

文章编号: 0258-7025(2004)11-1296-05

# 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究

周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 杜春雷

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

**摘要** 从半导体激光器的光参数积出发, 给出了一种集光束准直、整形、聚焦及耦合的高功率半导体激光器阵列光束的光纤耦合方法。推导出了正交的两组准直微透镜阵列的面形公式; 计算了准直光束的准直精度和聚焦光学系统参数。作为例子, 给出一个光纤芯径为 800  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.37 的光纤耦合高功率半导体激光器实验结果, 其耦合效率大于 53%。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器阵列; 微透镜阵列; 光束准直; 光纤耦合

**中图分类号** TN 818 **文献标识码** A

## Analysis and Design of Fiber Coupled High-Power Laser Diode Array

ZHOU Chong-xi, LIU Yin-hui, XIE Wei-min, DU Chun-lei

(State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** A method to couple high power laser diode array (LDA) beams into a single multi-mode fiber which includes collimating, shaping, focusing and coupling is present based on the beam parameter product (BPP) of laser beam. The orthogonal surface equation of the collimating micro-lenses array is derived, the divergence angles after collimating and the parameters of the focused lens are calculated. As a example, a high power fiber coupled LDA module with the core diameter of 800  $\mu\text{m}$  and numerical aperture of 0.37 is gotten and the coupling efficiency is more than 53%.

**Key words** laser technique; laser diode array; micro-lenses array; beam collimating; fiber coupled

## 1 引 言

近年来随着大功率半导体激光器抽运的全固态激光器(DPL)和光纤激光器(FL)的快速发展, 高功率半导体激光器阵列(LDA)的需求越来越迫切。然而高功率的半导体激光器阵列的大面阵、大发散角、大像散(快轴方向为  $36^\circ \sim 40^\circ$  半峰全宽, 慢轴方向为  $8^\circ \sim 10^\circ$  半峰全宽)的特点成了其应用的瓶颈。除了极少数的应用, 如全固态激光器的侧面外, 大多数应用, 如半导体激光器的全固态激光器的端面、光纤激光器以及要求较高的侧面抽运都要求对半导体激光器阵列光束进行整形。

最主要的整形方法是把半导体激光器阵列的光束耦合到光纤, 从另一端输出。较早的方法是将一根光纤和半导体激光器阵列的每一个发光区一一

对应, 形成一捆光纤束。这种方法在大功率时需采用一大捆光纤束而光亮度并不大, 也难以对该光束进行进一步的整形来提高光亮度<sup>[1]</sup>。而半导体激光器抽运的全固态激光器抽运光的关键参数是光能量密度, 因此该方法已趋于淘汰。最有前途的方法是微透镜阵列光束整形。首先采用微透镜阵列将半导体激光器阵列光束准直成准直光束, 然后采用一些光学方法将光束整形, 改变其光参数积, 最后将整形光束聚焦耦合到光纤。该方法有如下特点: 可以改变光束的光参数积; 整形方法可以形成多个附加产品, 如准直光束、聚焦光束; 由于半导体激光器阵列都有有限的寿命, 采用光纤束方式, 一旦激光器损坏, 整个耦合系统就不能重新使用。而采用微透镜整形, 如更换激光器时, 整个整形系统可以重新利

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-10-20

**作者简介:** 周崇喜(1970—), 男, 云南省昆明市人, 中国科学院光电技术研究所副研究员, 博士, 主要从事微光学系统设计、制作及应用研究, 目前主要从事大功率半导体激光器阵列的微光学耦合及应用研究。E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn

用,只需略作调节即可,因此总体来说降低了成本。

## 2 光纤耦合半导体激光器阵列模块分析

光纤耦合输出激光光束的主要参数是光纤芯径和数值孔径。对于一定功率的光纤耦合半导体激光器,这两个参数直接决定了光束的亮度,根据简单的推导,即可近似得到光亮度的表达式

$$L = \frac{p}{(\pi\phi^2/4) \cdot 4\pi\sin^2(u/2)} = \frac{4p}{\pi^2\phi^2\text{NA}^2} \quad (1)$$

式中 NA 为光纤数值孔径; $\phi$  为光纤的芯径, $p$  为光纤的输出功率, $u$  为光学系统物方的孔径角。为了得到高亮度光纤,可提高输出功率或减小光纤的数值孔径和光纤芯径。由于亮度和芯径、数值孔径的二次方成反比,因此后者对提高光纤的亮度更为有效。现在普遍采用的光纤的数值孔径有 0.37, 0.22 和 0.11, 尤其 0.22 更为通用,光纤芯径为 1000, 800, 600, 400 和 200  $\mu\text{m}$ , 甚至 50  $\mu\text{m}$ , 所以提高光纤亮度的主要方法就是通过光束整形改变准直光束快慢轴方向的光参数积,增大快轴方向的光参数积并减小慢轴方向的光参数积以实现两方向的光参数积接近,最终实现小芯径的光纤输出。

对于一定芯径和数值孔径的光纤耦合光束而言,其耦合过程满足光参数积不变的原理。光参数积定义为光斑半径与该方向的半发散角的乘积。对于直径为  $2w_0$  圆形对称的光束,其远场发散角为  $2\theta$ ,该光束的光参数积为

$$\text{BPP} = w_0 \cdot \theta \quad (2)$$

这样式(1)可表达为

$$L = \frac{p}{\pi\text{BPP}^2} \quad (3)$$

由式(3)可知,对于一定结构的大功率半导体激光器阵列,其快、慢轴方向的光参数积是一定的。例如典型的 40 W 激光器阵列,见图 1,它是由 19 个发光区组成的一个阵列,每个发光区的尺寸为  $150 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ,间距周期为  $500 \mu\text{m}$ ,慢轴方向的总尺寸为 10 mm,快、慢轴方向发散角分别为  $36^\circ$ (半峰全宽)和  $8^\circ$ (半峰全宽),那么相应快、慢轴方向的光参数积分别为  $0.16 (\text{mm} \cdot \text{mrad})$  和  $99.5 (\text{mm} \cdot \text{mrad})$ 。理论上这样的光束是可以耦合到芯径为  $800 \mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.37(光参数积为  $148 (\text{mm} \cdot \text{mrad})$ )的光纤中的。但实际上,首先由于其发光区之间存在着较大的间隙,即占宽比小于 1,慢轴方向总长为 10 mm,因此光参数为  $350 (\text{mm} \cdot \text{mrad})$ ;其次快、慢轴方向上的光参数积相差太大;最后,由于发散角是定

义为半峰全宽,而设计、应用时的发散角远大于这个值,所以仅靠常规宏光学系统实际上是不能够实现这种耦合的。

由此可知,为了高效地将半导体激光器阵列光束耦合到光纤,快轴方向的光参数积已经可以满足耦合要求,仅需减小慢轴方向光束的光参数积。阵列型半导体激光器的阵列之间存在间隙的特殊结构,可以对其光斑进行整形。方法之一是在不增大总光斑尺寸的前提下减小光束发散角,采用微透镜阵列实现单个发光区的准直,即采用微透镜阵列单元填满各个单元之间的间隙,实现单个发光区的光斑口径增大,而整个慢轴方向上的光斑大小不变;方法之二是采用各种光束分割重排(即光斑整形),减小慢轴方向上的光斑尺寸,而保持发散角不变;方法之三是同时减小慢轴方向的光斑尺寸和光束发散角,既进行光束准直又进行光束整形。本文主要讨论采用微透镜阵列实现大功率半导体激光器阵列光束的准直、聚焦及与光纤的耦合,如图 2 所示。

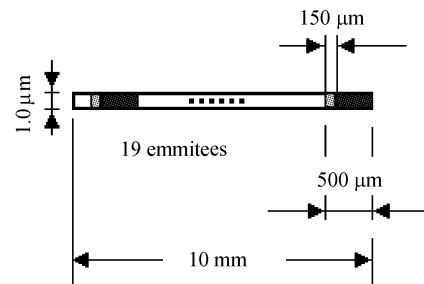


图 1 线阵半导体激光器阵列的结构示意图  
Fig. 1 Structure of the 40-W laser diode array

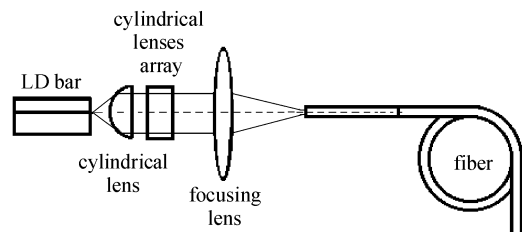


图 2 半导体激光器微透镜阵列准直、聚焦与  
光纤耦合方案

Fig. 2 Collimating, focusing and coupling LDA beam into multi-mode fiber using micro-lenses array

## 3 正交微透镜阵列对半导体激光器阵列光束的准直计算

### 3.1 快轴方向准直光束发散角计算

半导体激光器阵列由于其结构的特殊性决定了快、慢轴方向光束的不一致性。快轴方向光束为高

斯光束,其传播满足高斯光束传播规律。若采用单透镜准直高斯光束,透镜的前焦点置于高斯光束的束腰处可使准直达到最佳,其准直后的光束发散角理论极限为

$$\theta' = \frac{f}{F}\theta \quad (4)$$

其中  $\theta$  为待准直光束的远场发散角,  $\theta'$  为通过准直透镜后的远场发散角,  $f$  为高斯光束的瑞利长度(即共焦参数),  $F$  为准直透镜的焦距。

从式(4)看出,随着准直透镜焦距的增大,其发散角减小,但是焦距的增大带来一系列不利因素。快轴方向的大发散角导致焦距增大的同时必须增大微透镜的孔径,这样微透镜的制作将变得更加困难。实际上,由于快轴方向的谐振腔较小,其瑞利长度非常小,典型值约为  $1 \mu\text{m}$ ,那么根据式(4)计算可知,  $300\sim 500 \mu\text{m}$  焦距的透镜就足以满足  $0.2^\circ\sim 0.5^\circ$  的准直需要。

### 3.2 线阵慢轴方向的准直度计算

正如图 2 所示,慢轴方向是由  $N$  个线阵发光源构成,每个发光源长度为  $\delta$ ,间距为  $\Delta$ 。采用一个透镜和一个发光区一一对应进行准直。慢轴方向发光区为由多个点光源组成的线光源,采用一个微透镜对该线光源进行准直,光参数积为

$$J = n \sin u y = n \sin u \delta \cdot N/2 \quad (5)$$

$n, y$  分别为光学系统物方的折射率和光束大小。采用微光学透镜阵列准直后,一个发光区与一个微柱面透镜一一对应,此时经微透镜阵列准直后的光束的光参数积为

$$J' = n' \sin u' y' = n' \sin u' (N \cdot \Delta/2) \quad (6)$$

$n', u', y'$  分别为光学系统像方的折射率、孔径角和光束大小。准直过程应满足光参数积不变,即  $J' = J$ ,那么准直后的发散角为

$$\sin u' = \frac{n\delta}{n'\Delta} \sin u \quad (7)$$

可见采用微光学方法已经使系统孔径角减小,慢轴方向光束的理想准直度取决于半导体激光器阵列的结构,其具体关系见图 3。图中横坐标为发光区的周期和发光区尺寸之比,也就是空间占空比的倒数,当占空比越小,理想准直精度越高。

## 4 准直微透镜阵列设计

从上面的分析可以知道,为了追求高的准直效果,根据准直过程满足输入、输出光参数积不变的原理,应尽可能增大准直光束的口径。但是若增大口

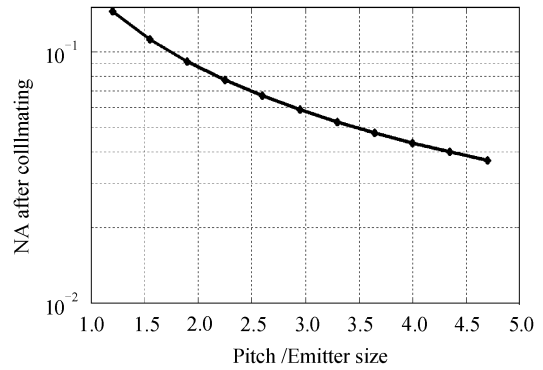


图 3 慢轴准直后理想发散角与半导体激光器阵列结构关系曲线

Fig. 3 Relationship between the divergence angle and the aspect rate of the slow axis beams

径,对快轴方向的光束而言,一方面增大了整个系统的体积,而且对后续的光束整形不利;另一方面,口径的增大将使透镜的矢高增大,增加了制作难度。对慢轴而言,由于其周期结构,各个发光区之间的间距有限,不可能无限制增加,否则各个发光区之间的光束产生混叠。因此快轴透镜的口径宜控制在  $300\sim 500 \mu\text{m}$ ,慢轴透镜的口径不超过其发光区的周期为宜。

快轴方向较大发散角的特殊性,使得常规球面透镜不能较好地校正球差,为了校正球差而又不至于增加过多的透镜片数,非球面透镜无疑是较为理想的。根据等光程原理,位于透镜焦点处的点光源发出的光束,经过一个非球面面形透镜后,要实现平行光输出,需满足等光程方程,见图 4。若入射、出射介质的折射率为  $n$ ,透镜的折射率为  $n'$ ,发光区点光源距透镜顶点的距离为  $l$ ,经过折射非球面后光束变成平行光束,那么等光程方程为<sup>[2]</sup>

$$n \sqrt{(l+z)^2 + \rho^2} + n'EG = nl + n'z + n'EG \quad (8)$$

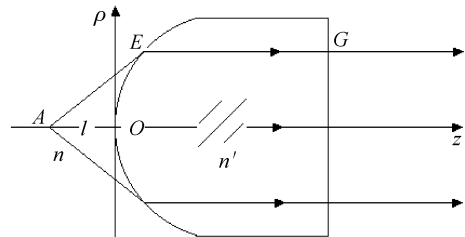


图 4 快轴方向准直透镜设计

Fig. 4 Aspherical structure of the fast axis micro-lens surface

最后整理得到

$$\frac{\left(z + \frac{nl}{n' + n}\right)^2}{\left(\frac{nl}{n' + n}\right)^2} - \frac{\rho^2}{\left[\left(\frac{n' - n}{n' + n}\right)^{1/2} l\right]^2} = 1 \quad (9)$$

从式(9)可以看出,该面形为二次双曲线柱面透镜。光学设计中二次曲面方程的一般表达式为

$$z = \frac{cv \cdot \rho^2}{1 + \sqrt{1 - cv^2(1 + cc)\rho^2}} \quad (10)$$

比较式(9)和(10)得到曲面方程的顶点曲率  $cv$  和非球面系数  $cc$  的表达式为

$$cv = \frac{1}{l} \cdot \frac{n}{n' - n}, \quad cc = \frac{n'^2 - n^2}{n^2} - 1 \quad (cc < -1) \quad (11)$$

慢轴方向由于发散角较小,因此采用常规的圆柱面、椭圆柱面、抛物线或双曲线柱面透镜对其进行准直,其产生的误差很小,图 5 为口径为 0.5 mm,焦距为 2.5 mm 的圆、椭圆、抛物线、双曲线柱面透镜的面形比较。从图中可以看出,这四种面形相差不大,采用任意二次曲面面形柱面透镜,均可对慢轴方向的光束进行准直。

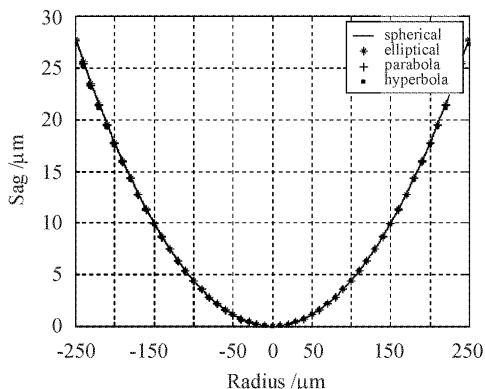


图 5 相同口径和焦距,不同面形准直慢轴透镜面形比较  
Fig. 5 Surface shape comparisons of several conic micro-lenses with the same focus length and diameter

### 5 光束的聚焦及与光纤的耦合

为了高效地将准直准平行光束耦合进入多模光纤,需采用一个高质量的聚焦耦合透镜,一般宜采用双胶合透镜将微透镜准直的准平行光束聚焦耦合进一定参数的光纤。首先,透镜的口径应大于输入光束的口径;其次透镜的像方数值孔径应小于光纤的数值孔径;最后关键的是聚焦光斑应小于光纤的芯径。设  $\theta$  为准直光束发散角,  $d$  为准直光束直径,那么透镜的口径  $D$  和焦距  $f$  的选择需满足以下条件

$$\begin{cases} D > d \\ \frac{d}{2NA} \leq f \leq \frac{\phi}{\tan(2\theta)} \end{cases} \quad (12)$$

### 6 实验及分析

为此设计了一套采用微透镜阵列实现芯径为 800  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.37 的线阵半导体激光器阵列光纤耦合系统,见图 6。线阵半导体激光器为 19 个发光区构成,额定输出功率为 40 W,每一个发光区长度为 150  $\mu\text{m}$ ,发光区间距为 500  $\mu\text{m}$ ,因此线阵发光区长度为 10 mm,在快、慢轴方向的发散角分

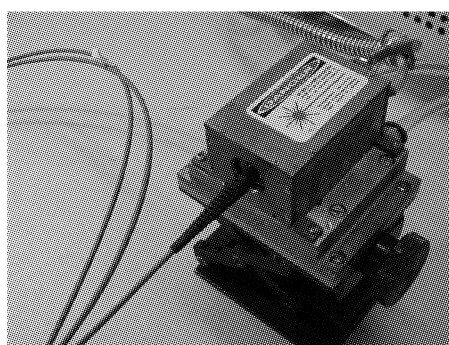


图 6 光纤耦合半导体激光器阵列  
(光纤芯径 800  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.37)  
Fig. 6 A fiber coupled LDA  
(core diameter of 800  $\mu\text{m}$  and NA of 0.37)

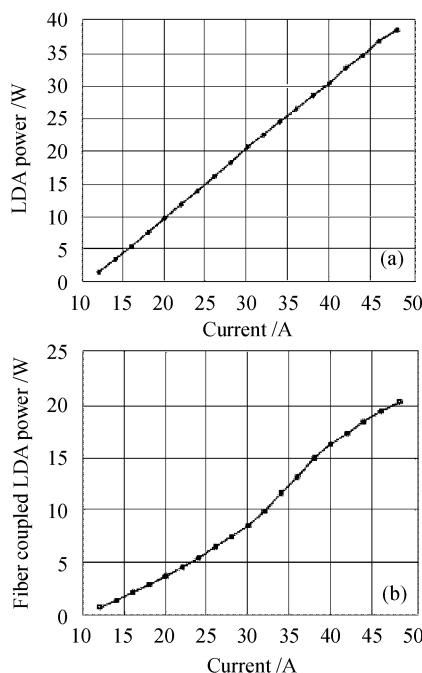


图 7 (a) 半导体激光器阵列和(b) 光纤耦合输出的功率-电流曲线

Fig. 7  $P$ - $I$  curves of (a) LDA and (b) fiber coupled LDA

别为  $8^\circ$  和  $36^\circ$  (半峰全宽)。准直微透镜的参数见表 1, 聚焦透镜为一个双胶合透镜, 通光口径为 12.7 mm, 焦距为 19 mm。图 7 为线阵半导体激光器的  $P-I$  曲线和光纤耦合输出的  $P-I$  曲线, 其耦合效率为 53.3%。实测效率低的原因首先是准直包络能

量快、慢轴方向仅有 85%; 其次各个透镜反射能量的损耗; 还有就是由于聚焦光斑较光纤芯径较大使得有一部分光能量没有耦合进光纤; 最后是耦合光纤端面的反射和端面的泄露损耗了一部分能量。光纤耦合输出激光的光亮度为  $10^4 \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ str})$ 。

表 1 线阵半导体激光器阵列准直微透镜阵列设计参数

Table 1 Optical parameters of collimating bar LDA microlens

Micro-lens type	Sur. No.	Radius	Thickness	Glass	Special type
Fast axis	1	0.118	0.26	Quartz	Hyperbola cylinder ( $cc = -2.11$ )
micro-lens	2	0	1.0	Air	Plane
Slow axis	1	1.27	2.87	Quartz	Parabola cylinder ( $cc = -1$ )
micro-lens	2	0	1.0	Air	Plane

## 7 结 论

微透镜阵列光束整形方法是实现高功率半导体激光器阵列光束准直整形、与光纤耦合的一种很有前途的方法, 它能减小半导体激光器慢轴方向的光参数积, 对实现高亮度的光纤耦合半导体激光器较为有利。随着光束变换方法与技术的不断完善, 将有望实现光纤芯径为  $100 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22 的更高

亮度、更高耦合效率的半导体激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 Peter Yang Wang. Beam-shaping optics deliver high-power beam [J]. *Laser Focus World*, 2001, 37(12):115~118
- 2 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1988. 16  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 16

## 欢迎订阅 2005 年《硅酸盐学报》

《硅酸盐学报》是中国硅酸盐学会主办的有关无机非金属材料领域的综合性学术期刊。1957 年创刊, 国内外公开发行人。《硅酸盐学报》为 EI 核心期刊, CA, SA, PJK 收录期刊。

《硅酸盐学报》的任务是报道水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、人工晶体及非金属矿等各专业在科研、教学、生产、设计方面具有创新性的研究成果, 以促进国内外学术交流, 为我国四个现代化建设服务。读者对象主要是有关专业工作者及大专院校师生。

《硅酸盐学报》具有正式广告经营许可证。证号为: 京海工商广字 0583 号。承办上述专业有关的国内外广告、发布外商来华广告。包括单位介绍和新研究成果、新材料、新产品、新工艺介绍、科技简讯等。《硅酸盐学报》竭诚为各界服务。

《硅酸盐学报》为月刊, 国际标准大 16 开, 正文 128 页, 单价 25 元, 全年 12 期共 300 元。邮发代号 2-695。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与编辑部联系。

地址: 北京百万庄中国硅酸盐学会《硅酸盐学报》编辑室 邮编: 100831  
电话: (010)88376444 传真: (010)68342016  
E-mail: jccs@ceramsoc.com  
Http://www.ceramsoc.com