

# 基于微透镜阵列的高效率光纤耦合系统设计

王艳红 王海伟 王高

中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 光纤耦合是半导体激光器集成光源进一步改善输出光束质量和远距离传输的重要手段。然而,由于半导体激光器单管体积和散热的限制,合成后激光光源的输出光束光参量积仍较大,不利于与单根多模光纤的耦合;直接与光纤束耦合又受到光纤束填充比的限制。针对多个半导体激光器单管集成的光源,采用倒置前端光学放大系统,对合成光束直径进行压缩;并采用六方排列的微透镜阵列作为耦合元件,使其光瞳成像在光纤端面,从而实现微透镜与光纤的一对一耦合,得到理论无损耗的高效光纤耦合系统。为了改善光场边缘像差影响,采用空心光管进一步匀化光场分布,且减小了边缘光线的发散角,提高了边缘光线的成像质量,优化后的系统耦合效率达98%。这一系统利用微透镜阵列将光束分束、成像,克服了集成光源输出光束光参量积较大不易与单根光纤耦合的缺点;通过使微透镜的入瞳成像在光纤端面,且光纤束的排列与微透镜阵列排列相同,提高了光束与光纤束的耦合效率。

**关键词** 光学设计;半导体激光光源集成;光纤耦合;微透镜阵列;填充比

**中图分类号** TN25      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.041401

## Design of High Efficiency Fiber Coupling System Based on Microlens Array

Wang Yanhong Wang Haiwei Wang Gao

*Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

**Abstract** The fiber coupling is an important method of semiconductor laser integration for improving light beam quality and remote communication. But due to the limits of semiconductor laser volume and thermal dissipation, the output light after integration of laser has still larger beam parameter product (BPP), which is not easy to couple with a single multimode fiber. The packing ratio of fiber bundle is another factor to limit direct couple with fiber bundle. In order to get high efficiency couple integration light source of multi semiconductor laser into fiber bundle, optical amplify system is adopted to compress the beam diameter. Microlens array is used as coupling element, which makes the pupil of lenslet image on the end of fibers. One-to-one coupling is achieved and a fiber coupling system with no loss in theory is come ture. To improve aberration effect due to rim ray, hollow light pipe is employed to further homogenize light field. Furthermore, divergence angle of rim ray is reduced and its imaging quality is improved. The coupling efficiency of optimized system can be up to 98%. The system utilizes microlens array for beam splitting and imaging, which overcome the shortages of larger BPP and not easy to couple with single fiber. The system makes the pupil of microlens to image at the end of fibers and gets the same arrange spots image with that of the fiber bundle, thus, coupling efficiency of both light beam and fibers are improved.

**Key words** optical design; semiconductor laser integration; fiber coupling; microlens array; packing ratio

**OCIS codes** 140.3290; 060.2310; 220.2740

## 1 引言

半导体激光器由于具有电光转换效率高、波长覆盖范围广、可靠性高、体积小和成本低廉等特点,使得

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2014-11-03; 网络出版日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(11304289)、中国博士后科学基金(2012M510787)、校青年基金

作者简介: 王艳红(1978—),女,博士,讲师,主要从事光纤传感及激光光束整形方面的研究。

E-mail: wanyanhong@nuc.edu.cn

它在材料加工、生物医疗、军事防御和抽运等领域应用时具有非常明显的优势。但由于单管半导体激光器(LD)的输出功率受限于数瓦量级<sup>[1]</sup>,远不能满足如光纤激光器抽运源、材料加工、激光投影等的高功率要求,必须进行激光合束。将半导体激光阵列出射的激光通过光束整形<sup>[2]</sup>和合束<sup>[3]</sup>技术等将它耦合到光纤从而提高输出功率和亮度,既可以利用光纤的柔性传输,增加使用的灵活性,又可以从根本上改善半导体激光器的输出光束质量,是将半导体激光应用于这些领域的主要途径<sup>[1,4]</sup>。

有直接利用光纤作为合束元件的方法<sup>[5-6]</sup>,即将二极管激光器与光纤一一耦合,然后将光纤合束。这样的方法仅适合光纤数量较小的场合。当需要耦合的二极管激光器个数较多时,所需要的光纤数量也增多,则光纤束的输出端面面积也非常大,且存在光纤与光纤的不发光暗区。因此,对于大功率的集成激光光源,首先利用空间合束,然后将合束后光束耦合进入光纤的方法是较可取的方法<sup>[7]</sup>。但由于半导体激光器具有一定的体积(如TO18封装为5.6 mm外径)及其散热空间的要求,当多个半导体激光器进行光束整形和空间合束后,输出的激光光束仍然具有较大的光束直径。如本实验室利用阶梯折反镜合成的30 W光源,输出光斑直径有46 mm。这一直径的光束的光参量积较大,耦合进入传统多模光纤传输是较困难的。为了增加光纤端面的接收面积,多采用光纤束代替单根光纤。但光纤束存在光纤与光纤之间的暗区,直接使光耦合进入光纤束端面,会有很多光泄露,降低耦合效率。为了克服这一缺点,本文通过倒置光学放大系统,将合束后的激光光束直径进一步压缩,提高发光区域填充比;进一步利用微透镜阵列,将光束分配在每个小微透镜的入瞳,并将入瞳成像在光纤端面上,从而提高光纤耦合效率。

## 2 半导体激光光束的光参量积

根据ISO-11146标准,激光器的光束质量由光参数积(BPP)来计算:

$$m_{\text{BPP}} = \omega_0 \theta / 2, \quad (1)$$

式中 $\omega_0$ 为激光器的束腰半径, $\theta$ 为激光器的远场发散角。BPP值越小表明光束质量越好。光参数积的最小值称之为衍射极限,对一定波长 $\lambda$ 而言,其衍射极限为: $m_{\text{BPP}} = \lambda / \pi$ 。

对于单个二极管激光光源,如发光面积为 $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,快轴( $X$ )和慢轴( $Y$ )的半发散角分别为 $35^\circ$ 和 $7.5^\circ$ ,则:

$$m_{\text{BPP}_x} = 0.305 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (2)$$

$$m_{\text{BPP}_y} = 6.545 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (3)$$

可见半导体激光器的快轴光束质量很好,达到衍射极限。而在集成的空间结构中,由于较低的填充因子(发光区与总光源区域比值),使得快轴方向的光参量积很大,牺牲了快轴较好的光束质量。因此,提高快轴方向填充因子是提高集成光束质量的关键。

如图1所示为 $4 \times 4$ 二极管激光器单管合束前的结构和尺寸,其中,单管间的尺寸由单管体积和散热要求确定。每个单管光源波长为 $638 \text{ nm}$ ,快轴和慢轴半发散角分别为: $35^\circ$ 和 $7.5^\circ$ 。未准直前,计算得快轴光参量积为 $9053 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,慢轴光参量积为 $2333 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。导致光参量积大的原因是不发光区大,填充因子 $F$ 小。其中,快轴填充因子 $F_{\text{fast}}=0.00125$ ,慢轴填充因子 $F_{\text{slow}}=0.01$ 。

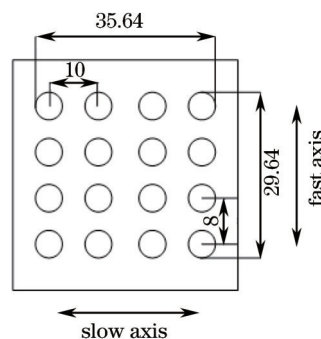


图1 光源阵列排布

Fig.1 Light source array arrangement

图2所示为此光源的准直和空间合束系统。每个二极管激光器单管对应一个非球面准直透镜,其有效通光孔径为1.50 mm、焦距1.49 mm、工作距离为1.1 mm的非球面透镜。由于二极管激光器自身体积及散热空间要求,限制了二极管的进一步紧凑排列,使得合成光斑在慢轴方向间隔较远。45°阵列排布的反射镜可以进一步提高光斑的密集度。如图2所示,每个激光束对应一个45°放置的反射镜,由准直透镜输出的激光束经反射镜后镜面反射到90°方向,光斑间隔得到一定压缩。

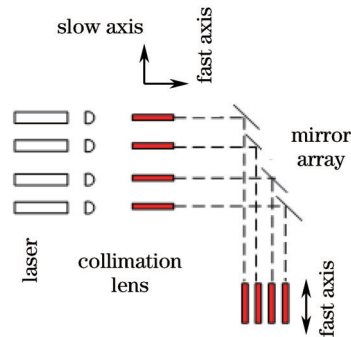


图2 集成光源部分光路示意图

Fig.2 Optical path diagram of integration light source

经图2系统非球面准直镜准直后的快慢轴方向剩余半发散半角均小于 $0.5^\circ$ ;阶梯反射镜系统对光束空间距离压缩后,两方向光参量积分别为 $m_{\text{BPP}_x} = 135 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,  $m_{\text{BPP}_y} = 149 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。由于光斑为方形,所以对角线光参量积为两方向的均方根值,为 $201 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

在不考虑聚焦系统像差和元件装调、加工误差的情况下,需要的光纤光参量积也要 $201 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。若选择光纤的数值孔径为0.37,则光纤的芯径要1.088 mm。而在实际设计光学系统时,由于像差的影响,光纤的直径要达2 mm才能满足耦合效率要求。这样直径的光纤性能较脆,不适合远距离和柔性传输。

### 3 基于微透镜阵列光纤耦合系统

为了增加柔韧性,利用集束光纤(多个小芯径光纤集成)是较好的选择。但由于集束光纤存在光纤与光纤之间的暗区,直接将光汇聚耦合会使很多光由暗区泄漏,降低耦合效率。因此,采用微透镜阵列系统,实现多个光斑与光纤的一对一耦合。

#### 3.1 光学系统光线原理

如图3所示,经过准直和空间合束后的光源,不同激光器的主光线仍有间距的分布,设剩余发散角为 $\pm 0.5^\circ$ ,所有激光器的上边缘光线相互平行,下边缘光线相互平行。为了进一步增加集成光源的填充因子,使用倒置前置放大系统,将光束直径进一步压缩。当压缩后密集光经过微透镜时,微透镜入瞳处的所有光线都汇聚

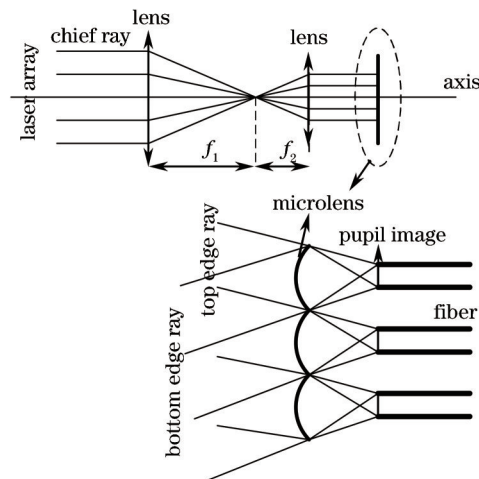


图3 微透镜光纤耦合系统设计光线理论

Fig.3 Ray theory of microlens fiber coupling system design

在上下边缘光线的成像点之内。只要设计微透镜,使入瞳像成像在光纤端面上,且控制成像范围小于光纤纤芯直径即可。

### 3.2 光学系统设计

根据以上设计原理,利用Zemax光学设计软件设计系统。由于正六方排列的光纤束较为牢固,因此,微透镜阵列采用正六方型排列,光纤束排列与之相同。仿真系统采用探测器代替光纤束端面。

光学系统图如图4所示。经过空间合束的激光束,再次经过倒置望远系统进行压缩,使光束分布更密集,但光束发散角相对增大。倒置望远系统的放大率为5倍,到达微透镜阵列的光斑直径约4 mm。单个微透镜为孔径2 mm,焦距5 mm的球面平凸微透镜。图5为探测器在微透镜后的成像光斑。

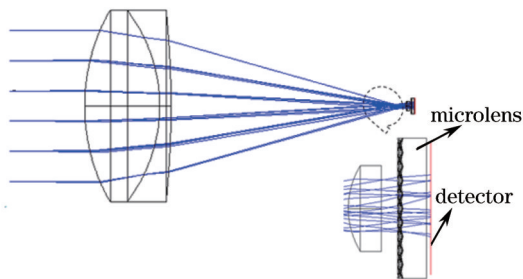


图4 不加光管光学系统图

Fig.4 Optical system diagram without light pipe

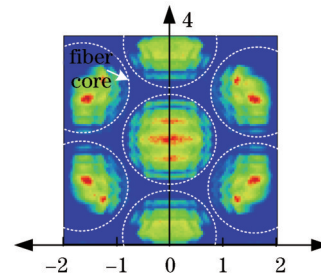


图5 不加光管时的探测器输出光斑

Fig.5 Spot diagram of detector without light pipe

从图5光斑看,边缘光线的畸变较大。这是因为,虽然系统的光斑直径经过前置放大系统的压缩,填充因子有所增加。但由于边缘光线的发散角较大,导致像差较大,光斑直径较大。从图5可以看到,采用图4的光学系统,每个微透镜成像光斑尺寸约800  $\mu\text{m}$ 。即使采用较小孔径的微透镜,边缘处的成像光斑也大于100  $\mu\text{m}$ ,用普通的62.5  $\mu\text{m}$  芯径的多模光纤接收耦合效率较低。

为了优化系统边缘视场的像差,且使输出光束的光线分布更均匀,采用较大截面的空心圆柱光管<sup>[8]</sup>进行匀光和发散角压缩后,再利用微透镜阵列成像。光学系统如图6所示。

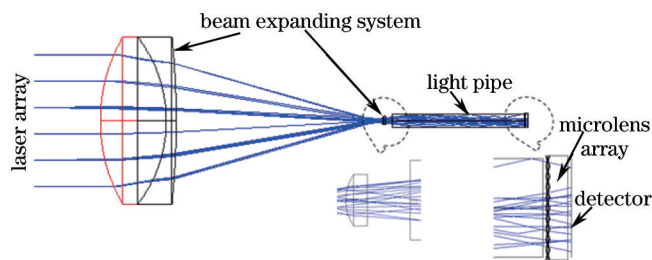


图6 加光管的光纤耦合系统

Fig.6 Fiber coupling system with light pipe

在倒置光学放大系统的后级,加入直径6 mm的圆柱形光管。圆柱形光管的横截面积大于光管入射端的光束截面积,从而圆柱形光管的输出端不但得到较均匀的光斑分布,且边缘光线发散角相应减小。

将光管输出端放置在微透镜入瞳,使其成像在光纤端面(即探测器)。图7即为加光管的光纤耦合系统的输出光斑图。除去边缘视场的杂散光,光斑大小约50  $\mu\text{m}$ ,与普通多模光纤(芯径62.5  $\mu\text{m}$ )耦合时效率较高。图中“1”位置约有24%的光能量,第二圈“2”共约41%的光能量,第三圈“3”约25%光能量,最外层的杂散光“4”约10%。所用光纤为芯径62.5  $\mu\text{m}$ 、数值孔径0.22的多模光纤,光纤总数为按六方形排列3环(19根光纤),耦合效率大于85%。从图5和图7可以看出,采用同样的微透镜阵列参数和结构,加入截面积较大的光管后,经过微透镜成像效果较好,光斑小,耦合效率高。这里的微透镜面型为球面,利用非球面很容易进一步改进系统像差,并且透镜镀膜可以去除杂散光。

为了进一步减小成像光斑直径,单个微透镜参数改为0.5 mm孔径、焦距1 mm的非球面透镜。部分成像光斑图如8所示。从图8中知,每个成像光斑尺寸小于20  $\mu\text{m}$ 。光纤仍采用芯径62.5  $\mu\text{m}$ 、数值孔径0.22的多模光纤,所需光纤总数为按六方形排列7环(127根光纤),耦合效率达98%。

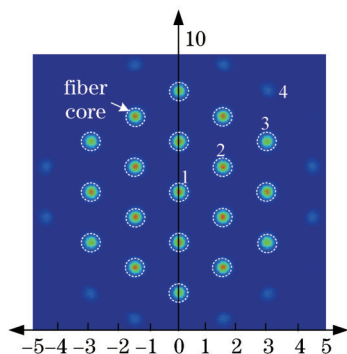


图7 加光管探测器输出光斑

Fig.7 Spot diagram of detector with light pipe

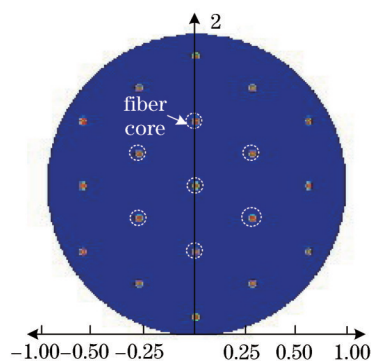


图8 加光管探测器输出光斑(部分)

Fig.8 Spot diagram of detector with light pipe (partial)

## 4 结 论

基于微透镜阵列的光纤耦合系统,适合于大功率集成激光光源与光纤束的耦合,是切实可行的。它解决了集成光束直接与单根光纤耦合光参量积较大,而直接与光纤束耦合的光纤束暗区漏光问题。系统的设计具有灵活性,可根据光源和光纤的条件灵活设计。在实际应用中,由于像差的存在,成像质量较差。利用空心光管可以匀光且降低边缘光线的发散角,提高整个系统的成像质量,大大提高光纤耦合效率。光纤的芯径大小和排列方式决定了微透镜阵列的面型和透镜阵列排列方式。微透镜的面型可根据光纤芯径的要求设计,微透镜的总数量可根据光源光束孔径设计。这一系统为大孔径光束(尤其是空间合束后的填充因子不高的集成光源)的光纤或光纤束耦合提供了高效率、灵活适用的解决途径。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Hongbo, Liu Yun, Hao Mingming, *et al.*. High efficiency module of fiber coupled diode laser [J]. Chinese J Luminescence, 2011, 32 (11): 1147-1152.  
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): 1147-1152.
- 2 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three wavelength multiplex [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402011.  
张俊, 彭航宇, 刘云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 040201.
- 3 Nie Shuzhen, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on diffractive optics technology for laser beam shaping [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s105001.  
聂树真, 余锦, 樊仲维, 等. 衍射光学用于激光光束整形技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s105001.
- 4 Yan Changling, Lu Ping, Liu Deming, *et al.*. Design of micro lens arrays coupling with fiber arrays and analysis of the coupling loss [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17 (9): 1043-1048.  
阎嫦玲, 鲁平, 刘德明, 等. 与光纤阵列耦合的微透镜阵列设计与损耗分析[J]. 光电子·激光, 2006, 17 (9): 1043-1048.
- 5 Bolesh J Skutnik, Holly Park. Fiber coupling of laser diode arrays for high brightness: cladding considerations [C]. SPIE, 2002, 4629: 86-94.
- 6 Matthias Haag, Bernd Kohler, Jens Biesenbach, *et al.*. Novel high-brightness fiber coupled diode laser device [C]. SPIE, 2007, 6456: 64560T.
- 7 Stefan Heinemann, Boris Regaard, Torsten Schmidt, *et al.*. High brightness, fiber coupled single emitter arrays [C]. SPIE, 2009, 7198: 71980Q.
- 8 Zeng Shanshan, Liu Jian, Lu Ligen, *et al.*. Experimental research on improving uniformity of fiber-optical irradiation device [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422004.  
曾珊珊, 刘建, 卢利根, 等. 改善光纤照射装置均匀性的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422004.

栏目编辑: 韩峰