

激光与光电子学进展

高亮度半导体激光泵浦源光纤耦合系统设计

朱尚典, 张贺, 马晓辉*, 赵鑫, 李洋, 李卫岩

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

摘要 为了提高半导体激光器作为光纤激光器、固体激光器泵浦源的亮度, 基于光束准直、空间光束合成、偏振光合成、光纤耦合等技术, 提出了一种紧凑的光束整形系统来均衡半导体激光器快慢轴的光束质量, 采用类似阶梯型棱镜和两个 30° 的直角棱镜填充快轴方向暗区, 并用偏振合束器对慢轴光束宽度进行压缩的光束整形方案, 设计出了一种紧凑的高亮度光纤耦合系统。该系统由 8 个 mini-bar 组成的半导体激光器叠阵耦合进芯径为 100 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中, 其输出功率为 272.4 W, 光光转换效率为 85.1%, 亮度高达 22.832 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

关键词 光学设计与制造; 泵浦亮度; 光束准直; 光纤耦合; 阶梯型棱镜; 偏振合束器; 光束整形

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222094

Design of Fiber Coupling System for High Brightness Semiconductor Laser Pump Source

Zhu Shangdian, Zhang He, Ma Xiaohui*, Zhao Xin, Li Yang, Li Weiyan

National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract To improve the brightness of semiconductor lasers as the pump sources of fiber lasers and solid lasers, based on the technologies such as beam collimation, spatial beam synthesis, synthesis of polarized light, and optical fiber coupling, a compact beam shaping system that unifies beam quality of fast and slow axes of semiconductor lasers is proposed. Using similar stepped prisms and two 30° rectangular prisms to fill the dark region in fast axis direction and a polarization beam combiner to compress the slow axis beam width, a compact and high brightness fiber coupling system is designed. The system is composed of eight mini-bars, which are coupled into an optical fiber with a core diameter of 100 μm and a numerical aperture of 0.22. The output power is 272.4 W, the optical conversion efficiency is 85.1%, and the maximum brightness is 22.832 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$.

Key words optical design and manufacturing; pump brightness; beam collimation; optical fiber coupling; stepped prism; polarization beam combiner; beam shaping

1 引言

近年来,随着光纤激光器和固体激光器的快速发展,对能够为其提供泵浦^[1-2]的要求也越来越高,尤其是光纤激光系统,对亮度、效率和单波长泵浦源的要求越来越高。高功率高亮度的半导体激光器耦合模块是光纤激光器的最佳泵浦源选择,因为半导体激光器具有小型化、寿命长和电光转换效率高优点,以及耦合模块具有对称的能量分布和高指向稳定性。对于高功率的光纤激光器,976 nm 半导体激光器耦合模块作为

泵浦源有着巨大优势,能够使光纤激光器的光光转换效率更高、吸收效率更高、增益有源光纤长度更短、光纤非线性效应更低,节约了部分材料成本。同时,半导体激光器耦合模块也可广泛应用于材料加工、生物医药、通信、探测、军事等领域^[3-4]。由于半导体激光器的快慢轴光束宽度以及发散角相差比较大,导致快慢轴光束质量非常不均衡,一般快轴发散角为 30°~70°,发光尺寸为 1 μm ,光束质量接近于衍射极限,慢轴发散角为 6°~12°,发光尺寸为 100 μm ,光束质量较差^[5]。目前,商用市场上有两种类型的高功率激光二极管巴

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-08-12; 网络首发日期: 2022-08-22

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金(SKLA02020001A17)

通信作者: *mxh@cust.edu.cn

条: cm-bar 和 mini-bar^[6]。对于 cm-bar, 其条宽为 10 mm, 包含 19 个发光单元, 慢轴的光束质量超过 500 倍衍射极限, 由于存在 smile 效应会导致其耦合效率降低; mini-bar 条宽为 5 mm, 包含 5 个发光单元。快轴和慢轴之间光束质量的失配是高效率和高亮度光纤耦合的主要限制因素, 很难实现有效耦合, 故需要利用相应的光束整形使快慢轴光束质量达到均衡, 是设计紧凑的高亮度光纤耦合系统的前提。

为了使半导体激光器的快慢轴光束质量达到一定的均衡, 提高整体的光束质量, 应对半导体激光器进行光束整形设计, 光束整形主要分为两类: 一是非相干耦合; 二是相干耦合。非相干耦合主要是采用几何耦合的方法, 不改变激光器本身的输出特性对激光器的输出光束进行整形, 包括折射整形法^[7]、反射整形法^[8], 以及折反射整形法^[9]等。相干耦合主要是衍射整形法, 如光谱合束^[10], 需要改变激光器本身的输出特性。现在主要采取的是非相干耦合, 耦合效率高, 而相干耦合中的衍射整形技术的耦合效率低, 所形成的光谱范围较大且光强较弱, 这些缺点限制了它的应用。目前, 国内外对半导体激光器光束整形的研究达到了比较成熟的阶段。2015 年, 余俊宏等^[11]采用 8 个 mini-bar 组成的半导体激光堆作为光源, 用切割重排棱镜堆和一对三角棱镜整形后聚焦进 100 μm/0.22 NA 的光纤中, 亮度达到 18.1 MW/(cm²·sr), 但效率只达到了 70%。2018 年, Pelegrina-Bonilla 等^[12]采用单个 cm 巴条作为光源, 用一个光束转换系统(BTS)和通过优化凹凸柱透镜来减小 smile 效应从而提高光束质量, 并耦合到 100 μm/0.22 NA 的光纤中, 耦合效率从 62.6% 提高到 85.4%, 由于是单巴条, 此亮度比较低, 其耦合效率却得到了很大的提升。2021 年, 丁兵等^[13]提出了一种密堆积阵列光束的光纤耦合方式以最大化角度填充系数来提高光亮度, 将 14 个单管聚焦进 105 μm/0.15 NA 的光纤, 输出功率为 19.13 W, 耦合效率为 91.1%, 光亮度为 3.123 MW/(cm²·sr)。2022 年, 张继业等^[14]采用 16 个 mini-bar 组成的半导体激光堆作为光源通过 BTS 整形方法及偏振合束、波长合束耦合进 200 μm/0.22 NA 的光纤中实现超过 800 W 的连续输出, 耦合效率为 95%, 光亮度为 16.74 MW/(cm²·sr), 此耦合效率和输出功率均得到极大提升。各研究也通过提高输出功率以及耦合进小芯径来提高光的亮度, 2022 年北京凯普林光电公司用中心波长为 976 nm 的半导体激光器耦合进芯径为 200 μm/0.22 NA 的光纤中, 输出功率为 700 W, 光亮度为 14.7 MW/(cm²·sr), 主要应用于光纤激光器的泵浦源。

泵浦源的亮度会限制固体激光器以及光纤激光器的输出功率, 本文设计通过耦合进芯径较小的光纤来提高亮度的同时有高效率的耦合。本设计使用 8 个 mini-bar 组成的半导体激光器堆栈作为光源, 先对快慢轴进行准直, 再利用类似阶梯型棱镜和两个边角为

30°的直角棱镜对快轴方向的光束发生全反射和折射, 填充快轴暗区, 再利用偏振合束器对慢轴光束宽度压缩来匀化快慢轴的光束质量。本文设计在不使用棱镜堆和切割重排的情况下完成了整个光束的整形过程, 整形过程简单、系统光束紧凑, 可耦合进芯径为 100 μm、数值孔径为 0.22 的光纤中实现高亮度输出。

2 光纤耦合光束质量评价与耦合条件

光参数积(BPP)是衡量半导体激光光束质量^[15]的一个重要标准, 其定义为束腰直径 ω 与远场光束发散角 θ 的乘积, 即

$$P_{\text{BPP}} = \frac{1}{4} \omega \theta. \quad (1)$$

8 个 mini-bar 组成半导体激光器堆栈, 其快慢轴光束质量极度不均衡, 根据使用要求, 为了将叠阵耦合进芯径为 100 μm、数值孔径为 0.22 的光纤中, 需对半导体激光器堆栈发出的激光光束进行整形使快慢轴光束质量达到一个均衡状态并且满足光纤耦合条件, 由于光纤端面为圆形, 要将激光光束耦合进光纤, 快慢轴光的参数积应满足:

$$P_{\text{BPP, fiber}} = \frac{NA \times d_{\text{fiber}}}{2} = 11 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (2)$$

$$P_{\text{BPP, fast}} \leq \frac{P_{\text{BPP, fiber}}}{\sqrt{2}} = 7.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (3)$$

$$P_{\text{BPP, slow}} \leq \frac{P_{\text{BPP, fiber}}}{\sqrt{2}} = 7.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (4)$$

$$NA(\text{fast, slow}) \leq NA_{\text{fiber}} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

式中: $P_{\text{BPP, fiber}}$ 为光纤的光参数积; NA_{fiber} 为光纤数值孔径; d_{fiber} 为光纤的芯径; $P_{\text{BPP, fast}}$ 为快轴光参数积; $P_{\text{BPP, slow}}$ 为慢轴光参数积; $NA(\text{fast, slow})$ 为快慢轴数值孔径; n_0 和 n_1 分别为空气折射率和纤芯折射率; n_2 为光纤包层折射率。8 个 mini-bar 耦合进光纤需要满足: 1) 光斑最大直径需小于光纤芯径; 2) 聚焦光斑的快慢轴数值孔径 $NA(\text{fast, slow})$ 均小于光纤的数值孔径 NA_{fiber} ; 3) 光束快慢轴的光参数积均小于光纤的光参数积。

3 光束整形系统设计与模拟

本文采用的光源是由 8 个 mini-bar 垂直叠加组成的半导体激光器堆栈, 总功率为 320 W, 为了减少光源布置空间, 使系统更加紧凑, mini-bar 被封装在快轴方向间距为 1.8 mm 的热层上, 其他参数如表 1 所示。

mini-bar 采用微通道水冷垂直叠阵的封装方式, 不仅能够有效地散热, 还能够降低 smile 效应, 从而提高巴条的光束质量。整体光路系统封装机械结构图如图 1 所示, 其中 FAC 表示快轴准直透镜, SAC 表示慢轴准直透镜, FCS 表示快轴光束压缩系统, 该系统由一个阶梯型棱镜和两个 30°的直角棱镜组成, PBS 表示

表 1 mini-bar 的参数

Table 1 Parameters of mini-bar

Parameter	Numerical value
Bar width /mm	5
Dominant wavelength /nm	976
Number of emitter	5
Emitter width / μm	100
Pitch / μm	1000
Fast axis divergence /($^\circ$)	40 (enclose 95% energy)
Slow axis divergence /($^\circ$)	7 (enclose 95% energy)

偏振合束器, BES 表示慢轴光束扩束系统, 由一个平凹柱透镜和平凸柱透镜组成。各光学元件入射面和出射面都镀有相应的增透、增反膜, 增透膜透射率为

99.5%, 增反膜透射率为 0.5%。

为了设计紧凑的高亮度光纤耦合系统, 须减小快慢轴上的发散角来提高光束质量, 通过设计准直系统来实现快慢轴发散角的准直。对快轴进行准直的方式一般有球面镜准直、自聚焦准直透镜、非球面镜准直三种, 本文设计快轴采用平凸非球面微柱面透镜准直, 准直效果好, 并且能够有效地减少球差, 选择有效焦距 (EFL) 为 0.5 mm (FAC-500) 的平凸非球面微柱面透镜准直, 具体参数如表 2 所示, 其中 h 、 w 分别表示单个准直透镜的宽度和厚度, r 、 c 分别表示准直透镜的曲率半径和圆锥系数。准直后快轴剩余发散角为 2.51 mrad, 光束宽度为 13.4 mm, 光束质量 $P_{\text{BPP,slow}}$ 为 8.408 mm·mrad, 如图 2 所示。

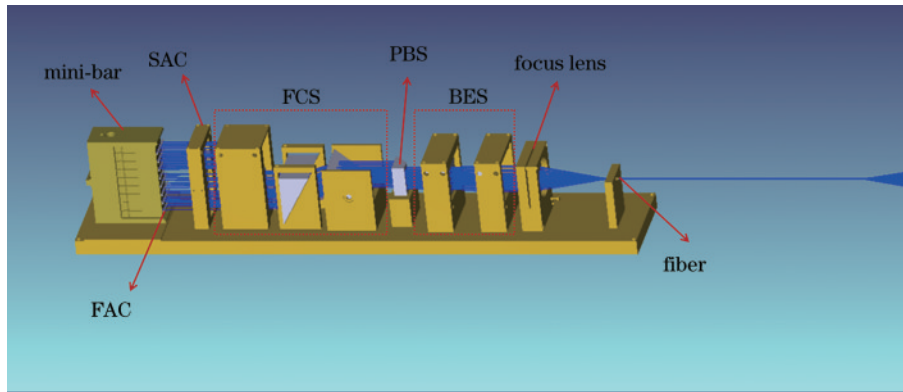


图 1 整体机械结构封装的光学系统

Fig. 1 Integral mechanical structure encapsulated optical system

表 2 快慢轴准直透镜参数

Table 2 Parameters of fast and slow axis collimating lens

—	EFL/mm	h /mm	w /mm	r /mm	c
FAC-500	0.5	0.38	0.3	-0.204	-0.526
SAC-080-1000	8.25	1	1	-4.19	—

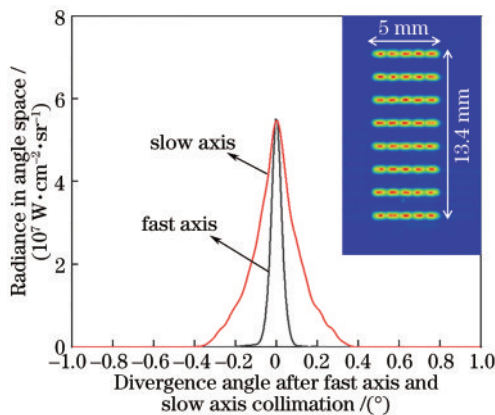


图 2 快慢轴准直发散角及准直后光斑图

Fig. 2 Quasi divergence angles of fast and slow axis and light spot after collimation

mini-bar 在慢轴中有 5 个发光单元, 每个发光单元之间存在无光区域。因此, 需要一个微柱透镜阵列来

准直慢轴上的激光束, 每个微柱面透镜对应一个发光单元, 慢轴上的微柱面透镜大小等于每个发光单元之间的间距, 本文设计慢轴采用 EFL 为 8.25 mm (SAC-080-1000) 的微柱透镜阵列准直, 具体参数如表 2 所示, 准直后慢轴剩余发散角为 11.6 mrad, 光束宽度为 5 mm, 光束质量 $P_{\text{BPP,slow}}$ 为 14.5 mm·mrad, 如图 2 所示, 快慢轴整体光路系统如图 3 所示。

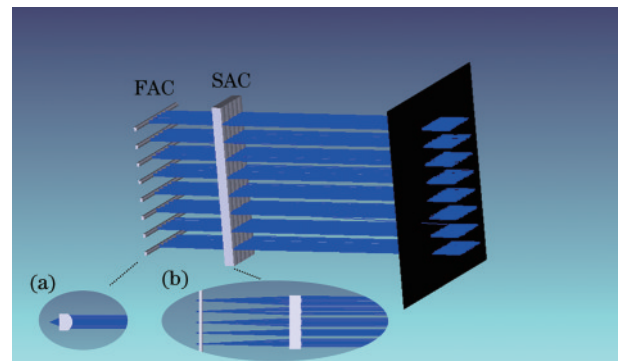


图 3 快慢轴准直光路系统图。(a) 单个巴条快轴准直; (b) 单个巴条慢轴准直

Fig. 3 Diagram of fast and slow axis collimation optical path system. (a) Fast axis collimation of single bar; (b) slow axis collimation of single bar

准直后,快慢轴发散角以及光束宽度相差较大,快慢轴光束质量均大于 $7.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,不符合耦合进光纤的条件,为了获得更好的聚焦性,快慢轴光束宽度以及发散角应达到均衡状态,故需要对巴条进行光束整形系统设计。快轴方向的巴条与巴条之间有一定的间隔,导致快轴的填充因子较低、光参数积较大。对快轴采取光束整形的目的主要是消除快轴上的暗区,其整形的方法是利用一个类似阶梯型特殊棱镜和两个底角为 30° 的直角棱镜实现快轴暗区的填充。此方法相比于传统的切割重排具有功率损耗较小、使用棱镜数量少、调节难度小、加工简单的特点。

首先,在不切割光束的情况下填充巴条与巴条之间的暗区可减小快轴光束宽度,使用类似阶梯型棱镜,棱镜的实体图如图 4 所示,将第一个巴条填充到第四个和第五个巴条中间,第二个巴条填充到第五和第六个巴条中间,第三个巴条填充到第六和第七个巴条中间,第四个巴条填充到第七和第八个巴条中间。上面四个巴条通过两次全反射填充到下面四个巴条中间,下面四个巴条通过棱镜直接透射过去,系统光路如图 5 所示。阶梯型棱镜的厚度为 6 mm ,宽度为 7.6 mm ,阶梯高度为 1.4 mm ,阶梯斜边长为 0.57 mm ,沿光轴方向上

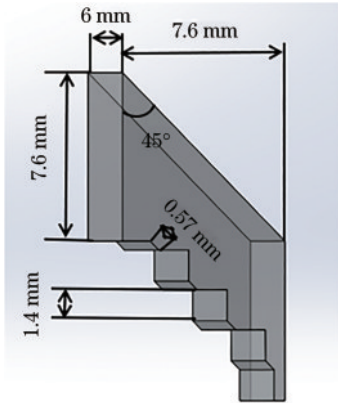


图 4 类似阶梯型棱镜实体结构

Fig. 4 Physical structure of similar stepped prism

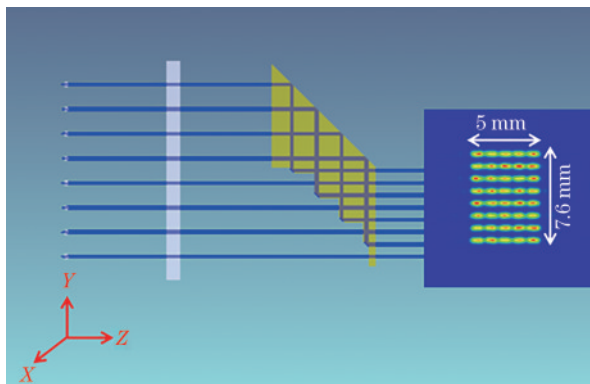


图 5 光束经过阶梯型棱镜光路系统图

Fig. 5 Optical path system diagram of light beam passing through stepped prism

的尺寸为 7.6 mm 。通过此棱镜整形后,快轴光束宽度减少了一半,为 6.7 mm ,发散角不变,此时光束质量 $P_{\text{BPP,fast}} = 2.51 \text{ mrad} \times 6.7 \text{ mm} \times 1/4 = 4.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,快轴光束质量不变。

经过阶梯型棱镜整形后,快轴仍存在一定的暗区,慢轴的发散角是快轴发散角的 4.6 倍。同时,在经过阶梯型棱镜整形后,整体光轴沿快轴方向下降,这将导致聚焦透镜和光纤的对准难度大,为了消除快轴上的暗区,平衡快慢轴的发散角,本文利用两个 30° 直角棱镜使光束发生折射对系统进行整形,尺寸为 $6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10.4 \text{ mm}$,两个棱镜之间沿 Z 方向的距离为 10 mm ,第二个 30° 直角棱镜相对于 X 方向旋转了 131° ,如图 6 所示。此时快轴光束宽度为 4 mm ,快轴发散角为 $4.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,快轴光束质量 $P_{\text{BPP,fast}} = 4.2 \text{ mrad} \times 4 \text{ mm} \times 1/4 = 4.2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (小于 $7.8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$),慢轴光束质量不变。

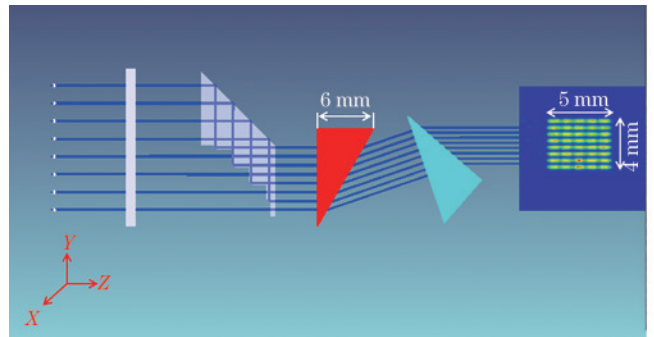


图 6 光束通过两个 30° 直角棱镜折射填充快轴暗区

Fig. 6 Light beam is refracted through two 30° rectangular prisms to fill dark region of fast axis

经过两个 30° 直角棱镜后,快轴发散角增大了,快轴光束宽度也得到了一定的压缩,此时快慢轴光参数积相差较大,慢轴光束质量较差,需要再对慢轴光束进行整形,以匀化快慢轴的光束质量。本文设计利用偏振合束器来对慢轴光束进行整形^[16],偏振合束器是由一个平行四边形棱镜和一个等腰直角棱镜组成,整体形状类似直角梯形棱镜,基本尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,如图 7(a) 所示。半波片(HWP)贴在平行四边形棱镜上,等腰直角三角形棱镜表面涂有偏振

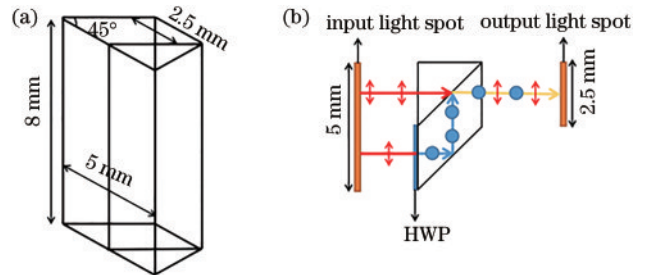


图 7 偏振合束器的(a)结构和(b)原理示意图

Fig. 7 Diagram of (a) structure and (b) principle of polarization beam combiner

膜(通过P波),可用于实现偏振光束组合,如图7(b)所示。偏振合束器可以将来自慢轴的光束分成两个相等的部分。其中一部分可以作为纵波通过合束器。另一部分的偏振方向被HWP旋转了90°,光束通过平行四边形棱镜发生全内反射,并被偏振膜作为横波发生全反射,如图8所示。此时慢轴光束宽度缩短至一半,慢轴暗区也得到了填充,增强了光亮度,慢轴光束宽度为2.5 mm,发散角不变,慢轴光束质量减少了一半, $P_{BPP,fast}=11.6\text{ mrad}\times 2.5\text{ mm}\times 1/4=7.25\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (小于7.8 mm·mrad),快轴光束质量不变。

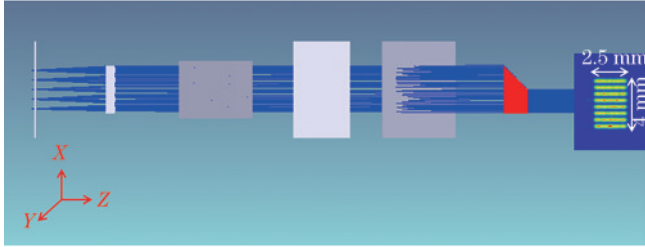


图8 偏振合束器压缩慢轴光束宽度光路系统图

Fig. 8 Optical path system diagram of compressing beam width of slow axis by polarization beam combiner

通过偏振合束器后,快慢轴光束质量相差不大,但慢轴发散角仍是快轴发散角的两倍多,会造成光束聚焦性差。为了获得更好的聚焦性,减少功率的损耗,本文设计了一个由焦距为-10 mm的平凹柱透镜和焦距为20 mm的平凸柱透镜组成的扩束系统,平凸柱透镜的尺寸为3 mm×8 mm×10 mm,如图9所示。经过此

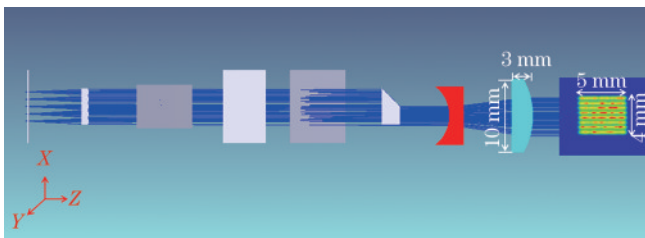


图9 扩束系统减小慢轴发散角光路系统图

Fig. 9 Optical path system diagram of decreasing divergence angle of slow axis by beam expansion system

系统后,慢轴光束宽度增大了一倍,发散角减少了一半,快慢轴光束质量不发生改变。此时快慢轴光束宽度为4 mm×5 mm,快慢轴发散角为4.2 mrad×5.8 mrad,都达到了一定的均衡,便于聚焦耦合。

本文设计中,使用焦距为15 mm的非球面聚焦透镜将激光束聚焦到光纤中,聚焦后快慢轴光斑宽度为71 μm×95 μm,均小于100 μm,快慢轴数值孔径为0.13×0.18,均小于0.22(即快慢轴半角为7.5°×10.4°,均小于光纤的入射半角12.709°,如图10所示),可将光束耦合进芯径为100 μm、数值孔径为0.22的光纤中,如图11所示。光纤耦合输出光功率为272.4 W,光光转换效率为85.1%,光纤耦合过程中的能量损耗分析如图12所示,亮度高达22.832 MW/(cm²·sr)。

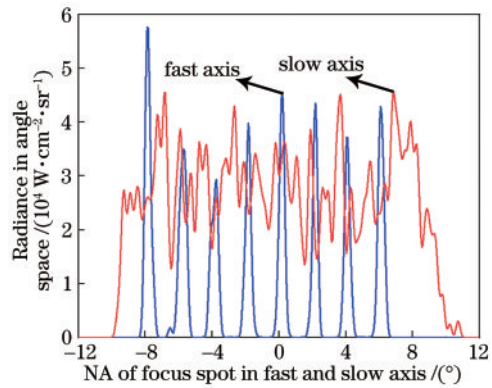


图10 快慢轴在聚焦处的NA值

Fig. 10 NA values of focus spot in fast and slow axis

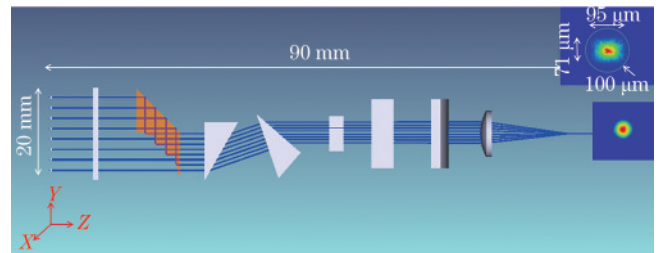


图11 整体光纤耦合系统与光纤输出光斑图

Fig. 11 Diagram of overall fiber coupling system and fiber output light spot

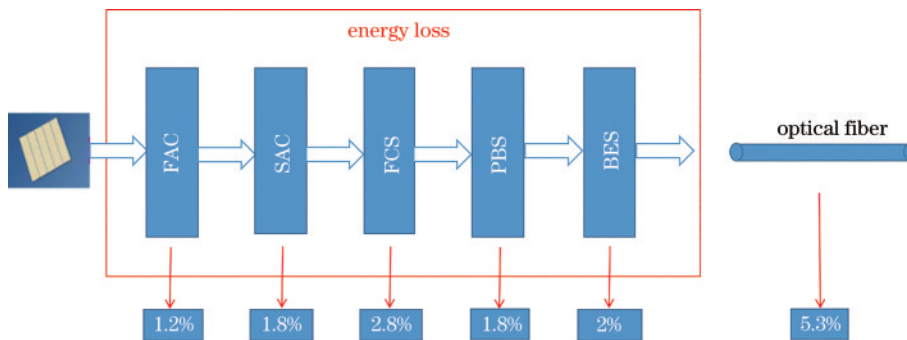


图12 光纤耦合过程中的能量损耗分析

Fig. 12 Energy loss analysis in fiber coupling process

4 结 论

利用所提出的简单光束整形系统,模拟了 8 个 mini-bar 耦合到纤芯直径为 100 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中。采用类似阶梯型棱镜使光束发生全反射以及两个 30° 直角棱镜使光束发生折射,可以压缩光束宽度、消除快轴无光区、平衡快慢轴发散角,使系统简单紧凑。采用偏振合束器和扩束系统使慢轴发散角变小,使快慢轴发散角以及光束宽度达到均衡状态,设计出了一个紧凑的高亮度光纤耦合系统,其输出功率为 272.4 W, 光光转换效率为 85.1%, 亮度高达 22.832 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。相比现有的 mini-bar 叠阵光纤耦合模块,效率及亮度均有了很大提升,系统整体尺寸约为 90 mm \times 20 mm \times 20 mm, 该小型激光器光纤耦合模块可用做固体激光器以及光纤激光器的泵浦源。

参 考 文 献

- [1] Newburgh G A, Dubinskii M. A diode-pumped Nd:YVO₄ thin disk laser with a hetero-composite gain element and dual-face cooling[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(10): 105807.
- [2] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [3] 何兴仁. 大功率半导体激光器及其在军事上的应用[J]. *半导体情报*, 1995, 32(3): 26-33.
He X R. High power semiconductor laser and its application in military[J]. *Semiconductor Information*, 1995, 32(3): 26-33.
- [4] 俞建杰, 谭立英, 马晶, 等. 大功率半导体激光器阵列光束整形新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(4): 34-42.
Yu J J, Tan L Y, Ma J, et al. Progress on beam shaping of high-power laser diode arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(4): 34-42.
- [5] Yu J H, Guo L N, Wu H L, et al. High brightness beam shaping and fiber coupling of laser-diode bars[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3513-3516.
- [6] Matthews D, Kleine K, Krause V, et al. A 15-kW fiber-coupled diode laser for pumping applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8241: 824103.
- [7] Grenier P, Taillon Y, Labranche B, et al. Symmetrization device and laser diode system provided with the same: US7260131[P]. 2007-08-21.
- [8] Werner S, Stefan G, Ralf M, et al. Microoptical device with mirrors: US5808323[P]. 1998-09-15.
- [9] Gao X, Shinoda K, Saitoh M, et al. Laser light source and an optical system for shaping light from a laser-bar-stack: US20030174405[P]. 2005-09-13.
- [10] 李元栋, 华卫红, 王红岩, 等. 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 091405.
Li Y D, Hua W H, Wang H Y, et al. Research development of linewidth narrowing of high power diode lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 091405.
- [11] Yu J H, Guo L N, Wu H L, et al. Beam shaping design for compact and high-brightness fiber-coupled laser-diode system[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5759-5763.
- [12] Pelegrina-Bonilla G, Mitra T. Compensation of the laser diode smile by the use of micro-optics[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3329-3333.
- [13] 丁兵, 赵鹏飞, 段程芮, 等. 高亮度绿光半导体激光器光纤耦合系统设计与仿真[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501016.
Ding B, Zhao P F, Duan C R, et al. Design and simulation of high brightness fiber coupling system of green laser diodes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501016.
- [14] 张继业, 彭航宇, 曹军胜, 等. 15 kW 光纤耦合半导体激光淬火光源[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0501004.
Zhang J Y, Peng H Y, Cao J S, et al. 15 kW fiber coupled semiconductor laser quenching light source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0501004.
- [15] 黄忠伦, 郭劲, 付有余. 评价激光光束质量的各种方法[J]. *激光杂志*, 2004, 25(3): 1-3.
Huang Z L, Guo J, Fu Y Y. Various methods for evaluating laser beam quality[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(3): 1-3.
- [16] Lin G Y, Zhao P F, Dong Z Y, et al. Beam-shaping technique for fiber-coupled diode laser system by homogenizing the beam quality of two laser diode stacks [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105919.