

DOI: 10.12086/oe.2021.200372

高亮度蓝光半导体激光器光纤耦合技术

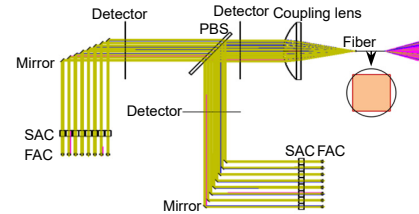
段程芮^{1,2}, 赵鹏飞², 王旭葆^{1*}, 林学春^{2*}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083

摘要: 随着蓝光半导体激光器的发展和应用范围的拓宽, 利用合束技术来获得高亮度的蓝光光源已经成为研究的热点。为了获取高亮度的蓝光输出, 本文应用光学设计软件进行模拟仿真, 将 48 只波长为 450 nm、输出功率为 3.5 W 的单管半导体激光器通过快慢轴准直和空间合束, 聚焦耦合进 105 $\mu\text{m}/0.22\text{NA}$ 的光纤中, 可获得功率为 144.7 W、亮度为 11 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str})$ 的蓝光输出, 耦合效率为 93.78%, 整体系统的光-光转换效率为 86.13%。

关键词: 蓝光; 高亮度; 光纤耦合; 合束技术

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A



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(5): 200372

Duan C R, Zhao P F, Wang X B, *et al.* Fiber coupling technology of high brightness blue laser diode[J]. *Opto-Electron Eng.*, 2021, 48(5): 200372

Fiber coupling technology of high brightness blue laser diode

Duan Chengrui^{1,2}, Zhao Pengfei², Wang Xubao^{1*}, Lin Xuechun^{2*}¹Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;²Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract: With the development and application of blue semiconductor lasers, it has become a research hotspot to obtain high brightness blue light source by beam combining technology. In order to obtain high brightness blue light output, 48 single tube semiconductor lasers with wavelength of 450 nm and output power of 3.5 W are focused and coupled into 105 $\mu\text{m}/0.22\text{NA}$ fiber by fast slow axis collimation and spatial beam combination. The blue light with power of 144.7 W and brightness of 11 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str})$ is obtained. The coupling efficiency is 93.78%, and the optical to optical conversion efficiency of the whole system is 86.13%.

Keywords: blue light; high brightness; fiber coupling; beam combining technology

收稿日期: 2020-10-16; 收到修改稿日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发基金资助项目(2017YFB0405001)

作者简介: 段程芮(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率固体激光技术与系统方面的研究。E-mail: 18434360715@163.com

通信作者: 王旭葆(1972-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事半导体激光器及固体激光器方面的研究。

E-mail: wangxubao@bjut.edu.cn

林学春(1978-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率全固态激光器及其应用技术的研究。

E-mail: xclin@semi.ac.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

1 引言

半导体激光器(LD)具有体积小、效率高、结构简单、寿命长和易于调制等优点,被广泛应用于光纤通信、工业加工、医疗诊断、环境监测以及军事国防等领域^[1],也是固体激光器和光纤放大器中不可或缺的泵浦光源^[2-4]。其中蓝光 LD 因其波长短不仅在数据存储、彩色显示等方面获得重要应用^[5-6],在材料加工方面也具有巨大的潜力。铜基合金材料是工业领域常见的金属材料,广泛用于各种导电、制冷设备中,激光加工技术相对成熟,但因其在近红外激光波段的吸收率低,导致激光加工效率低、质量差,往往需要二次处理^[7-8]。由于铜基合金材料对蓝光吸收率是近红外光的 5~12 倍^[9],因此欧美等发达国家提出直接应用蓝光激光代替近红外激光加工铜基合金材料,加工效率和质量均可获得大幅度的提升^[10-11]。近年来蓝光 LD 的发展迅速,商用单发光点的功率提升到了 5 W^[12],但还远远达不到直接应用的要求,因此必须采用光束合束技术来进一步提高输出功率。

蓝光 LD 输出的光特性类似于近红外 LD,因此其合束可以套用成熟的近红外半导体激光器的合束方法,常见为空间合束、偏振合束和波谱合束。空间合束不论光束如何排布最终需要合成为肩并肩的一维或者二维光束阵列,输出功率随合束单元的数量增加而线性增长,缺点是光束质量随合束单元的数量增加而变差^[13-15]。后两种方法则可保持光束质量不变而提高输出功率,偏振合束的缺点是功率仅能翻倍一次^[16-17],而波谱合束可将空间和偏振合束实现的不同波长的输出通过二向色元件再次叠加,原则上(不考虑损耗)使用几次输出功率会翻几倍^[18-20],因此,空间、偏振合束是光束合成的基本方法,应用它们实现的亮度会决定激光系统最终的输出亮度。在空间合束时,需要依据光束质量与光纤参数的匹配条件来确定组合光束的空间排列,对 LD 合束后的矩形光束而言,首先要满足光斑对角线方向的光纤耦合条件,这会限制合束光在快轴和慢轴方向的尺寸,进而导致聚焦进入光纤时快慢轴方向的发散角不能填满整个光纤的数值孔径,角度填充系数不高于圆形光束光纤耦合时的 64%^[21-23],不能充分利用光纤的数值孔径。如能在现有方法的基础上提高矩形光束光纤耦合时的角度填充系数,必然可以进一步增加 LD 数量从而提升光纤输出的功率和亮度^[24]。目前代表光纤输出蓝光 LD 合成的最高水平是美国的 NUBURU 公司,对 VBG 锁波 LD

在空间和偏振合束的基础上进行波谱合束,实现了 100 μm 光纤输出 1500 W 的蓝光激光器^[25-26]。国内锐科、凯普林等也在官网上公布了 500 W、400 μm 光纤输出产品,但在亮度方面还远落后于国外,因此如何获得高功率高亮度的蓝光输出,仍是当前的研究重点。

本文通过对多发光单元合束及其光纤耦合进行理论分析,获得不必完全满足光纤耦合条件的蓝光 LD 快慢轴组合的最优解,与满足全部光纤耦合条件的一般情况比较,提高了合束光束聚焦进入光纤时的角度填充系数,在耦合损耗增加量小于 1% 的条件下,光纤耦合输出的功率和亮度提高了近三分之一。

2 激光的光束质量和亮度

光束质量是描述激光束空间特性的重要参量,在 LD 光纤耦合时,采用光束参数积 (beam parameter product, BPP) 描述 LD 的光束质量更为方便^[27]。BPP 定义为光斑的束腰半径与光束远场发散半角的乘积,其单位为毫米乘以毫弧度 (mm·mrad),如下所示:

$$BPP = \frac{D}{2} \times \theta, \quad (1)$$

其中: D 为光斑直径, θ 为远场光束发散半角。激光光束在通过理想无像差光学系统时, BPP 值通常保持不变。且 BPP 的值越小,表明光束质量越好。

另一个反映激光光束空间特征的参数是亮度^[28],它也是激光加工过程中的一个重要指标,定义为单位发光面积在单位立体角内的发光功率,表达式:

$$B = \frac{P}{\Delta S \cdot \Delta \Omega}, \quad (2)$$

其中: B 为激光光束的亮度, P 为激光光束的功率, ΔS 为激光光束的发光面积, $\Delta \Omega$ 为激光光束的发光立体角。亮度和 BPP 之间的关系:

$$B = \frac{P}{\pi^2 BPP^2} = \frac{4P}{\pi^2 D^2 \theta^2}. \quad (3)$$

式(3)表明,亮度 B 与光参数积 BPP 成反比,激光光束的束宽和发散角越小,则 BPP 值越小,光束质量越好,亮度也越高。

3 Zemax 仿真模拟

3.1 蓝光 LD 输出光束的特性

单管 LD 输出的光场分布是由 PN 结平面波导特性决定的,PN 结在快轴方向(垂直于 PN 结)的厚度一般约 1 μm ,光束衍射明显导致发散角较大(30°~60°),在慢轴方向(平行于 PN 结)的厚度一般在 15 μm ~200

μm, 光束衍射不明显, 发散角较小(10°~20°)^[29]。表 1 列出了本文所用的蓝光 LD 管的主要参数。

表 1 蓝光 LD 的主要参数
Table 1 The main parameters of blue LDs

Parameter	Symbol	Type
Center wavelength/nm	λ_d	450
Half angle divergence of fast axis/(°)	θ_{fast}	22.5
Half divergence angle of slow axis/(°)	θ_{slow}	7
Light-emitting size of fast axis/μm	D_{fast}	1
Light-emitting size of slow axis/μm	D_{slow}	30
Output power/W	P	3.5

根据表 1 和式(1), 蓝光 LD 在快轴方向的 BPP 为 0.196 mm·mrad, 在慢轴方向的 BPP 为 1.833 mm·mrad。采用 Zemax 可作出蓝光 LD 的远场发散特性, 图 1(a) 给出蓝光 LD 快慢轴的远场发散角, 图 1(b) 给出了距离 LD 发光面 1 mm 和 100 mm 处的光斑。由图 1 可知, 蓝光 LD 有很大的发散特性, 在光纤耦合前需要对 LD 的快慢轴进行准直处理。

3.2 蓝光 LD 的快慢轴准直

由图 1 可知, 蓝光 LD 在快轴方向的分散角远大于慢轴方向, 是典型的像散光束。为了提高 LD 与光

纤的耦合效率, 需对快慢轴分别进行准直。考虑到 TO 封装的 LD 带有出光窗口, 其表面距离 LD 发光面约 1 mm, 因此, FAC 的物方截距要大于 1 mm, 可在 Zemax 中设计有效焦距为 1.65 mm 的非球面柱透镜作为 LD 的快轴准直镜(FAC), 此时物方截距约 1.2 mm。图 2 为 Zemax 序列模式下 FAC 准直蓝光 LD 快轴光束的光路图。准直后光斑半径为 0.75 mm, 发散半角为 0.043° 对应的光参数积为 0.563 mm·mrad。

设计慢轴准直透镜(SAC)为一个有效焦距为 16 mm 的非球面柱透镜, 图 3 为 Zemax 序列模式下对 LD 慢轴进行准直的光路图。SAC 准直后慢轴方向的光斑半径为 2 mm, 发散半角为 0.06°, 对应的光参数积为 2.09 mm·mrad。

在 Zemax 序列模式下完成蓝光 LD 快慢轴准直透镜的设计后, 在非序列模式下进行光线追迹, 可获得如图 4 所示的光斑图。

3.3 受光纤耦合条件限制的 LD 合束

芯径直径 $D_{fiber}=105 \mu\text{m}$ 、数值孔径 $NA=0.22$ 的光纤对应的光参数积可以表示为

$$BPP_{fiber} = \frac{D_{fiber}}{2} \times NA = 0.0525 \times 0.22 = 11.55, \quad (4)$$

式中: D_{fiber} 为光纤芯径, NA 为光纤的数值孔径, 可

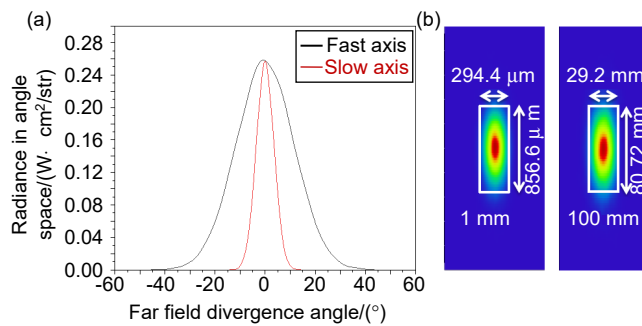


图 1 蓝光 LD 的远场输出特性。

(a) 快慢轴远场发散角; (b) 近远场光斑图

Fig. 1 The far field output characteristics of blue LD.

(a) The far field divergence angle of fast and slow axis;
(b) The spot diagram of near and far field

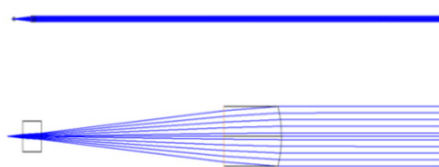


图 3 慢轴准直光路图

Fig. 3 The light path diagram of slow axis collimation

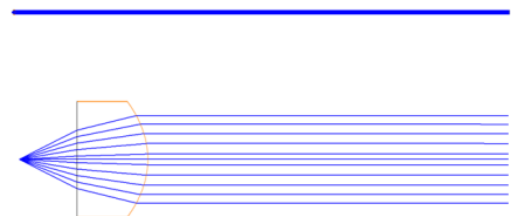


图 2 快轴准直光路图

Fig. 2 The light path diagram of fast axis collimation

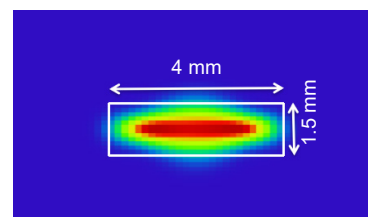


图 4 准直后光斑图

Fig. 4 The spot diagram after collimation

以表示为

$$NA = \sin\theta_{f\max} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

式中: $\theta_{f\max}$ 为光纤的最大接收角, n_0 为空气的折射率, n_1 为纤芯的折射率, n_2 为包层的折射率。因此, 多个 LD 光束合束后耦合进光纤, 需要满足以下关系^[30]:

1) 光斑的直径不大于光纤的芯径:

$$\sqrt{D_{\text{fast}}^2 + D_{\text{slow}}^2} \leq D_{\text{fiber}}; \quad (6)$$

2) 光斑的发散角不大于光纤的最大接收角:

$$\sqrt{\theta_{\text{fast}}^2 + \theta_{\text{slow}}^2} \leq \theta_{f\max}; \quad (7)$$

3) 快慢轴的光参数积均小于光纤的光参数积:

$$BPP_{\text{fast}} + BPP_{\text{slow}} \leq BPP_{\text{fiber}}, \quad (8)$$

$$BPP_{\text{fast}} \leq \frac{BPP_{\text{fiber}}}{\sqrt{2}}, \quad (9)$$

$$BPP_{\text{slow}} \leq \frac{BPP_{\text{fiber}}}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

以上耦合条件表明, 多个 LD 光束合成后的快慢轴光参数积需相近, 避免差别太大。

现将准直前后快慢轴的光束参数整理如表 2 所示。由表 2 可知, 蓝光 LD 在快慢轴准直后的光参数积分别为 0.563 mm·mrad 和 2.09 mm·mrad, 代入式(9)和(10)可以判断耦合进光纤的 LD 数量。假设快轴方向上可以容纳 m 个 LD, 经过空间合束后每个发光单元之间的间距约为 0.4 mm, 则快轴方向的光斑直径为

(1.9m-0.4) mm; 慢轴方向上可以容纳 n 个 LD 单管, 空间合束后每个发光单元之间的间距约为 0.5 mm, 则慢轴方向的光斑直径为(4.5n-0.5) mm。由此可以得出 m 和 n 满足的关系式:

$$\frac{1.9m-0.4}{2} \times 0.75 \leq \frac{11.55}{\sqrt{2}}, \quad (11)$$

$$\frac{4.5n-0.5}{2} \times 1.047 \leq \frac{11.55}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

由以上两式可以得出: $m \leq 11.67$, $n \leq 3.58$ 。因 m 、 n 均为正整数, 所以 m 最大可取 11, n 最大可取 3, 即快轴方向上最多可以排列 11 个 LD, 慢轴方向上最多可以排列 3 个 LD。此结果仅满足了光参数积的匹配条件式(8)~式(10), 如果同时考虑聚焦匹配条件式(6)和式(7), 则 m 和 n 的数值还要进一步减小, 因为涉及聚焦透镜焦距, 将在 3.4 节进一步讨论 m 和 n 的取值范围。空间合束的原理如图 5 所示, 反射镜(mirror)的作用是减小光束之间的“暗区”, 使光斑紧密排列提高光束质量。为了进一步地提高输出功率而不改变光束质量, 可利用偏振合束将两组不同偏振态的光束合成输出。由于蓝光 LD 是 P 偏振光, 为得到两组不同偏振态的光束, 可利用 $\lambda/2$ 波片将光束的偏振方向旋转 90°, 将 P 偏振光变为 S 偏振光, 再通过 PBS(偏振合束器)实现偏振合束。在 Zemax 软件模拟中, 可通过设置光源的偏振特性来代替 $\lambda/2$ 波片, 偏振合束的原理如图 6 所示。

表 2 准直前后快慢轴的光束参数

Table 2 The beam parameters of fast and slow axis before and after collimation

	D/mm	θ /mrad	BPP/(mm·mrad)
Before fast axis collimation	0.001	392.699	0.196
After fast axis collimation	1.5	0.75	0.563
Before slow axis collimation	0.03	122.173	1.833
After slow axis collimation	4	1.047	2.09

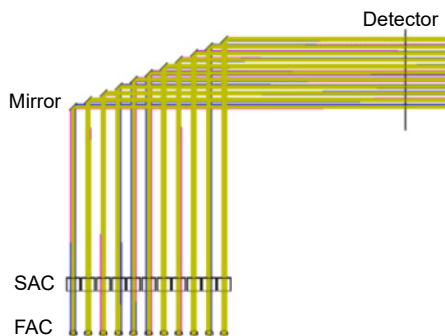


图 5 空间合束原理图

Fig. 5 The schematic diagram of spatial beam combination

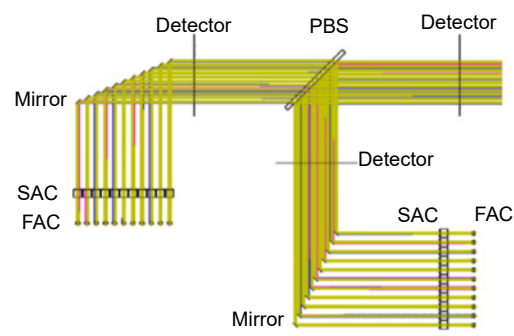


图 6 偏振合束原理图

Fig. 6 The schematic diagram of polarization beam combination

3.4 光束聚焦及光纤耦合

偏振合束后的光束近似为一束矩形平行光, 需要通过透镜聚焦才能耦合进入 105 μm/0.22NA 的光纤。首先要确定聚焦透镜的焦距, 根据光纤耦合条件, 聚焦后光斑的尺寸不大于光纤的芯径, 发散角不大于光纤的数值孔径, 可列出式(13)~式(16):

$$f \times \sqrt{\theta_{fast}^2 + \theta_{slow}^2} \leq \frac{D_{fiber}}{2}, \quad (13)$$

$$\frac{D_{fast}}{2f} \leq NA, \quad (14)$$

$$\frac{D_{slow}}{2f} \leq NA, \quad (15)$$

$$\sqrt{\left(\frac{D_{fast}}{2f}\right)^2 + \left(\frac{D_{slow}}{2f}\right)^2} \leq NA. \quad (16)$$

由式(13)可以确定透镜焦距的上限: $f \leq 40.76 \text{ mm}$ 。由式(14)~式(16)可知, f 越大聚焦后光斑的发散角越小。因此取 $f=40 \text{ mm}$, 可以得出聚焦后的光斑直径大小为 $103.03 \mu\text{m}$, 小于光纤的芯径。

由式(14)和(15)可分别得出快慢轴方向可以容纳的 LD 数目的范围为 $m \leq 9.47, n \leq 4$ 。结合 3.3 节得到的 $m \leq 11.67, n \leq 3.58$, m 和 n 可取 $m=9, n=3$ 。该结果是根据式(9)、式(10)、式(14)和式(15)计算获得的, 满足快轴和慢轴两个方向的光纤耦合条件, 但是并不满足式(16)所代表的对角线耦合条件, 如图 7(a)所示, 圆面积表示在光纤数值孔径范围内耦合透镜上的光斑, 矩形面积表示蓝光 LD 合束后在耦合透镜上的光斑, 此时光斑四个角在经过透镜聚焦进入光纤时的角度大于光纤的数值孔径。进一步计算发现, 当 $m=6, n=3$ 时, 式(16)得到满足, 此时矩形光束和光纤数值孔径二者的关系如图 7(b)所示, 光斑刚好全部落入纤芯内, 聚焦光束对光纤数值孔径的角度填充系数(定义为

图 7 所示的矩形面积与圆面积的比值)为 56.9%, 此时耦合效率最高。因矩形光斑的 4 个角所占的功率极小, 故以损耗四个角的功率为代价, 以提升光束进入光纤的角度填充系数, 进一步提高输出功率。因此在 $n=3$ 的条件下, 将 $m=6$ 时的耦合损耗作为参考值(即假设该点的损耗为 0), 比较 $m=7, 8, 9$ 时的输出功率和耦合损耗, 来选择最优 m 值, Zemax 软件模拟结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 取 $m=6$ 时的耦合效率 94.18% 作为无损参考值, 则 $m=7$ 的相对损耗为 0.27%, $m=8$ 的相对损耗为 0.42%, $m=9$ 的相对损耗为 3.38%, 在 $m=8$ 到 $m=9$ 的损耗发生突变, 增大近一个数量级。因此可选 8×3 的快慢轴光束组合作为最优解, 此时光束聚焦进入光纤的角度填充系数为 76.5%, 相比满足全部光纤耦合条件的 6×3 理想组合, 耦合损耗增加 0.42%, 输出功率提高 32.7%。

表 3 快轴单管数量变化时耦合输出参数对比

Table 3 The comparison of various parameters for the number of LDs in the fast axis

$m \times n$	The output power of optical fiber coupling/W	Coupling efficiency/%	Relative loss/%
6×3	108.97	94.18	0.00
7×3	126.83	93.93	0.27
8×3	144.7	93.78	0.42
9×3	157.91	91	3.38

3.5 仿真结果与讨论

根据以上计算设计光纤耦合蓝光 LD 模块光路, 如图 8 所示。

空间合束后的光斑如图 9 所示, 光斑尺寸为 $15 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$, 对应的功率为 76.179 W。为了提高输出

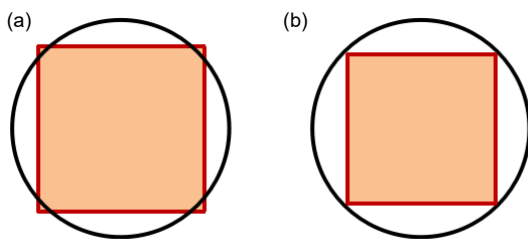


图 7 角度填充系数与耦合条件关系图。

(a) 不满足; (b) 满足

Fig. 7 The relationship between angle filling factor and coupling condition. (a) Not satisfied; (b) Satisfied

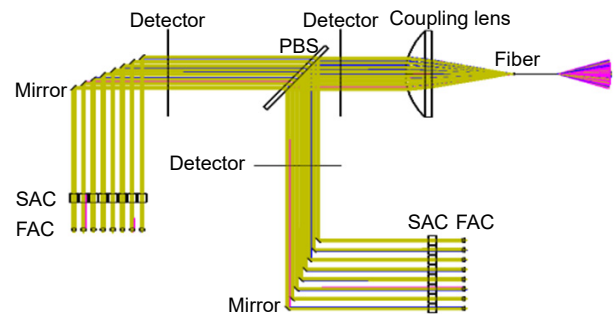


图 8 光纤耦合光路图

Fig. 8 The optical path diagram of fiber coupling

亮度采用偏振合束提升功率达到 154.81 W。偏振合束后的光斑类似图 9, 光斑尺寸仍为 15 mm×13 mm。此时合束光快慢轴的光参数积为

$$BPP_{fast} = \frac{D_{fast}}{2} \times \theta_{fast} = 7.5 \times 0.75 = 5.625, \quad (17)$$

$$BPP_{slow} = \frac{D_{slow}}{2} \times \theta_{slow} = 6.5 \times 1.047 = 6.81. \quad (18)$$

经过 $f=40$ mm 的透镜聚焦后的光斑如图 10 所示。聚焦后的光斑尺寸为 103.03 μm , 小于光纤芯径, 对应

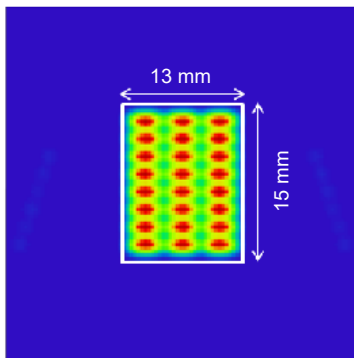


图 9 空间合束后光斑图

Fig. 9 The spot diagrams after space beam combination

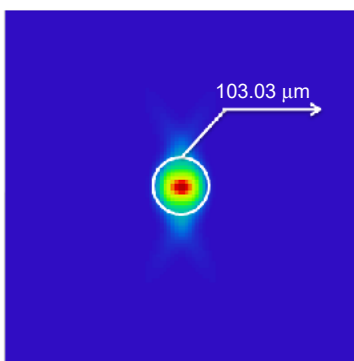


图 10 聚焦后光斑的大小

Fig. 10 The spot size after focusing

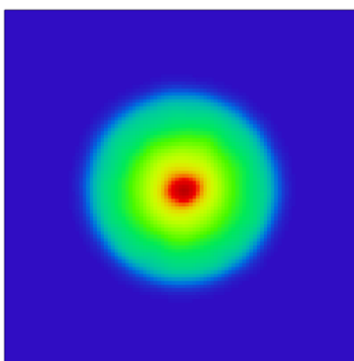


图 11 光纤光斑大小图

Fig. 11 The spot size diagram of optical fiber

的功率为 154.3 W, 光纤输出的光斑图如图 11 所示。

最终从芯径 105 μm 、数值孔径 0.22 的光纤获得 144.7 W 的输出功率, 对应的耦合效率 η_{cou} 为

$$\eta_{cou} = \frac{P_{fiber}}{P_{foc}} = \frac{144.7}{154.3} \times 100\% = 93.78\%, \quad (19)$$

其中: P_{fiber} 为光纤耦合输出的功率, P_{foc} 为耦合透镜聚焦到光纤端面的功率。该模块总的光-光转换效率 $\eta_{opt-opt}$ 为

$$\eta_{opt-opt} = \frac{P_{fiber}}{P_{total}} = \frac{144.7}{3.5 \times 48} \times 100\% = 86.13\%, \quad (20)$$

其中: P_{fiber} 为光纤输出的功率, P_{total} 为 48 只 3.5 W 蓝光 LD 输出的总功率。实际上, 文献[31-32]显示, 半导体激光器与光纤的总体耦合效率比理论计算值低, 一般在 70%~80%之间, 究其原因, 主要为光学镜片的加工误差、残余球差、机械调整误差所致。

光纤输出蓝光的亮度 B 由式(3)可得:

$$B = \frac{4P_{fiber}}{\pi^2 \times D^2 \times \theta^2} = \frac{4 \times 144.7}{\pi^2 \times 0.0105^2 \times 0.22^2} = 11, \quad (21)$$

其中: B 的单位为 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str})$, D 为光纤芯径, θ 为光纤的接收角。

4 结 论

本文采用 Zemax 软件设计了百微米光纤百瓦级输出的高亮度蓝光半导体激光器, 给出已知光纤耦合参数计算蓝光 LD 快慢轴组合最大数量的方法, 获得不必完全满足光纤耦合条件的蓝光 LD 快慢轴组合的最优解, 与满足全部光纤耦合条件的一般情况比较, 提高了合束光束聚焦进入光纤时的角度填充系数。仿真结果显示, 在给定光纤(105 $\mu\text{m}/0.22\text{NA}$)条件下, 8×3 的 LD 光束快慢轴最优组合比 6×3 的理想组合耦合损耗增加 0.42%, 输出功率提高 32.7%, 最终获得功率为 144.7 W、亮度为 11 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str})$ 的蓝光输出, 对应的耦合效率为 93.78%, 总光-光转换效率为 86.13%。本文方法可推广到任意波长 LD 的光纤耦合设计, 与一般设计方法比较[33-35], 可在轻微增加耦合损耗的条件下进一步提高输出功率, 为制作高亮度 LD 光纤耦合模块提供技术参考。

参考文献

- [1] Cao Y X, Shu S L, Sun F Y, et al. Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers(invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, 47(10): 1003002. 曹宇轩, 舒世立, 孙方圆, 等. 中红外半导体激光器合束技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1003002.
- [2] Li X H, Liu X M, Gong Y K, et al. A novel erbium/ytterbium

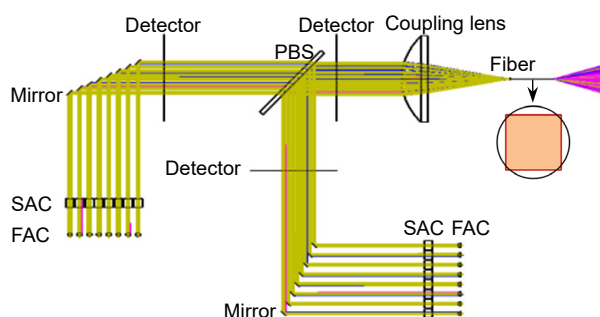
- co-doped distributed feedback fiber laser with single-polarization and unidirectional output[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, **7**(1): 55–59.
- [3] Li X H, Wang Y S, Zhao W, *et al.* All-fiber dissipative solitons evolution in a compact passively Yb-doped mode-locked fiber laser[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, **30**(15): 2502–2507.
- [4] Li X H, Wang Y G, Wang Y S, *et al.* Yb-doped passively mode-locked fiber laser based on a single wall carbon nanotubes wallpaper absorber[J]. *Opt Laser Technol*, 2013, **47**: 144–147.
- [5] Zhou R. High-power continuous-wave all-solid-state blue and red laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
周睿. 高功率连续运转全固态蓝光、红光激光器研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [6] Gao W N, Xu Z Y, Bi Y, *et al.* Present development and tendency of laser display technology[J]. *Strateg Study CAE*, 2020, **22**(3): 85–91.
高伟男, 许祖彦, 毕勇, 等. 激光显示技术发展的现状和趋势[J]. 中国工程科学, 2020, **22**(3): 85–91.
- [7] Grupp M, Reinermann N. Copper welding with high-brightness fiber lasers: process stabilization by high dynamic beam deflection[J]. *Laser Technik J*, 2017, **14**(3): 25–29.
- [8] Keller C. Processing of highly reflective materials: Improving metal cutting with high power fiber lasers by examination of back-reflected light[J]. *Laser Technik J*, 2017, **14**(4): 30–33.
- [9] König H, Lell A, Stojetz B, *et al.* Blue 450nm high power semiconductor continuous wave laser bars exceeding rollover output power of 80W[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10514**: 1051402.
- [10] Sa M S, Finuf M, Fritz R, *et al.* Blue laser diode (450 nm) systems for welding copper[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10514**: 1051407.
- [11] Feve J P, Finuf M, Fritz R, *et al.* Scalable blue laser system architecture[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11262**: 112620P.
- [12] <http://www.nichia.co.jp/cn/product/laser.html>.
- [13] Zhao P F, Wang Z N, Yu H J, *et al.* 12-W continuous-wave green output from a 200- μm fiber-coupled diode laser based on TO-Can packaged emitters[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(9): 2263–2267.
- [14] Wu Y L, Dong Z Y, Chen Y Q, *et al.* Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(34): 9769–9773.
- [15] 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[J]. *Proc SPIE*, 2014, **8965**: 896513.
- [16] Balck A, Baumann M, Malchus J, *et al.* 700 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10514**: 1051403.
- [17] Baumann M, Balck A, Malchus J, *et al.* 1000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm[J]. *Proc SPIE*, 2019, **10900**: 1090005.
- [18] Chin R H, Dogan M, Fulghum S, *et al.* 1kW fiber-coupled pump-module at 976nm with 50% efficiency[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(15): 17695–17700.
- [19] Liu C C, Wang X, Jing H Q, *et al.* Design of fiber-coupled laser diode module based on three-wavelengths multiplexing by ZEMAX[J]. *Chin J Lumin*, 2018, **39**(3): 337–342.
刘翠翠, 王鑫, 井红旗, 等. 三波长合束单管激光器光纤耦合模块设计[J]. 发光学报, 2018, **39**(3): 337–342.
- [20] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, *et al.* Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10086**: 100860D.
- [21] Price K, Karlsen S, Leisher P, *et al.* High-brightness fiber-coupled pump laser development[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7583**: 758308.
- [22] Wang Z L, Drows S, Segref A, *et al.* Fiber coupled diode laser beam parameter product calculation and rules for optimized design[J]. *Proc SPIE*, 2011, **7918**: 791809.
- [23] Pierer J, Lützelshwab M, Grossmann S, *et al.* Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100W in 105 μm /NA 0.15 fiber module[J]. *Proc SPIE*, 2011, **7918**: 791801.
- [24] Li F, Geng C, Huang G, *et al.* Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(4): 78–89.
李枫, 耿超, 黄冠, 等. 基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测[J]. 光电工程, 2018, **45**(4): 78–89.
- [25] Zediker M S, Fritz R D, Finuf M J, *et al.* Laser welding components for electric vehicles with a high-power blue laser system[J]. *J Laser Appl*, 2020, **32**(2): 022038.
- [26] Feve J P, Finuf M, Fritz R, *et al.* Scalable blue laser system architecture[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11262**: 112620P.
- [27] Zhu H B, Hao M M, Liu Y, *et al.* 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, **20**(8): 1684–1690.
朱洪波, 郝明明, 刘云, 等. 808nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1684–1690.
- [28] Zhang Z J. Research on high-power semiconductor laser beam combiner technology and application[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
张志军. 大功率半导体激光器合束技术及应用研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2013.
- [29] Zhou Z P, Bo B X, Gao X, *et al.* Fiber coupling design of high power semiconductor laser based on ZEMAX[J]. *Chin J Lumin*, 2013, **34**(9): 1208–1212.
周泽鹏, 薄报学, 高欣, 等. 基于 ZEMAX 高功率半导体激光器光纤耦合设计[J]. 发光学报, 2013, **34**(9): 1208–1212.
- [30] Yu T C. Design of fiber coupling of single emitters diode laser[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
虞天成. 单管半导体激光器光纤耦合技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [31] Wang Z N. Research on single emitter beam combination and fiber coupling of high-brightness semiconductor green laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
王智宁. 高亮度半导体绿光激光器单管合束及光纤耦合的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [32] Zhou C. Research on green single emitter diode laser combination and fiber coupling technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
周闯. 绿光半导体激光器单管合束及光纤耦合技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [33] Pierer J, Lützelshwab M, Grossmann S, *et al.* Automated assembly processes of high power single emitter diode lasers for 100W in 105 μm /NA 0.15 fiber module[J]. *Proc SPIE*, 2011, **7918**: 791801.
- [34] Zhu H B, Liu Y, Hao M M, *et al.* High efficiency module of fiber coupled diode laser[J]. *Chin J Lumin*, 2011, **32**(11): 1147–1151.
朱洪波, 刘云, 郝明明, 等. 高效率半导体激光器光纤耦合模块[J]. 发光学报, 2011, **32**(11): 1147–1151.
- [35] Unger A, Küster M, Köhler B, *et al.* High-power fiber-coupled 100W visible spectrum diode lasers for display applications[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8605**: 86050K.

Fiber coupling technology of high brightness blue laser diode

Duan Chengrui^{1,2}, Zhao Pengfei², Wang Xubao^{1*}, Lin Xuechun^{2*}

¹Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China



The optical path diagram of 8×3 array fiber coupling

Overview: Blue laser diodes (LDs) having the advantages of compact construction, long operating lifetime, and short-wavelength are extremely attractive for many applications, such as laser display, material processing, etc. To date, it has become one of the favorable lasers in welding copper-based alloy materials because the blue light absorption rate is 5~12 times greater than that of the near-infrared light for such materials. However, the highest output power of commercialized blue LDs is only 5 W. It cannot be used directly in laser welding unless the needed high-power output can be achieved by combining hundreds of such blue LDs. In 2020, NUBURU, an American company, showed 1500 Watts of blue laser output from a 100 μm core, $NA=0.22$ fiber for the first time. It is the highest level of output brightness of blue diode lasers so far in the world. Some achievements have also been made in China in recent years, and BWT Corporation has developed a blue laser with an output power of 500 W from a 400 μm core fiber with a 0.22 NA. However, the output brightness of laser seems to be insufficient for laser welding.

In this paper, we designed a high brightness blue LD module by using optical design software ZEMAX, where 48 blue LDs with 3.5 W output power were combined into a beam and efficiently coupled into a fiber with 105 μm core, 0.22 NA. Because of the large divergences, collimation was implemented before beam combination. The fast and slow axis collimating lenses with effective focal lengths of 1.65 mm and 16 mm are used. After that, the spot size of the fast and slow axis is 1.5 mm×4 mm, and the divergence half-angle is $0.043^\circ \times 0.06^\circ$. Multiple such beams were spatially combined. To further improve the output power without deteriorating the beam quality, the polarization beam combining technology was used to double the output power. By theoretical analysis of fiber coupling conditions, four arrays constituted by combined beams, which are 6×3, 7×3, 8×3, and 9×3 arranged in fast and slow axis, are obtained. The output power and coupling efficiency of these four arrays are 108.97 W/94.18%, 126.83 W/93.93%, 144.7 W/93.78%, and 157.91 W/91%. The combination of 6×3 completely meets the fiber coupling conditions, and the focused light spot completely falls into the fiber core. But the latter three arrays cannot fully meet the fiber coupling conditions, and the focused light spot cannot entirely fall into the fiber core. If we regarded the coupling loss of 6×3 array as a reference, and the relative losses of the arrays of 7×3, 8×3 and 9×3 are 0.27%, 0.42%, and 3.38%, respectively. It can be seen that the 8×3 array is a better choice because the coupling loss only increases by 0.42%, but the output power increases by 32.7% compared with the 6×3 array. The output brightness is calculated to be 11 MW/(cm²·str). The total optical to optical conversion efficiency is 86.13%. As a result, the output power is further improved by slightly increasing the coupling loss, which provides a technical reference for making high brightness fiber-coupled LD modules in the future.

Duan C R, Zhao P F, Wang X B, *et al.* Fiber coupling technology of high brightness blue laser diode[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200372; DOI: 10.12086/oe.2021.200372

Foundation item: National Key R & D Fund Projects (2017YFB0405001)

* E-mail: wangxubao@bjut.edu.cn; xclin@semi.ac.cn