

文章编号: 1000-7032(2014)11-1359-06

基于 mini-bar 的千瓦级光纤耦合模块

杜 洋, 高 欣, 许留洋, 王胜楠, 乔忠良, 张 晶, 薄报学*

(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: 应用 ZEMAX 光学设计软件对基于 mini-bar 的半导体激光光纤耦合模块进行仿真模拟, 采用 22 只输出功率为 60 W 的 mini-bar 半导体激光器组成两列空间叠阵作为耦合光源, 通过准直、合束、聚焦等方法高效耦合进入芯径 400 μm 、数值孔径 0.22 的光纤, 输出功率可达 1 200 W, 光纤耦合效率大于 92%。

关键词: 半导体激光器; ZEMAX; mini-bar; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20143511.1359

Fiber Coupling Module with Kilowatt-output Based on Mini-bars

DU Yang, GAO Xin, XU Liu-yang, WANG Sheng-nan, QIAO Zhong-liang, ZHANG Jing, BO Bao-xue*
(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: bbx@cust.edu.cn

Abstract: The actual situation of fiber coupling diode laser module based on mini-bars was simulated by ZEMAX. Twenty two pieces of mini-bar with output power of 60 W were arranged in two stack arrays as laser source. The beam could be coupled into the fiber of 400 μm core diameter with 0.22 numerical aperture by collimating, combining and focusing. The output power of the fiber coupling module is more than 1 200 W, and the coupling efficiency is about 92%.

Key words: diode laser; ZEMAX; mini-bar; optical fiber coupling

1 引 言

随着光纤通信、材料加工、激光医疗以及国防等领域的发展, 半导体激光器有了广泛的应用。相比于其他类型激光器, 半导体激光器具有体积小、重量轻、效率高、免维护、成本低以及波长是金属材料高吸收波段的优点^[1-2], 但其在二维方向上的光束质量极不均衡, 限制了它在某些方面的应用。为了扩展其应用市场, 研制具有高功率和高光束质量的半导体激光器光纤耦合模块具有十分重要的意义^[3]。

半导体激光器巴条(LD bar)在慢轴方向上的

光束质量较差, 导致光束无法直接进入光纤中。因此, 就需要进行光束整形来平衡光束质量, 使其满足光纤芯径与数值孔径(NA)的要求。这种将光束沿慢轴方向切割重排至快轴方向的光束整形方式虽然有效, 但是其成本高, 增加了耦合系统的整体结构的复杂性并且影响了耦合的效率, 也难以满足激光器应用中不断增加的高亮度要求^[2-4]。近年来, 国外已经开始研究基于 mini-bar 的光纤耦合系统以解决整形系统带来的问题, 并已经研制出出光亮度达到 $1.0 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 的光纤耦合模块(NA 为 0.22)。

本文应用 ZEMAX 光学设计软件, 对 22 只输

收稿日期: 2014-07-23; 修订日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61176048, 61177019, 61308051); 吉林省科技发展计划(20120361, 20130206016GX); 中物院高能激光重点实验室基金(2014HEL01)资助项目

输出功率为 60 W 的 mini-bar 半导体激光器组成的两列叠阵进行了光纤耦合模块设计,并进行了模拟仿真。该方法无须使用切割重排的光束整形方式并提高了整体的耦合效率。最终光束耦合进入芯径 400 μm 、数值孔径 0.22 的光纤,输出功率达 1 200 W,耦合效率大于 92%。

2 Mini-bar 特性参数

Mini-bar 是一种特殊设计的、具有多个发光单元的激光二极管线阵。由于对每个发光单元的间距和宽度进行了严格的设计,所以不用经过复杂的光束整形系统即可得到高质量的慢轴方向光束^[5]。与此同时,发光单元的间距增大也使热串扰得到减小,稳定性和寿命也得以提高;因为腔长增加至 3.5~5.0 mm,功率也得到了提高。

本文采用了输出功率为 60 W 的 mini-bar 芯片,其阵列发光宽度为 2.5 mm,具有 5 个发光单元,每个发光单元的发光尺寸为 100 μm (慢轴方向) \times 1.2 μm (快轴方向),慢轴发散角为 10°,快轴发散角为 58°,芯片的填充因子为 20%。

国际上流行采用光束参数乘积 Beam Parameter Product (BPP) 来评定光束质量。光束参数乘积的定义为光斑半径与发散半角的乘积: $\frac{\omega}{2} \times \frac{\theta}{2}$ 。可以分别计算出本文所选用的 mini-bar 的快轴 BPP 为 0.304 mm \cdot mrad,慢轴 BPP 为 109.083 mm \cdot mrad,两个方向上的光束质量极为不均衡。

BPP 评价方法可以用来判断光纤的容量,即进入光纤的最大光束质量。若光纤纤芯直径为 400 μm ,则可计算得出最大光束质量为 44.36 mm \cdot mrad。

由几何光学理论可知,发散光束经过一系列无像差光学系统变换,光斑的宽度和发散角度会发生变化。而根据拉格朗日不变量可知,光束的光束质量却不会发生改变。所以对一束发散光束,采用光束质量来判断其与光纤的匹配程度非常合适。如果入射光束在任何方向上的 BPP 值小于光纤的 BPP 值,在理想的情况下,通过光学系统的变换将光束宽度和光束的入射角调整到光纤的要求参数以内,光束能量就可以完全进入光纤并通过光纤进行传导^[6-7]。

半导体激光器慢轴方向上的 BPP 较大,较大

部分光束无法进入光纤,所以必须进行光束整形。

3 耦合设计及 ZEMAX 仿真模拟

采用 22 只 mini-bar 在快轴方向上组成的两列叠阵作为耦合光源。经过快、慢轴准直得到质量较高的光束,然后通过偏振合束、聚焦耦合进入 400 μm 芯径的光纤中。

首先进行快轴准直,快轴方向上一般采用平凸柱透镜进行准直,本文采用的是德国 LIMO 公司制造的焦距为 0.91 mm 的 FAC 850-D 快轴准直透镜。慢轴方向上一般采用平凸柱面微透镜阵列进行准直,其原理是利用透镜阵列增加每个发光单元的发光尺寸以达到较小发散角的目的。虽然未减小单个发光单元的 BPP,但是对于整个半导体激光器来说,准直前后光束的发光尺寸几乎不变,然而发散角却减小了,从而 BPP 也会减小,而且慢轴准直也可以在一定程度上提高光束的亮度^[7]。慢轴准直采用 LIMO 公司的焦距为 2.88 mm 的 SAC 100/500 慢轴准直透镜。将准直透镜的各项参数带入到 ZEMAX 光学设计软件中,并且利用非序列模式对 mini-bar 半导体激光器芯片进行准直系统的仿真模拟。当单个 minni-bar 通过快慢轴准直透镜后,快轴方向上的发光半尺寸是 0.414 mm,发散半角是 0.908 mrad;慢轴方向上的发光半尺寸是 1.2 mm,发散半角是 27.712 mrad。准直后的具体光束参数见表 1。

表 1 准直后的光束参数

	发光半宽度/ mm	发散半角/ mrad	BPP/ (mm \cdot mrad)
快轴	0.414	0.908	0.375
慢轴	1.200	27.712	33.254

从上述参数可以看出,单个 Mini-bar 的快轴方向的 BPP 远小于慢轴方向,所以采用快轴方向上的叠阵,二者的 BPP 更为接近。Mini-bar 叠加后,快轴方向上发光半尺寸为 5.409 mm,发散半角为 0.908 mrad。准直后,快轴方向发散角以很大的倍数被压缩。考虑到后面光学系统的光束发散角较小,此理论计算方法所出结果与实际模拟能很好吻合。慢轴方向准直前后的 BPP 变化很大,是由于加入了微柱透镜,减少了不发光面带来的 BPP 增加。图 1 为一组半导体激光器叠阵通

过准直系统后的在 ZEMAX 软件的非序列模式下的模拟光路图。

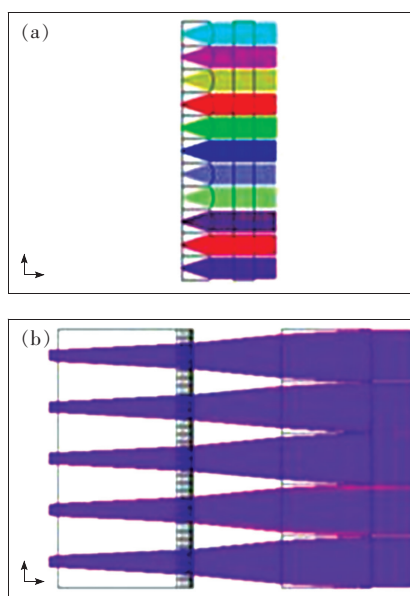


图 1 mini-bar 快慢轴准直光路图。(a) 快轴方向;(b) 慢轴方向。

Fig. 1 Fast-slow axis collimation of mini-bar. (a) Fast axis direction. (b) Slow axis direction.

当光束经过快慢准直镜时,由于表面反射,将会产生一部分损耗。透镜的材料为 S-TIH53, 折射率为 1.846 66, 未镀膜时的透射率为 91.154%, 镀上双层增透膜后的透射率可达到 99.5%。软件模拟结果表明,当一列叠阵通过准直系统后,其功率为 653.4 W, 准直系统的传输效率为 99%。

由于半导体激光器射出的光束具有偏振态, 因此利用这一特点, 可以将两组光束通过偏振合束方法合成一束。首先, 让其中一组光束通过一个半波片, 使其偏振态旋转 90°, 这就使两组光束具有了互相垂直的偏振态。然后将两列叠阵垂直放置, 就得到了在传播方向上相互垂直的两束光, 并在两组光束的交汇处倾斜放置一个 45° 的偏振合束镜。偏振合束镜的作用原本是将不同的偏振态从一束具有多偏振态的光束中分离出来, 合束的过程就是利用了偏振耦合镜这一特点的逆过程, 通过两组具有互相垂直偏振态的光束同时入射, 其中一组光束透射过偏振合束镜; 而另一组光束则被偏振合束镜反射, 两组光束就合成了一束光束。经过偏振合束镜的光束发光尺寸不变, 而光束的亮度和功率却增加了一倍。图 2 是在 ZE-

MAX 非序列模式下模拟出的准直系统和偏振合束的光路图。图 3 是半导体激光器偏振合束后的输出光斑图。

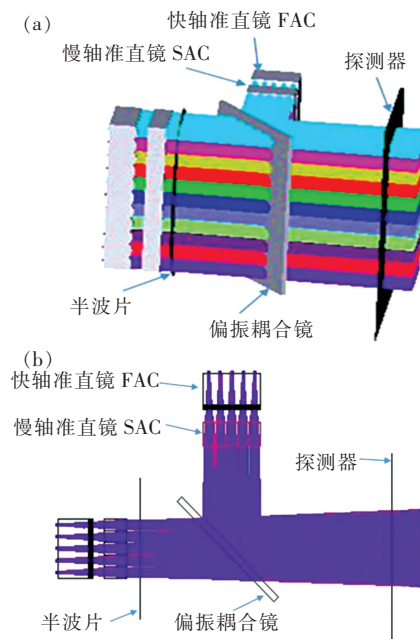


图 2 准直系统和偏振合束的光路图。(a) 3D 效果图; (b) 上视图。

Fig. 2 Fast-slow axis collimation and polarization combined beams. (a) 3D layout. (b) Top view.

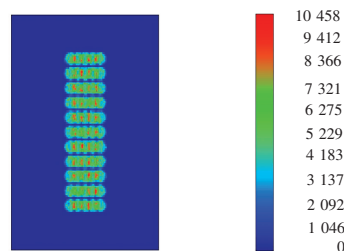


图 3 偏振合束后的光斑图

Fig. 3 Spot diagram after polarization combined beam

偏振合束镜的透射率大于 95%, 反射率大于 99%。软件模拟结果表明, 经过偏振合束后的光束功率为 1 267.5 W, 偏振合束镜的传输效率为 96.02%, 经过准直系统和偏振合束后的总体的损耗功率为 52.5 W。

合束后的光束需要进一步聚焦耦合进入光纤中。在耦合设计中, 已知参数为聚焦前光束的尺寸和发散角, 以及目标光纤的直径 d 和数值孔径 NA 。如图 4 所示, 聚焦前光束半宽为 h , 发散半角为 θ , 聚焦后光束半宽为 h' , 发散半角为 θ' , 要耦合进入目标光纤, 则有 (光纤最大入射角为 θ_{\max}):

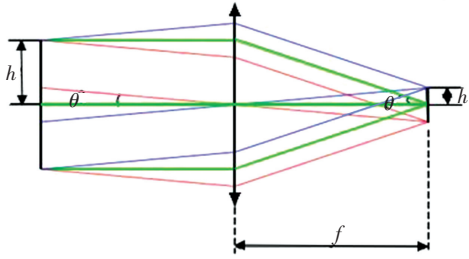


图 4 耦合镜聚焦示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the light beam focusing by coupling lens

$$h' \leq d/2, \quad (1)$$

$$\theta' \leq \theta_{\max}, \quad (2)$$

根据式(1)和(2)可知耦合镜的焦距需满足:

$$f \cdot \tan(\theta) \leq d/2, \quad (3)$$

$$f = \frac{h}{\tan(\theta')} \geq \frac{h}{\tan(\theta_{\max})}, \quad (4)$$

由式(3)和(4)可得耦合镜焦距的设计范围:

$$\frac{h}{\tan(\theta_{\max})} \leq f \leq \frac{d}{2 \tan(\theta)}, \quad (5)$$

将各参数代入式(5)可以分别得到快、慢轴方向上的耦合镜焦距范围:

$$24.01 \text{ mm} \leq f_{fa} \leq 270.64 \text{ mm}, \quad (6)$$

$$5.42 \text{ mm} \leq f_{sa} \leq 7.17 \text{ mm}. \quad (7)$$

由于快、慢轴两方向上参数计算出的耦合镜焦距范围无交集,所以无法利用同一焦距的耦合系统进行耦合,需要用柱透镜对快轴后慢轴方向上的光束尺寸和发散角进行调整,使其耦合镜焦距范围有重合部分。

若要慢轴方向上的耦合镜焦距范围与快轴有交集,则需要慢轴准直后的光束参数(光束发光半尺寸为 h_{sac} , 发散半角为 θ_{sac})满足:

$$\frac{d}{2 \tan(\theta_{\text{sac}})} \geq 24.01 \text{ mm}, \quad (8)$$

$$\frac{h_{\text{sac}}}{\tan(\theta_{\text{sac}})} \leq 270.64 \text{ mm}, \quad (9)$$

并且 $h_{\text{sac}} \cdot \tan(\theta_{\text{sac}}) = h_{\text{sa}} \cdot \tan(\theta_{\text{sa}})$, 因此求出准直后光束的发散半角范围为:

$$0.56 \text{ mrad} \leq \theta_{\text{sac}} \leq 8.33 \text{ mrad}. \quad (10)$$

经过慢轴方向光束调整后,其发散半角取 5 mrad, 则 $h_{\text{sac}} = 5.392 \text{ mm}$, 准直镜焦距 $f = 244.59 \text{ mm}$. 此时,调整后的慢轴耦合镜的焦距 f'_{sa} 的范围是:

$$24.66 \text{ mm} \leq f'_{\text{sa}} \leq 32.28 \text{ mm}, \quad (11)$$

慢轴方向调整后,快、慢轴两方向上的耦合镜的焦距交集为 24.66 ~ 32.28 mm。聚焦透镜拟选择 THORLABS 公司的 ACL3026 聚焦非球面透镜,其焦距为 26.5 mm。对非球面聚焦透镜进行模拟仿真,经过聚焦系统聚焦后光束发散角的数值孔径为 0.203, 小于光纤的数值孔径 0.22, 满足光纤耦合条件。并且聚焦光束的弥散光斑也小于光纤半径,满足高效率耦合要求。图 5 为 ZEMAX 光学设计软件模拟的耦合系统在快、慢轴两方向上的光路图。

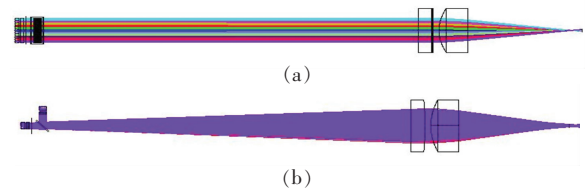


图 5 耦合系统光路图。(a) 快轴方向;(b) 慢轴方向。

Fig. 5 Schematic diagram of the coupling system. (a) Fast axis direction. (b) Slow axis direction.

耦合透镜也需通过镀增透膜的方式提高传输效率。软件模拟结果表明,经过耦合透镜后光束的输出功率为 1 241.9 W, 耦合系统的整体传输效率为 94.08%。

图 6 给出了 400 μm 光纤耦合端面的光束光斑图,可知,整体光纤耦合模块的输出功率为 1 218.7 W, 光纤耦合效率达 92.32%。

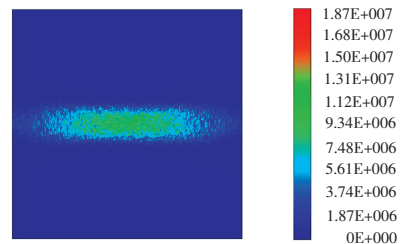


图 6 光纤端面处光斑图

Fig. 6 Optical fiber surface spot diagram

4 误差分析

在实际的半导体激光器光纤耦合系统的制备过程中,会存在一些误差,这些误差会影响到光纤耦合效果,降低光纤耦合的效率。

首先,“Smile”效应的存在就极大的影响了以半导体激光阵列为基础集成具有高光束质量的大功率半导体激光器的实际效果。Smile 效应是由巴条本身热膨胀系数失配和封装过程中巴条与热

沉之间热膨胀系数失配导致的热应力造成的。各个发光点不在一条直线上,从而导致半导体激光阵列整体发光弯曲。其增加了快轴准直镜的离轴像差,通常 $5\ \mu\text{m}$ 的“Smile”效应能使光束质量下降一倍,给半导体激光器的应用带来了不利的影响。“Smile”效应的出现受很多因素影响,半导体激光阵列生产过程中引入的缺陷、热沉材料的选择以及表面平整度、焊料的选择以及表面平整度、封装及应用过程中引入的应力等都是造成“Smile”效应的主要原因。就现有的封装技术和半导体激光阵列结构而言,“Smile”效应尚无法完全消除。

其次,在 mini-bar 安装过程中也会出现误差影响半导体激光器的光束特性。在安装过程中,由于散热片的加工误差使上下表面不平行、芯片焊接不平以及相邻巴条之间的绝缘处理等,将会导致叠加后的半导体激光器中各个 mini-bar 在垂直方向出现偏转。并且 mini-bar 在水平方向出现的旋转,也会导致光束在慢轴方向上的传播出现偏转。这些误差将会导致各 mini-bar 的子光束的传播方向不平行,准直性能下降,光束的发散角大于理想情况下的发散角。当单列 mini-bar 轴向偏移 $5\ \mu\text{m}$ 时,耦合效率降为 91.93% ,比理想状态下的耦合效率降低了 0.39% ;当单列 mini-bar 角向偏移 0.2° 时,耦合效率降为 91.59% ,比理想

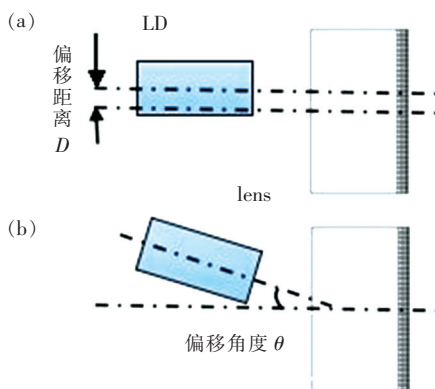


图 7 安装误差示意图。(a)轴向误差;(b)角向误差。
Fig. 7 Schematic diagram of installation error. (a) Axial error. (b) Angular error.

状态下的耦合效率降低了 0.73% 。图 7 为安装误差示意图。

5 结 论

通过 ZEMAX 光学设计软件模拟 mini-bar 叠阵的光纤耦合结构,采用非球面柱透镜及柱透镜阵列对 mini-bar 叠阵进行准直,并结合偏振耦合镜实现了两组叠阵的光束合束。在不改变发光尺寸的情况下,提高了发光光束的亮度,并将其高效率耦合进入芯径 $400\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤中。耦合模块的输出功率达到 $1\ 200\ \text{W}$,光纤耦合效率大于 92% 。

参 考 文 献:

- [1] Zhang Z J, Liu Y, Miao G Q, *et al.* The 2 kW semiconductor laser processing light [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2013, 34(3):334-339 (in Chinese).
- [2] Haag M, Khöhler B, Biesenbach J, *et al.* Novel high brightness fiber coupled diode device [J]. *SPIE*, 2007, 6456: 64560T-1-5.
- [3] Wolf P, Kohler B, Rotter K, *et al.* High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode lasers exceeding 1.2 kW of output power [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180E-1-5.
- [4] daSilva M G, Bastos A M, Sobrinho C S. Analytical and numerical studies of the performance of a nonlinear directional fiber coupler with periodically modulated dispersion [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, 12:148-161.
- [5] Zhang Z J. Research on High-power Semiconductor Laser Beam Combiner Technology and Application [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese).
- [6] Wang H L, Zhang D Y. Design of coupling system between fibers and laser diodes based on Zemax [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2011, 40(12):81-84 (in Chinese).
- [7] Strohmaier S, Tillkon C, Olschowsky P, *et al.* High-power, high-brightness direct-diode laser [J]. *Opt. Photon. News*, 2010, 21(10):24-29.
- [8] Zhu H B, Liu Y, Hao M M, *et al.* High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(11):1147-1151 (in Chinese).



杜洋(1989-),女,吉林舒兰人,硕士研究生,2012年于长春理工大学获得学士学位,主要从事高功率半导体激光器的研究。

E-mail: lianmaoxiyang@163.com



薄报学(1964-),男,河南淇县人,研究员,博士生导师,2002年于吉林大学获得博士学位,主要从事高功率半导体激光器的研究。

E-mail: bbx@cust.edu.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★中国科技期刊数据库源期刊
- ★荷兰 Scopus 数据库源期刊
- ★美国《化学文摘》(CA)源期刊
- ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊
- ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊
- ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊

报道内容:基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿,洽谈合作。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://www.chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn, zgxcn@126.com

联系电话: (0431)86176852; (0431)84627061 **传 真:** (0431)84613409

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)

《中国光学》编辑部