尤其对铜、金等金属材料加工的提升更为明显,这将打开金属加工新技术的大门。

在激光显示、激光照明等领域带动下,蓝光LD元器件性能获得了巨大而快速的提升,基于蓝光LD的显示、照明设备也进入了日常生活^[9-10]。虽然蓝光LD元器件的亮度和功率不断地提高,但其功率密度和亮度仍无法满足激光加工的要求。为了激发高功率蓝光激光技术在金属加工领域的应用潜力,激光合束成为了必不可少的技术途径。针对有色金属加工光源的需求,最早由德国DILAS公司和日本岛津公司相继推出输出功率100 W的蓝光半导体激光器,运用到铜金属加工中^[11-12]。随后,德国Laserline公司采用蓝光半导体激光巴条迭阵合束,再进行空间合束以及光束整形,由2018年初的700 W功率增加到目前4 kW功率水平^[13]。其他如美国NUBURU公司、日本松下公司等也在蓝光半导体激光加工光源方面取得了重大成果^[14-15]。国内在这方面也正在积极研究,

凯普林通过制备160 W的光纤耦合输出模块,经过7×1合束器实现了国内首款千瓦级蓝光激光加工光源。

蓝光LD通常可以直接沿用与近红外LD相同的封装和激光合束方式,以获得高功率、高光束质量激光。然而,由于GaN基蓝光LD芯片容易氧化失效,基于上述方式封装合束的加工光源可靠性相对较差。应用于激光显示照明的蓝光激光单元采用自带单片非球面圆透镜的TO管壳进行封装,通过内部惰性气体保护,可以实现高可靠性^[16-17]。但是由于像散及封装误差影响,单元器件输出快慢轴方向的发散角差异大,并且快轴方向光束质量恶化严重,不便于实现高光束质量激光合束。

本文基于出光窗口为平面镜的TO封装蓝光LD单管器件,采用长后工作距的快轴准直镜和慢轴准直镜分别对快轴方向和慢轴方向准直,获得低发散角、高光束质量的单元准直光,结合二维空间合束、偏振合束和光纤耦合,将144个蓝光LD单管器件耦合进200 μm光纤中。在大通道水冷条件下,3 A电流驱动时,从200 μm/NA 0.22光纤输出连续功率523 W、电光转换效率近30%的450 nm激光,可用于铜、金属材料加工。

2 实验原理

2.1 准直设计和模拟

实验采用GaN基蓝光LD单管器件作为蓝光加工光源的元器件,其主要参数如表1所示。该器件在3 A电流驱动下,能够实现5 W以上的输出功率,其腔面发光区尺寸为1 μm(快轴)×45 μm(慢轴)。为了便于简化,以下同时表示快轴方向参数和慢轴方向参数时,采用两者相乘方式表示,其中前者表示快轴方向参数,后者表示慢轴方向参数。快轴方向和慢轴方向的发散角为50°×9°(95%能量)。由于蓝光LD单管器件的快慢轴方向发光尺寸不对称以及发散角相差较大,不利于光束传输,需要对光束快慢轴方向分别进行准直。

为了避免GaN基芯片氧化,蓝光LD单管器件

表1 蓝光LD单管器件的主要参数

Tab. 1 The main parameters of blue LD single tube device

中心波长/ nm	输出功率/ W	驱动电流/ A	电光转化 效率/%	快轴发散 角/(°)	慢轴发散 角/(°)	快轴发光 尺寸/μm	慢轴发光 尺寸/μm	腔长/ mm
445±5	5.20	3	42	50	9	1	45	1.2

采用TO封装结构,在内部充有惰性保护气体,通过高透光性窗口镜输出^[17]。受TO封装结构影响,蓝光LD芯片出光位置距离窗口出光面的距离为1.0 mm,因此必须采用后工作距大于1.0 mm的准直透镜进行准直。在此选用后工作距为1.1 mm、焦距为1.7 mm的非球面柱面镜作为快轴准直镜(FAC)对快轴方向进行准直,并设计焦距为18 mm的柱透镜对慢轴方向进行准直。经过快慢轴准直后,蓝光LD单管快慢轴发散角的理论值为0.59 mrad×2.5 mrad,光斑尺寸为1.59 mm×2.83 mm。但考虑到透镜像差及装调误差对快轴准直发散角影响较大,快轴准直后的发散角以1.5 mrad模拟,慢轴方向发散角和两轴的光斑尺寸影响较小,直接沿用理论值,采用Zemax软件模拟,结果如图1所示。

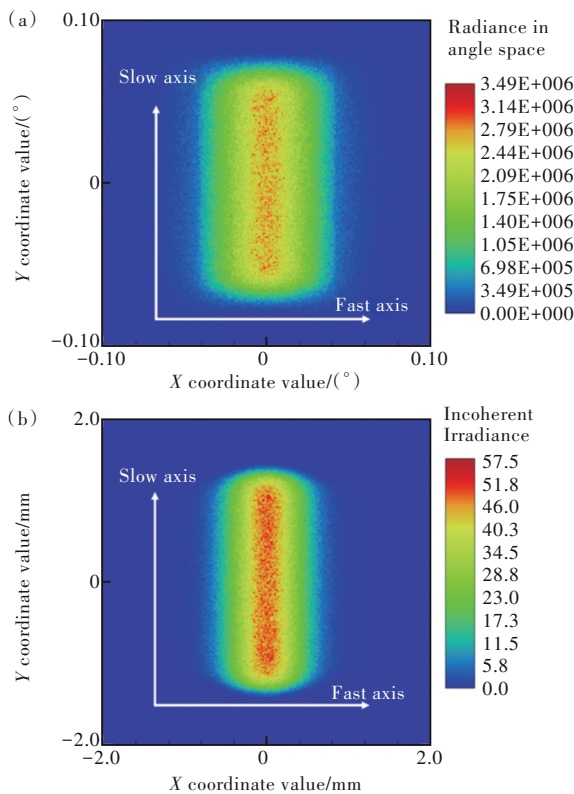


图1 蓝光LD单管器件准直后的发散角(a)和光斑尺寸(b)
Fig.1 Divergence angle (a) and spot size (b) after collimation of a blue LD single emitter

2.2 半导体激光器集成技术

由于蓝光LD单管器件的输出功率为瓦级,为了实现高功率输出,需要采用空间合束技术进行高密度集成及合束。图2展示了空间合束的基本原理,其过程是将多个蓝光LD单管二维空间排列,使各单管器件输出光束在指定方向上进行

叠加,并综合考虑功率损耗和光束质量恶化情况,选择合适的空间间隔,以获得高功率的合束激光。

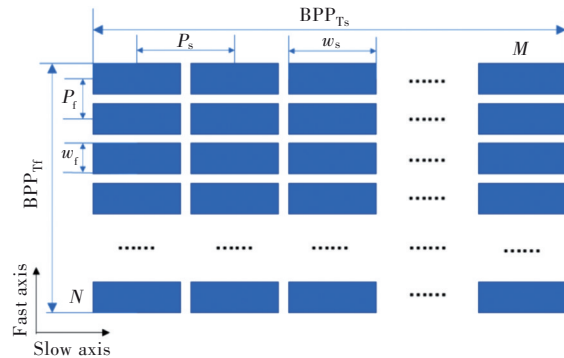


图2 快慢轴方向空间合束示意图

Fig.2 Schematic diagram of space combining at the direction of fast and slow axes

激光光束质量是评价合束系统的重要指标,通常采用光参数积(BPP,公式中用 K 表示)来评价,即输出光束束腰半径 $w_0/2$ 与远场发散半角 $\theta_0/2$ 的乘积^[18]。将多个蓝光LD单管器件二维空间排列,如图2所示,则快慢轴方向的光参量积 BPP_{Tf} 和 BPP_{Ts} 分别表示为^[19]

$$K_{Tf} = [(N - 1) \times P_f + w_f] \times \frac{\theta_f}{4}, \quad (1)$$

$$K_{Ts} = [(M - 1) \times P_s + w_s] \times \frac{\theta_s}{4}, \quad (2)$$

其中, N 为快轴方向排列的激光单元数量, P_f 为快轴方向发光单元间的空间间隔, w_f 为快轴方向的光斑尺寸, θ_f 为快轴方向的发散角, M 为慢轴方向排列的激光单元数量, P_s 为慢轴方向发光单元间的空间间隔, w_s 为慢轴方向的光斑尺寸, θ_s 为慢轴方向的发散角。

为了实现高功率的蓝色激光输出,结合功率裕度及模块化设计要求,该激光加工光源采用共计144个蓝光LD单管器件合束实现,其中每8个LD单元封装组成1个模块,共计18个蓝光模块。单个蓝光模块结构如图3所示,集成封装8个蓝光LD单管器件,在空间上形成“2×4”组合。每个单管器件各自经过快慢轴准直,再通过各自的小反射镜在慢轴方向进行空间合束。小反射镜可以调整光斑位置和光轴指向,减小单元间的遮光,同时实现同轴输出。考虑到功率损耗和装调误差影响,在慢轴方向叠加4层,设计空间间隔 P_s 为3 mm。图3(b)为Zemax模拟单个蓝光模块输出光场分布,由于光程较短,每个单元光斑尺寸与快慢

轴准直后的光斑尺寸基本一致;在快轴方向拼接2层,受封装散热影响,快轴方向空间间隔为11 mm,未进行空间叠加。最终单个蓝光模块叠加形成两组1.6 mm×12 mm的光斑,发散角与单元保持一致,仍为1.5 mrad×2.5 mrad。

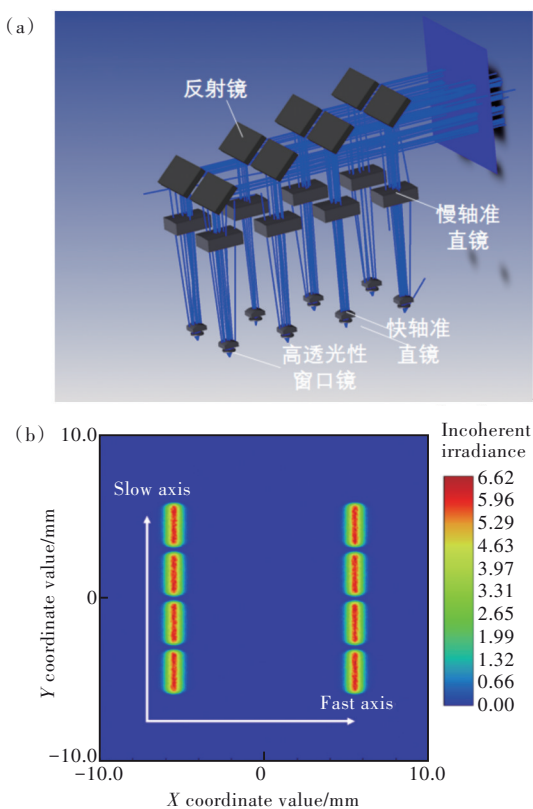


图3 (a)蓝光模块空间合束模拟结构视图;(b)蓝光模块空间合束后的光场分布。

Fig.3 (a) Structure diagram of space combining simulation for blue laser diode module. (b) Spatial beam combination of space combination for blue semiconductor laser module.

为了提高输出功率,同时实现光纤耦合的光束质量均衡,通过空间合束技术进一步增加合束光源的两轴方向的光斑尺寸。在快轴方向上叠加6组蓝光模块,慢轴方向叠加1.5组蓝光模块,并通过反射镜空间合束减小死区,实现“12×6”共计72个单管二维空间合束,其叠加后的光场分布如图4所示。叠加后的快慢轴方向光斑尺寸为19.2 mm×18 mm,不考虑装调误差,快慢轴方向发散角为1.5 mrad×2.5 mrad,则两方向的光参量为7.2 mm·mrad×11.3 mm·mrad。

采用偏振合束技术进一步提高蓝光光源的功率^[20],实现上述模拟的两组空间合束激光模块的光场分布在空间上完全重合,在不改变光束质量

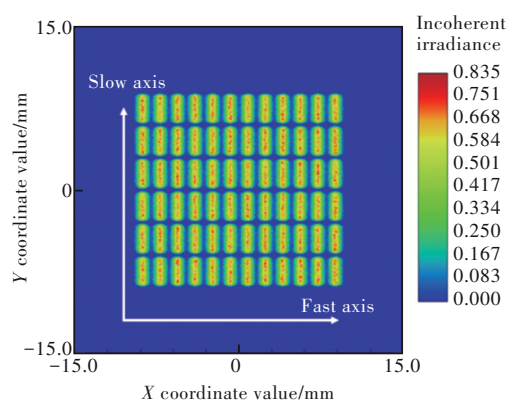


图4 72个蓝光LD单管器件空间合束后的光场分布
Fig.4 Spatial beam combination of space combination for 72 blue laser diodes

的条件下,将激光功率提高一倍,如图5所示。偏振合束后,快慢轴方向的光斑和发散角不变,光斑尺寸19.2 mm×18 mm,发散角为1.5 mrad×2.5 mrad。

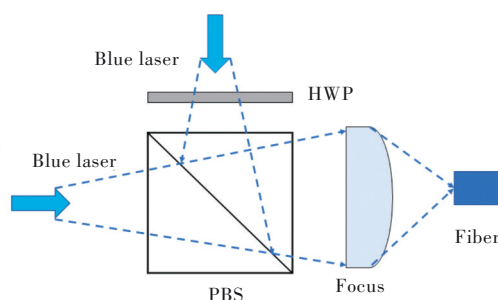


图5 偏振合束及光纤耦合示意图(HWP:半波片;PBS:偏振分光棱镜)

Fig.5 Sketch of the polarization combination and fiber coupling(HWP: half-wave plate;PBS: polarization beam splitter)

2.3 耦合系统设计

光参数积BPP越小,激光光束质量越好。相应的光纤BPP_{fiber}由纤芯半径r与其数值孔径(NA)相乘得到。为了将激光束高效率耦合到预定的光纤中,应满足以下要求^[21]:

$$\theta_{\text{focus}} = \sqrt{\theta_{\text{fl}}^2 + \theta_{\text{s1}}^2} \leq 2\arcsin(\text{NA}), \quad (3)$$

$$w_{\text{focus}} = \sqrt{w_{\text{fl}}^2 + w_{\text{s1}}^2} \leq 2r, \quad (4)$$

$$K_{\text{focus}} = \frac{w_{\text{focus}}}{2} \times \frac{\theta_{\text{focus}}}{2} \leq K_{\text{fiber}} = r \times \arcsin(\text{NA}), \quad (5)$$

其中, θ_{fl} 为聚焦后快轴方向的分散角, θ_{s1} 为聚焦后慢轴方向的分散角, θ_{focus} 为光束聚焦后远场发散全角, w_{fl} 为聚焦后快轴方向的光斑尺寸, w_{s1} 为聚焦后慢轴方向的光斑尺寸, w_{focus} 为聚焦后光斑直径大小, K_{focus} 为聚焦后的光参数积。

为了保证光纤耦合时具备高光纤耦合效率,采用焦距为 65 mm、口径为 35 mm 的聚焦镜进行聚焦耦合,经过公式(3)、(4)计算,确定聚焦后的光斑尺寸为 192 μm ,聚焦后的 NA 为 0.2,聚焦后激光束的光参数积为 19.2 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,如图 6 所示。选用的光纤参数为芯径 200 μm ,NA 0.22,其光参量积为 22 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,分别大于聚焦后激光束的光斑直径、NA 和光参数积,理论上可以耦合进该光纤。然而,实际耦合过程中,由于装调误差及指向偏离影响,将导致光纤耦合损耗。

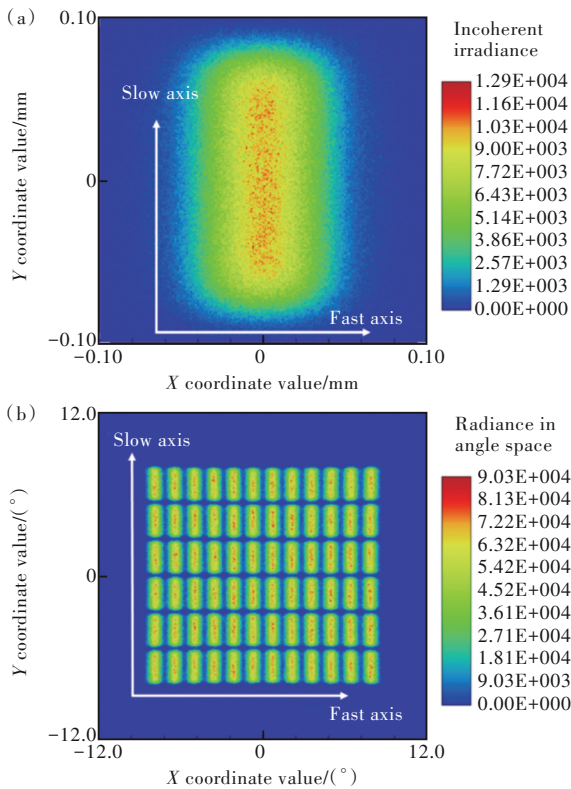


图 6 经过聚焦后光纤端面的光场(a)和发散角分布(b)
Fig.6 Optical field distribution(a) and divergence angle(b) of optical fiber end face

3 结果与讨论

在蓝光光源制备过程中,首先对蓝光 LD 单管器件进行准直,保证准直后的发散角接近模拟的理论值。准直装调误差对准直后发散角的大小影响极高,需要考虑快慢轴准直镜的位置误差 Δx 、 Δy 和 Δz ,角度误差 $\Delta\phi_x$ 、 $\Delta\phi_y$ 和 $\Delta\phi_z$ 6 个自由度^[22]。经过精密装调,准直后蓝光 LD 单管器件快慢轴发散角为 1.75 $\text{mrad}\times 2.52 \text{mrad}$,如图 7(a)所示。从图 7(b)可以看出,在大通道水冷制冷为 25 $^{\circ}\text{C}$ 下,驱动电流为 3 A,准直后的蓝光 LD 单管器输出功率达到 5.02 W,并未完全饱和,电光转

换效率达到 38% 以上。

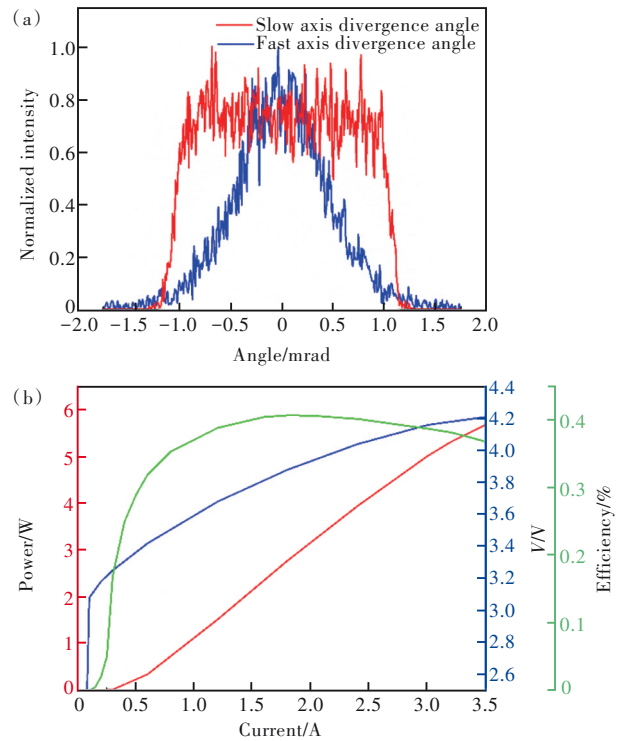


图 7 实际测试时,准直后的蓝光 LD 单管器件的发散角(a)和 P - I - V 曲线(b)。

Fig.7 Measured divergence angle(a) and P - I - V curve(b) of a blue LD emitter after beam collimation

实验采用了 18 个蓝光模块、共 144 个 LD 单管器件,通过光束整形、空间合束及偏振合束技术,将高功率蓝光激光束耦合进芯径 200 μm /NA 0.22 的光纤中,研制蓝光加工光源,如图 8 所示。

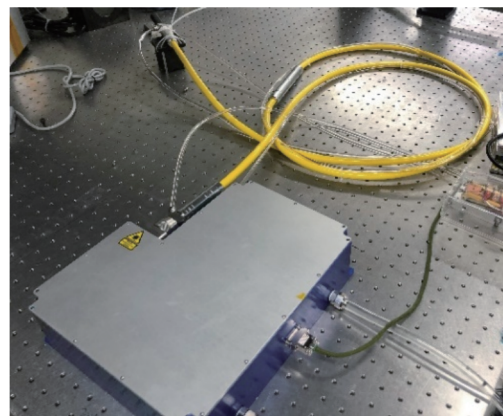


图 8 高功率蓝光激光加工光源
Fig.8 High power blue diode laser processing source

在大通道水冷制冷为 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,3 A 电流驱动时,光纤耦合输出功率为 523 W,功率曲线仍未出现饱和,电光效率为 29%,如图 9(a)所示,光光转换效率为 70%。经过分析,功率损失主要

来源于:(1)光学面损耗,由于涉及分别准直、二维空间合束、偏振合束、光纤耦合及光纤传输过程等,经过大量光学元件,以单面透过率99.2%、反射率99.5%考虑,对应损耗达到10.5%;(2)二维空间合束损耗,由于涉及到快轴和慢轴两个方向的合束,有效口径内的功率比例为95%,超出的部分被直接损耗掉,且部分光束的指向性出现偏差,损耗更大,该部分损耗为8%;(3)偏振合束损耗,蓝光LD单元输出光束并非完全线偏振光,且偏振合束本身存在一定损耗,该部分损耗为3%;(4)光

纤耦合损耗,首先单管器件准直后发散角相对于设计值偏大,且144个单管在合束过程中的指向不一性也导致整体发散角偏大,因此经过聚焦后实际光斑尺寸大于 $200\ \mu\text{m}$,超出芯径外光束直接被损耗掉,该部分损耗为6%;(5)光纤传输损耗,虽然采用高羟基蓝光传输光纤,所采用的光纤长度为5 m,每米损耗仍有约0.5%,光纤传输整体损耗2.5%。图9(b)为合束输出光谱,峰值波长为450.2 nm,光谱线宽(FWHM)为4.8 nm,与蓝光LD单管器件的输出光谱特性近似一致。

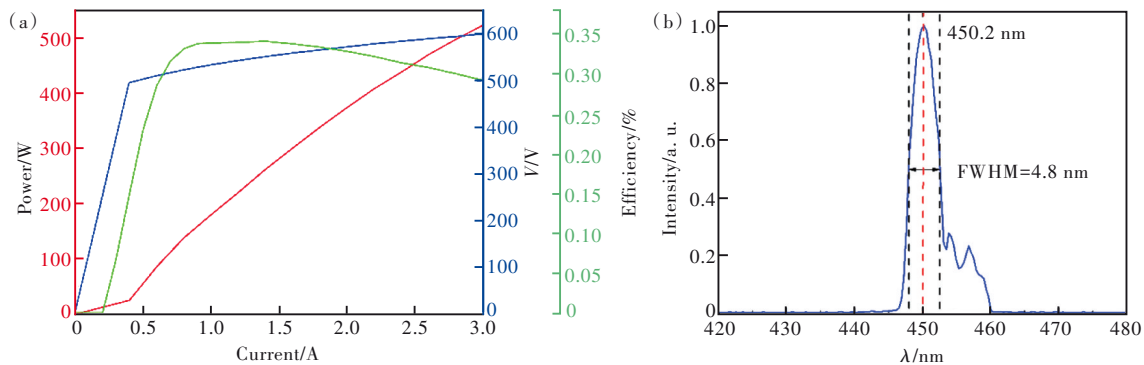


图9 高功率蓝光激光加工光源 P - I - V 曲线(a)和光谱(b)

Fig.9 The P - I - V curve(a) and spectra(b) of high power blue diode laser processing source

4 结 论

本文基于出光窗口为平面镜的TO封装蓝光半导体激光单管器件,采用长后工作距的快慢轴准直镜对快轴和慢轴方向分别准直,获得低发散角、高光束质量的单元准直光,结合二维空间合束、偏振合束和光纤耦合,将144个蓝光LD单管器件耦合进 $200\ \mu\text{m}$ 光纤中。在大通道水冷条件下,3 A电流驱动时,从 $200\ \mu\text{m}/\text{NA}$

0.22 光纤输出523 W的连续输出功率,电光转换效率近30%,可满足贵金属激光加工应用需求。总体看来,蓝光加工光源的输出功率偏低,后续工作中将对光源进行改进,以进一步提高功率水平。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230144>.

参 考 文 献:

- [1] 陈君,张群莉,姚建华,等. 金属材料的激光吸收率研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 793-798.
CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* Study on laser absorptivity of metal material [J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, 29(5): 793-798. (in Chinese)
- [2] 张俊,彭航宇,刘云,等. 适用于金属薄板焊接的柔性光纤耦合半导体激光加工光源[J]. 发光学报, 2012, 33(8): 895-900.
ZHANG J, PENG H Y, LIU Y, *et al.* Fiber-coupled diode laser flexible processing source for metal sheet welding [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(8): 895-900. (in Chinese)
- [3] 宁永强,王立军,陈泳屹,等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
NING Y Q, WANG L J, CHEN Y Y, *et al.* Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2021, 41(1): 0114001. (in Chinese)
- [4] ZHU H B, FU X H, FAN S L, *et al.* The conversion from a Gaussian-like beam to a flat-top beam in the laser hardening

- processing using a fiber coupled diode laser source [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 125: 106028-1-5.
- [5] NEUKUM J, HORN W. Diode laser systems for industrial metal processing [J]. *Laser Tech. J.*, 2017, 14(1): 40-42.
- [6] FUJIO S, SATO Y, TAKENAKA K, *et al.* Welding of pure copper wires using a hybrid laser system with a blue diode laser and a single-mode fiber laser [J]. *J. Laser Appl.*, 2021, 33(4): 042056-1-6.
- [7] BAUMANN M, BALCK A, MALCHUS J, *et al.* 1 000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm [C]. *Proceedings of the SPIE 10900, High-Power Diode Laser Technology, San Francisco, USA*, 2019: 1090005.
- [8] BRITTEN S, KRAUSE V. Industrial blue diode laser breaks 1 kW barrier [J]. *Photonics Views*, 2019, 16(2): 30-33.
- [9] WATSON S, GWYN S, VIOLA S, *et al.* InGaN/GaN laser diodes and their applications [C]. *Proceedings of the 20th International Conference on Transparent Optical Networks, Bucharest, Romania*, 2018: 1-4.
- [10] DAS A. Recent developments in semipolar InGaN laser diodes [J]. *Semiconductors*, 2021, 55(2): 272-282.
- [11] SAIGAWA J. Development of a blue direct diode laser [J]. *J. Japan Laser Proc. Soc.*, 2014, 21: 213-215.
- [12] UNGER A, KÖHLER B, BIESENBACH J. High-power visible spectrum diode lasers for display and medical applications: beam sources with tailored beam quality and spectral characteristics [C]. *Proceedings of SPIE 8965, High-Power Diode Laser Technology and Applications XII, San Francisco, USA*, 2014: 896513.
- [13] BAUMANN M, ACKERMANN M, BALCK A, *et al.* 4XX nm diode-laser beyond 2 kW of output power [C]. *Proceedings of SPIE 11983, High-power Diode Laser Technology XX, San Francisco, USA*, 2022: 1198300.
- [14] SA M S, FINUF M, FRITZ R, *et al.* Blue laser diode (450 nm) systems for welding copper [C]. *Proceedings of the SPIE 10514, High-power Diode Laser Technology, San Francisco, USA*, 2018: 1051407.
- [15] NOWAK M, WIŚNIEWSKI D, BUCHOWSKI J, *et al.* Robot laser welding system LAPRISS(Laser Processing Robot Integrated System Solution) from Panasonic [J]. *Weld. Technol. Rev.*, 2017, 89(10): 83.
- [16] MICHIEUE A, MIYOSHI T, KOZAKI T, *et al.* High-power pure blue InGaN laser diodes [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2009, E92C(2): 194-197.
- [17] MASUI S, NAKATSU Y, KASAHARA D, *et al.* Recent improvement in nitride lasers [C]. *Proceedings of the SPIE 10104, Gallium Nitride Materials and Devices, San Francisco, USA*, 2017: 101041H.
- [18] 张俊, 彭航宇, 朱洪波, 等. 用于不锈钢薄板切割的直接半导体激光光源 [J]. *发光学报*, 2015, 36(10): 1188-1194.
ZHANG J, PENG H Y, ZHU H B, *et al.* Direct diode laser source for stainless sheet cutting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(10): 1188-1194. (in Chinese)
- [19] BACHMANN F, LOOSEN P, POPRAWE R. *High Power Diode Lasers: Technology and Applications* [M]. New York: Springer, 2007.
- [20] 朱洪波, 张全胜, 秦莉, 等. 10 kW 连续输出半导体激光熔覆光源 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 829-834.
ZHU H B, ZHANG J S, QIN L, *et al.* 10 kW diode laser cladding sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 829-834. (in Chinese)
- [21] WANG Z L, DROVS S, SEGREF A, *et al.* Fiber coupled diode laser beam parameter product calculation and rules for optimized design [C]. *Proceedings of the SPIE 7918, High-power Diode Laser Technology and Applications IX, San Francisco, USA*, 2011: 791809.
- [22] 张志军, 刘云, 缪国庆, 等. 2 kW 半导体激光加工光源 [J]. *发光学报*, 2013, 34(3): 334-339.
ZHANG Z J, LIU Y, MIAO G Q, *et al.* The 2 kW semiconductor laser processing light [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(3): 334-339. (in Chinese)



张继业(1990-),男,辽宁丹东人,博士,特别研究助理,2021年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事先进激光技术及应用的研究。

E-mail: zhangjiye@ciomp.ac.cn



彭航宇(1983-),男,浙江黄岩人,博士,研究员,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事先进激光技术及应用的研究。

E-mail: penghy@ciomp.ac.cn