

基于半导体激光器堆栈的光纤耦合技术

于 贺, 马晓辉, 赵 鑫, 邹永刚, 徐英添, 徐 莉, 张 贺

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 由于半导体激光器快慢轴方向的光束质量相差较大, 为完成半导体激光器堆栈的光纤耦合, 通常采用棱镜堆对光束进行整形。提出一种先填充快轴方向暗区、后旋转重排的光束整形技术, 基于棱镜内部的全反射和平行平板对光束的偏移作用, 在不使用棱镜堆的情况下完成了整个光束的整形过程。所提技术可将 8 个巴条组成的半导体激光器堆栈耦合到芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中, 输出功率可达 544.47 W, 系统的光-光转换效率达到 85%。

关键词 激光器; 光纤耦合; 光束整形; 棱镜全内反射; 半导体激光器堆栈; 平行平板

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1101006

Fiber Coupling Technology Based on Diode Laser Stack

Yu He, Ma Xiaohui, Zhao Xin, Zou Yonggang, Xu Yingtian, Xu Li, Zhang He

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

Abstract Because of the large difference in beam quality between the fast axis and slow axis directions of the diode laser, a prism stack is used for beam shaping to complete fiber coupling of the diode laser stack. A beam shaping technology of filling the dark areas in the fast axis direction before rotating rearrangement is proposed. The technology is based on the total internal reflection of prism stack and the deviation effect of the parallel plate, and it can complete the whole beam shaping process without using prism stack. By the proposed technology, the laser from stack which is equipped with 8 bars is coupled into a fiber with a core diameter of 200 μm and numerical aperture of 0.22. The output power can reach 544.47 W and optical-to-optical conversion efficiency of the system can reach up to 85%.

Key words lasers; fiber coupling; beam shaping; total internal reflection of prism; diode laser stack; parallel plate

OCIS codes 140.3290; 140.3295; 140.3300

1 引 言

近年来, 半导体激光器因其小型化、寿命长和电光转换效率高等特点, 被广泛应用于激光抽运、材料加工、生物医疗等各个领域^[1-2]。半导体激光器在垂直于 PN 结和平行于 PN 结两个方向(快轴和慢轴)的发散角和发光尺寸相差较大。快轴发散角一般为 $30^\circ \sim 60^\circ$, 发光尺寸为 1 μm ; 慢轴发散角一般为 $6^\circ \sim 12^\circ$, 发光尺寸为 100 μm ^[3]。快轴光束接近衍射极限, 而慢轴光束远超过衍射极限。单个发光单元功率小, 并且快慢轴光束质量相差大, 这限制了半导体激光器的直接应用。通常将多单管、巴条、堆栈通过光束整形后再进行光纤耦合, 这样既可提高光功率, 也可优化光束质量, 从而可使半导体激光器更广泛地应用于多个领域。由于半导体激光器的发光特性, 很难将其发出的光束直接耦合进入光纤。

为了提高半导体激光的光束质量, 可采用基于衍射原理的衍射型光束整形方法和基于几何光学原理的几何型光束整形方法对光束进行整形^[1]。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,

收稿日期: 2017-06-14; **收到修改稿日期:** 2017-07-22

作者简介: 于 贺(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: 1512269644@qq.com

导师简介: 张 贺(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: zhanghe@cust.edu.cn(通信联系人)

这些特点限制了它的应用。因此一般采用几何型光束整形方法来提高半导体激光的光束质量。针对堆栈的光束整形,首先对出射激光进行准直,然后把准直后的离散光斑尽量整形为密集的光斑,在发散角不变的情况下,该过程可缩小光斑尺寸、提高光束质量。目前堆栈光束整形的典型方法是平移重排棱镜堆整形^[4]。2011年,Ghasemi等^[5]利用条纹镜和V-stack镜将由10个巴条组成的1kW半导体激光器堆栈耦合到芯径为550 μm、数值孔径为0.22的光纤中;2012年,Ghasemi等^[6]采用条纹镜和偏转光束组合元件将一个高功率半导体激光器堆栈耦合到芯径为365 μm、数值孔径为0.22的光纤中;2016年,Wu等^[3]基于切割旋转重排的新方法,利用一个棱镜堆并通过偏振合束将2个堆栈耦合到芯径为600 μm、数值孔径为0.22的光纤中。

本文设计的特殊棱镜可使快轴方向的光束发生全反射和平移,通过填充快轴方向的暗区,并利用一次切割旋转光束的方法匀化快慢轴光束质量。本文设计在不使用棱镜堆的情况下完成了整个光束的整形过程,整形便于调整和实现。用ZEMAX软件模拟光束整形过程,整形之后的光束最终耦合进芯径为200 μm、数值孔径为0.22的光纤中。

2 光束整形技术

光参数积 B_{pp} 是衡量半导体激光光束质量的一个重要标准,定义为束腰半径 ω 与远场光束发散角 θ 的乘积,即

$$P_{bp} = \frac{\omega\theta}{4} \quad (1)$$

由(1)式可知,快慢轴光参数积相差很大。为将光束耦合进入光纤,需对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。准直压缩光束的快慢轴发散角是匀化快慢轴光束质量的首要前提。光纤的两个参数是芯径和数值孔径。芯径决定了光纤能接收耦合光束的多少,数值孔径限制了耦合进光纤光束的最大入射角。光纤的光参数积可表示为

$$B_{pp\text{-fiber}} = \frac{D_{\text{fiber}} \times NA}{2} \quad (2)$$

式中 D_{fiber} 为光纤芯径; NA 为光纤的数值孔径,可表示为

$$NA = \sin \theta_{\max} = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

式中 θ_{\max} 为光纤能接收光束的最大入射角, n_0 为空气折射率, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率。光束能耦合进入光纤必须满足以下几个条件^[7]:1)光斑最大直径需小于光纤芯径;2)光束入射时其入射角要小于 θ_{\max} ;3)光束快慢轴的光参数积 $B_{pp\text{-fast}}$ 和 $B_{pp\text{-slow}}$ 均小于光纤的光参数积。由于光纤端面为圆形,要将激光光束耦合进光纤,快慢轴光参数积应满足:

$$B_{pp\text{-fast}} + B_{pp\text{-slow}} \leq B_{pp\text{-fiber}} \quad (4)$$

$$B_{pp\text{-fast}} \leq \frac{B_{pp\text{-fiber}}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$B_{pp\text{-slow}} \leq \frac{B_{pp\text{-fiber}}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

由光纤耦合的条件可以看出,为将光束耦合进入光纤,需减小快慢轴光参数积,并使快慢轴光参数积相近。准直是首要条件,整形减小光斑尺寸也同样重要。这里采用先填充快轴上的暗区、再进行旋转重排的光束整形方法。

3 设计和模拟结果

采用的半导体激光器堆栈由8个巴条垂直叠加而成,每个巴条的功率为80 W,总功率为640 W。设置的快轴发散角为40°,慢轴发散角为10°。单个巴条由19个发光单元组成,发光单元宽度为100 μm、周期为500 μm,巴条厚度为130 μm,巴条与巴条之间的距离为1.8 mm,中心波长为980 nm。在模拟过程中,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 $T_t=99.5\%$,增反膜透射率 $T_r=0.5\%$ 。

采用平凸柱透镜对快轴进行准直,用 ZEMAX 软件对其进行模拟仿真。为了减小像差并使准直之后发散角更小,对面型采取非球面处理,非球面系数 $c = -0.48^{[8]}$,焦距为 $500 \mu\text{m}$ 。准直之后快轴的发散角为 0.1° ,如图 1 所示。

采用焦距为 1.4 mm 的微柱透镜阵列对慢轴进行准直。准直之后,慢轴发散角为 0.5° ,如图 2 所示。

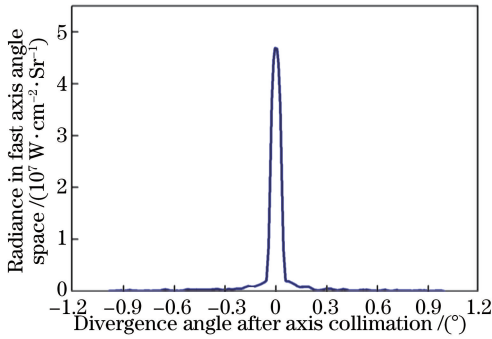


图 1 快轴准直发散角

Fig. 1 Divergence angle of fast axis after collimation

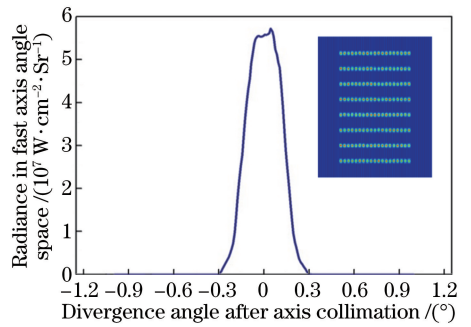


图 2 慢轴准直发散角(插图为快慢轴准直之后的光斑图)

Fig. 2 Divergence angle of slow axis after collimation (insert is the output profile after collimation)

传统的整形方法是先将慢轴的光束分成 N 等份,然后将慢轴方向被切割的光束平移到快轴方向的暗区中,这样可使快轴方向光束质量不变、慢轴方向光束质量提高 N 倍^[9]。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。因此堆栈光束整形的主要思想是消除暗区。这种整形方法先利用平行平板切割慢轴方向的光束,再利用平行平板对光束的偏移作用或棱镜的全反射作用对光束进行平移重排。该方法的缺点是需要的棱镜片数量较多、厚度薄、加工精度要求高且调节困难。因此,设计了一种不使用棱镜堆的高效光纤耦合方法。

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。将光束在快轴方向分成两个部分。对于上面 4 个巴条,可将第 1 束光和第 2 束光填充在第 3 束光和第 4 束光之间。利用棱镜的全反射实现该填充过程,棱镜的实体图如图 3(a)所示。此棱镜的上半部分可看作从一个平行四边形棱镜中挖出的一个梯形棱镜。梯形的上底边为 0.8 mm ,整个棱镜宽度为 3 mm 、厚度为 1.2 cm 。经过此棱镜内部的全反射之后,上面 4 个巴条发出的光被压缩在第 3、4 个巴条之间;下面 4 个巴条发出的光与上面 4 个巴条发出的光是对称的。如图 3(b)所示,经过此棱镜整形之后,快轴光束宽度为 5.6 mm ,慢轴光束宽度为 9.2 mm 。快轴方向依然存在一个未被填充的暗区,即中间两个巴条之间的暗区。

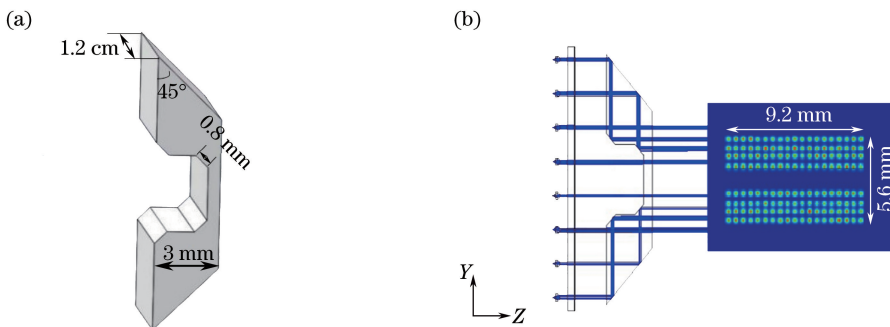


图 3 (a)第一个压缩快轴光宽度的棱镜示意图;(b)用棱镜全反射填充快轴暗区

Fig. 3 (a) Diagram of prism for compressing width of fast axis beam; (b) filling dark space of fast axis by total reflection of prism

为了消除这个暗区并减小快轴方向的光束宽度,需要使 8 个巴条上的光均匀压缩在快轴上。利用平行平板对光束的偏移作用^[10-11],可以使上面 4 个巴条的光向下偏移、下面 4 个巴条的光向上偏移。设计的偏移棱镜可看作由两个底角为 45° 的平行平板组成的棱镜。如图 4 所示,平行平板的底边长度为 2.5 mm ,厚度为

1.2 cm。通过平行平板对光束的偏移作用进一步压缩快轴光束宽度,以提高快轴光束质量,并保持慢轴光束质量不变。利用平行平板进行整形之后,快轴光束宽度为 4.6 mm,慢轴光束宽度为 9.2 mm。此时快慢轴的光束质量分别为 $B_{pp-fast} = 2.007 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $B_{pp-slow} = 20.079 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。此时快慢轴光参数积相差较大,慢轴光束质量较差,需要再对光束进行整形,以匀化快慢轴光束质量。在将快轴光斑进行压缩的情况下,可利用一次切割旋转重排完成光束整形过程,如图 5 所示。利用两个底边和斜边倾角都为 45° 、直角边长都为 4.6 mm 的小棱镜将慢轴方向的光束切割成两部分。两部分光束射到棱镜斜边并发生第 1 次全反射时,光束的传播方向旋转了 90° 。之后,光束入射到棱镜另一斜边并发生第 2 次全反射。在棱镜内部经过两次全反射后,相对于入射光束,光束向右旋转了 90° ,将快慢轴方向对调,则光斑图中横向方向变为快轴方向,纵向方向变为慢轴方向。此时快轴光束宽度为 9.6 mm,慢轴光束宽度为 5 mm,快慢轴光束质量分别为 $B_{pp-fast} = 4.188 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 和 $B_{pp-slow} = 10.91 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。此时快慢轴光束质量已相差不大,光束可耦合进芯径为 $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的光纤中,此光纤能容纳的最大光参数积为 $B_{pp-fiber} = 22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

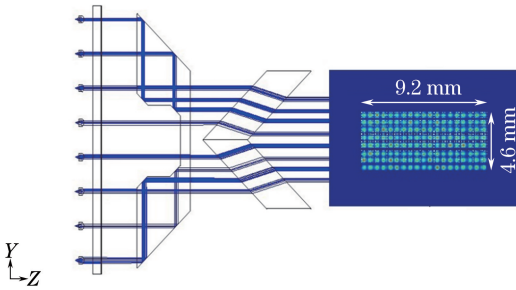


图 4 用平行平板进一步填充快轴暗区

Fig. 4 Further filling dark space of fast axis with parallel plates

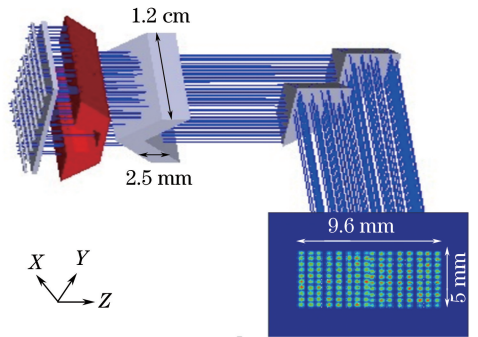


图 5 通过两次全反射的切割旋转重排

Fig. 5 Incision rotation rearrangement through twice total reflection

可见,光束整形可使快慢轴光参数积满足光纤耦合条件,并减小总光参数积。在功率一定的情况下,光参数积越小,光斑亮度越大,光束质量也就越好。此时快慢轴光参数积虽然达到了一个均衡的状态,但是快轴光束宽度几乎为慢轴光束宽度的两倍,为了便于耦合,用两个焦距分别为 6 cm 和 3 cm 的平凸柱透镜将快轴方向的光束宽度压缩为原来的一半,发散角随之变为原来的 2 倍。如图 6 所示,经过这两个平凸柱透镜压缩快轴光斑后,快慢轴光斑尺寸基本都为 5 mm。在耦合进光纤的聚焦镜前将光斑整形为正方形,以便于聚焦耦合。

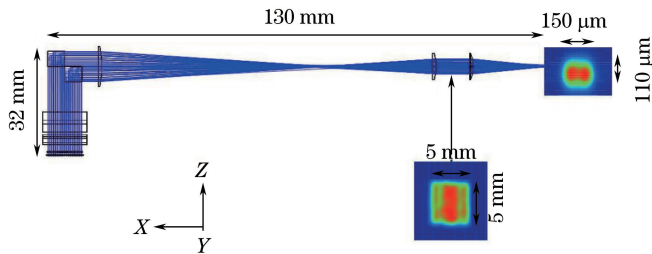


图 6 压缩快轴光束宽度和聚焦耦合过程

Fig. 6 Processes of compression of beam width in fast axis and focusing coupling

聚焦耦合过程如图 6 所示。用一个焦距为 2 cm 的非球面镜对光束进行聚焦,聚焦之后的光斑长度为 $150 \mu\text{m}$,光斑宽度为 $110 \mu\text{m}$,最终将光束耦合到芯径为 $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的光纤中,光束入射到光纤中的角度为 7.125° ,小于 0.22 的数值孔径能容纳的最大入射角 (12.709°)。聚焦后的光斑直径小于 $200 \mu\text{m}$,满足光纤耦合条件。图 7 为从光纤中输出的光斑图,光纤耦合输出光功率为 544.47 W,系统的光-光转换效率为 85%。

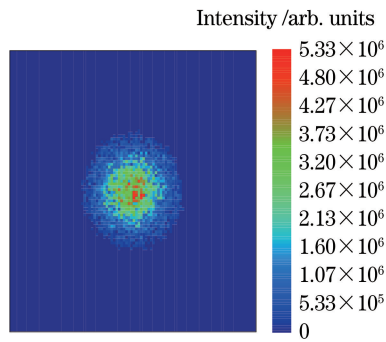


图 7 光纤端面输出的光斑图

Fig. 7 Output beam spot of fiber end face

4 结 论

利用光学设计软件 ZEMAX 进行模拟,通过棱镜的内部全反射和平行平板对光束的平移作用,可完成半导体激光器堆栈的光束整形过程。利用先填充快轴暗区、再匀化快慢轴光束质量的方法,可避免使用棱镜堆,设计整形过程简单、易调整且实用性强。利用该光束整形技术可将一个功率为 640 W 的半导体激光器堆栈有效地耦合进芯径为 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中。模拟结果显示,光纤的输出光功率可达到 544.47 W,整体系统的光-光转换效率可达到 85%。

参 考 文 献

- [1] Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing, *et al.* Progress on beam shaping of high-power laser diode arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(4): 34-42.
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.
- [2] Wu Hualing, Guo Linhui, Wang Zhao, *et al.* Design of high brightness fiber-coupled diode laser system based on dual-emitters[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1001012.
吴华玲, 郭林辉, 王昭, 等. 基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合系统设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001012.
- [3] Wu Y, Dong Z, Chen Y, *et al.* Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9769-9773.
- [4] Liu H, Wang Z, Zhang P. Double-cutting beam shaping technique for high-power diode laser area light source[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 106108.
- [5] Ghasemi S H, Hantehzadeh M R, Sabbaghzadeh J, *et al.* Beam shaping design for coupling high power diode laser stack to fiber[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2927-2930.
- [6] Ghasemi S H, Lafouti M. A beam shaping design for coupling high power diode laser stack to fiber with capability of spectral narrowing and stabilizing[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(12): 2879-2882.
- [7] Yu Tiancheng. 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.
- [8] Zhou Zepeng, Bo Baoxue, Gao Xin. Fiber coupling design of high power semiconductor laser based on ZEMAX[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(9): 1208-1212.
周泽鹏, 薄报学, 高欣. 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.
- [9] Huang Zhihua. Study of beam shaping and fiber coupling technology of multiple diode laser bars[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2014.
黄志华. 基于多巴条半导体激光器的光束整形和光纤耦合技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [10] Li Mingwei, Yu Xiaochen, Shao Xiaoyang, *et al.* Laser diode array beam shaping based on parallel glass plate[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 864-869.

- 李明伟, 于晓晨, 邵晓阳, 等. 基于平行玻璃板的半导体激光器阵列光束整形[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 864-869.
- [11] Guo Linhui, Wu Hualing, Yu Junhong, *et al.* Beam shaping based on parallel glass plate arrays for diode laser array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051401.
- 郭林辉, 吴华玲, 余俊宏, 等. 基于平行玻璃板阵列的二极管激光阵列光束整形[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051401.