

# 大功率半导体激光器光纤耦合模块的耦合光学系统\*

陈少武 韩 勤 胡传贤 金才政

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

**摘要:** 针对 808nm 大功率 GaAs/GaAlAs 半导体量子阱激光器的远场光场分布特点, 提出了与多模光纤耦合时对耦合光学系统的特殊要求, 并根据低成本、实用化的要求设计制作了专用的耦合光学系统, 对耦合光学系统的实际性能进行了测试, 给出了耦合效率统计分布图、耦合偏差曲线和高低温可靠性实验结果。用设计制作出的实用化耦合光学系统完成了输出功率 15—30W, 光纤束数值孔径为 0.11—0.22 的半导体激光光纤耦合模块, 模块的使用结果表明耦合光学系统稳定、高效、实用。

**关键词:** 半导体激光器; 光学系统; 光纤; 可靠性

**EEACC:** 4320J; 4125; 0170N      **PACC:** 4260B

**中图分类号:** TN 253      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2001)12-1572-05

## 1 引言

目前, 半导体激光器在信息、能源、医疗、材料、娱乐等诸多领域都得到了越来越多的应用, 材料和器件的水平也有了长足的进展<sup>[1,2]</sup>。在相当多的应用中, 半导体激光器都要和光纤或光纤束耦合为一体, 例如光纤通信中的光发射模块或半导体光放大器, 自然要求半导体激光器(放大器)和单模光纤耦合在一起, 在这方面国内华中理工大学进行了半导体激光放大器输出耦合方式的研究, 获得了 50% 的耦合效率<sup>[3]</sup>。另一些应用领域如半导体激光手术刀、全固态激光器的半导体激光泵源<sup>[4,5]</sup>、用于材料加工处理的半导体激光系统等, 均需要和光纤(束)高效率耦合起来。这主要有两方面的实际意义: 其一是光纤柔软易弯曲, 激光可以方便灵活地通入到窄小空间; 其二是光纤耦合不仅可以从根本上改善输出光束的质量, 同时还可以采用多光纤集束使输出功率得到相对于单管数十倍的提高。但是, 半导体激光器由于其特殊的有源区波导结构, 其输出光束的质量往往很差, 从而对耦合光学系统的设计提出了特殊的要求。进一步要求耦合光学系统不仅耦合效率高, 而且稳

定可靠、工艺简化实用, 则耦合设计更具挑战性。国内的研究绝大多数集中在半导体激光器和单模光纤的耦合方面, 目前我们还没有看到有关大功率半导体激光器和多模光纤耦合方面的公开研究报道。从国外一些研究机构公开报道的研究论文看<sup>[6-8]</sup>, 或多或少都存在着系统结构复杂难以实用化的问题, 基本上处于实验室研究的水平。而国外一些著名半导体激光器专业制造厂商如 SDL、Coherent、Opto Power 等均有产品投放市场, 但一方面就 10W 以上模块对我国实行禁运限运, 另一方面对耦合技术严加保密, 在公开发表的学术论文中无法了解其耦合关键技术。本文总结了我们承担的“863”课题研究成果, 报道大功率半导体激光器光纤耦合模块的耦合光学系统设计和实验研究结果。

## 2 大功率半导体量子阱激光器的光场分布特点和耦合光学系统的设计考虑

为使问题重点突出并简明起见, 这里我们忽略大功率半导体量子阱激光器复杂的具体结构细节, 而将其简化为一个三层平板波导, 中间的薄层为有

\* 国家“863”计划 715 主题资助项目(课题号: 863-715-Z35-3B)。

陈少武 男, 1968 年出生, 副研究员, 博士, 主要从事大功率半导体激光器光纤耦合模块和光纤通信用高速光发射模块的研究。

2001-02-27 收到, 2001-05-30 定稿

©2001 中国电子学会

源层, 层厚为  $1\mu\text{m}$ , 宽度为  $100\text{--}150\mu\text{m}$ . 由于光场在平行于 PN 结平面的方向上受到限制, 因此在该方向上由衍射引起的光场发散程度大, 输出光斑为一狭长的椭圆形, 图 1 是我们用远场扫描法测出的 808nm 大功率 GaAs/GaAlAs 半导体量子阱激光器的远场光场分布图, 在平行于 PN 结方向上(称为输出光束的慢轴)的发散角(FWHM 值)通常为  $6^\circ$ , 在垂直于 PN 结方向上(称为输出光束的快轴)的发散

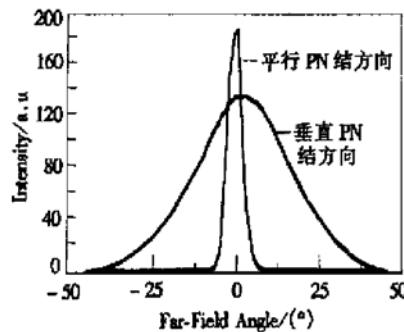


图 1 808nm 大功率半导体激光器远场光强分布测试曲线

FIG. 1 Far-Field Intensity Profile of 808nm High Power LD

角通常为  $36^\circ$ . 而多模光纤的基模场分布具有圆对称性, 其模场和 LD 出光面的近场模场严重失配. 光纤的导光能力用数值孔径 NA 表征, 若直接将 LD 和多模光纤平面对接耦合(即 Butt-joint coupling), 当 LD 输出光束的快轴发散角超出光纤的数值孔径角时, 就会引起传输损耗, 光纤的数值孔径越小, 耦合损耗就越大. LD 输出光束的另一个特点是光束存在较大的像散, 是指光束在快轴和慢轴方向上发散中心的不重合. 为了得到高耦合效率, 必须采用合理的耦合光学系统对 LD 的光束进行整形变换. 实际情况是 LD 光束慢轴发散角小于光纤的数值孔径角, 快轴发散角大于光纤的数值孔径角, 因此我们总结出以下几条耦合光学系统的设计原则:

(1) 光学系统在快轴和慢轴方向上应具有不同的焦距, 或引入某种非成像的非对称结构(如光楔、棱镜、光栅等), 以校正光束的像散;

(2) 在光纤芯径要求较小的情况下应采用非球面透镜, 以求尽量消除球差, 获得较小的聚光半径;

(3) 耦合光学系统不仅有很高的耦合效率, 而且还应具有较大的耦合容差, 以便降低耦合难度, 提高成品率;

(4) 耦合光学系统应微型化, 并与我们掌握的全

金属化耦合焊接工艺相兼容;

(5) 在满足要求的前提下, 应尽量简化耦合光学系统, 减少元件数量, 并设法将数个元件集成一体, 一方面降低成本, 另一方面可减少不可靠环节, 提高长期稳定性.

以上几点是一般性原则, 具体设计应结合光纤数值孔径、光纤芯径、器件体积、成本等情况具体考虑.

### 3 中等数值孔径光纤耦合光学系统

中等数值孔径光纤是指 N.A. 在  $0.22\text{--}0.38$  范围内的光纤, 对于这类光纤的耦合, 我们设计出一种球顶锥形侧面的耦合光学结构, 球顶曲面用来对光束慢轴方向进行准直, 锥形侧面用来对光束快轴发散进行压缩. 考虑图 2 所示一段锥形侧面光纤, 通

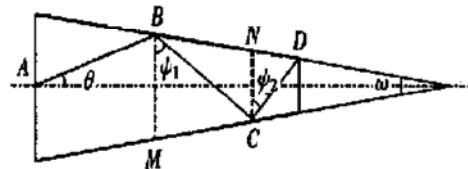


图 2 光线在锥形侧面光纤中的传播

FIG. 2 Lightwave Propagation in Wedge-Shaped Fiber

过几何光学分析, 光线在锥形侧面上连续反射  $n$  次后与光纤轴向的夹角  $\theta_n$  为:

$$\theta_n = 90^\circ - \psi_n = \theta + n\omega \quad (1)$$

式中  $\theta$  为光线和光纤轴的初始夹角;  $\omega$  为光锥锥顶角. 光线经锥顶端面折射后与光纤轴向的夹角  $\psi_n$  为

$$\psi_n = \arcsin \left[ \frac{n_1}{n_0} \sin(\theta + n\omega) \right] \quad (2)$$

锥形侧面光纤的有效数值孔径  $NA_{\text{eff}}$  为

$$NA_{\text{eff}} = \sin \theta_n = \frac{n_1}{n_0} \sin(\theta + n\omega) \quad (3)$$

从以上分析可知, 当光线由锥顶一方入射时, 原先超出光纤数值孔径角的大角度光线(对应于多模光纤的高次模), 经光纤锥形侧面多次反射后, 光线与光纤轴向的夹角逐渐减小, 当减小到光纤的数值孔径角以内时, 原来的高次漏模就变成为导模, 锥形侧面光纤起到一种模式变换器的作用, 具有增大光纤有效数值孔径, 压缩光线发散角, 提高耦合效率的特性. 图 3 是和 LD 耦合实测得到的耦合效率在  $xyz$

三维方向上的变化曲线,可以看出,耦合效率对快轴方向的位置偏差最为敏感,对光纤轴向的位置偏差最不敏感,对慢轴方向的位置偏差敏感程度居中,当三个方向上耦合效率下降 50% 时,对应的位置偏差分别为 75、24 和 300  $\mu\text{m}$ .

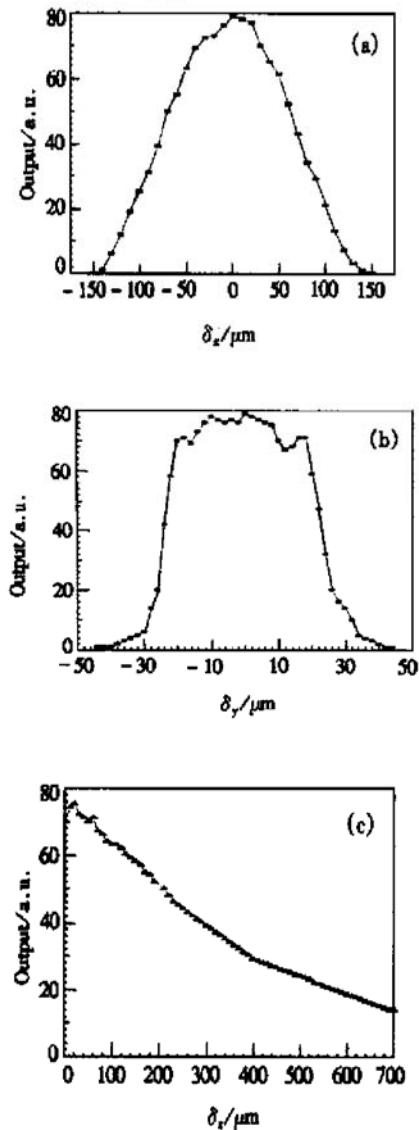


图 3 (a) 光纤耦合输出在  $x$  方向的变化; (b) 光纤耦合输出在  $y$  方向的变化; (c) 光纤耦合输出在  $z$  方向的变化

FIG. 3 (a) Fiber-Coupled Output vs  $\delta_x$ ; (b) Fiber-Coupled Output vs  $\delta_y$ ; (c) Fiber-Coupled Output vs  $\delta_z$

图 4 是随机抽取 60 个耦合光纤样本的耦合效率统计分布图. 最大耦合效率为 92%, 最小耦合效率为 81%, 平均耦合效率为 88%. 我们用这种耦合技术研制成功两台光纤数值孔径为 0.22, 输出功率大于 15W 的大功率半导体激光器光纤耦合模块.

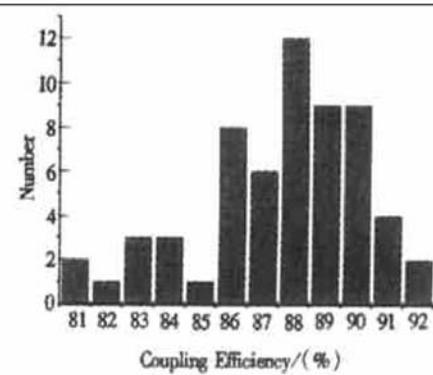


图 4 抽样测试光纤耦合效率分布

FIG. 4 Statistical Distribution of Coupling Efficiency

#### 4 超低数值孔径光纤耦合光学系统

超低数值孔径光纤是指 N. A. 小于 0.22 的光纤, 我们根据要求研究了数值孔径低达 0.11 的光纤耦合. 由于这种光纤的接受角很小, 仅为  $11^\circ$ , 因此耦合极为困难, 用前面提到的球顶锥形侧面方法不能得到高耦合效率, 必须设计专用的耦合光学系统. 图 5 是我们设计的耦合光学系统示意图. 耦合系统引入了一个微透镜( $\mu$ -Lens), 位于 LD 芯片前适当位置, 并采用金属化焊接工艺加以固定. 微透镜用来准直快轴方向的发散光束, 其后再对接耦合端面已成球面的光纤, 光纤同样用金属化焊接工艺加以固定.

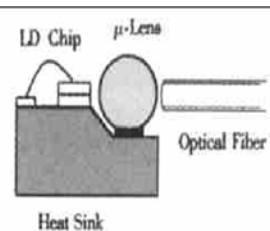


图 5 超低数值孔径光纤耦合系统示意图

FIG. 5 Coupling Scheme for Super Low N. A. Fiber  
微透镜的作用可以用图 6 说明.

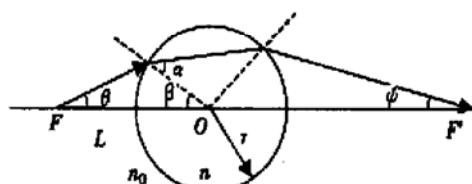


图 6 光线通过微透镜的传播

FIG. 6 Lightwave Propagation via  $\mu$ -Lens

由图可见, 光线由  $F$  点发出, 经圆柱形微透镜会聚后聚焦于  $F'$ . 假设光线的入射角为  $\theta$ , 微透镜的半径为  $r$ , 微透镜折射率为  $n$ , LD 端面离微透镜的距离为  $L$ . 由图中所示几何关系, 并根据斯涅尔定理, 容易得到以下各关系式

$$\psi = \theta + 2\beta - 2\alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{n_0}{n} \sin(\theta + \beta) \right| \quad (5)$$

$$\beta = \arccos \left| \frac{2ab \pm \sqrt{4a^2b^2 - 4(1+b^2)(a^2-1)}}{2(1+b^2)} \right| \quad (6)$$

式中  $a = \frac{\tan\theta(L+r)}{r}$ ,  $b = \tan\theta$

图 7 是 LD 端面到微透镜距离取不同值时, 光线会聚角随发散角变化的关系曲线.

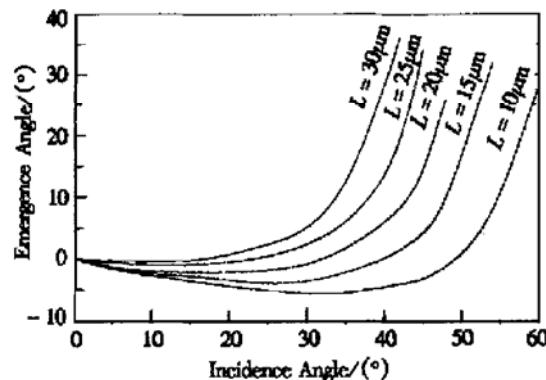


图 7 微透镜的焦距特性

FIG. 7 Focusing Characteristic of  $\mu$ -Lens

由以上的分析计算可以得出以下结论:

(1) 当距离  $L$  较大时, 微透镜对较小发散角光线的压缩作用比较好, 例如当  $L$  为  $30\mu\text{m}$  时, 激光器在  $\pm 22^\circ$  发散角以内的光线经微透镜耦合后发散角可压缩在  $\pm 1^\circ$  以内;

(2) 当距离  $L$  较小时, 微透镜对较大发散角光线的压缩作用比较好, 例如当  $L$  为  $10\mu\text{m}$  时, 激光器在  $\pm 54^\circ$  发散角以内的光线经微透镜耦合后发散角可压缩在  $\pm 6^\circ$  以内(对应于  $\text{NA} = 0.11$  的光纤);

(3) 微透镜用于半导体激光器和小数值孔径光纤耦合时, 最佳耦合距离  $L$  应取  $10\mu\text{m}$  左右;

(4) 微透镜的球面像差很严重, 但并不影响其在光纤耦合中的应用.

我们用这种耦合技术研制成功了三台出纤功率为  $25\text{--}30\text{W}$  的大功率半导体激光器光纤耦合模块样机, 光纤束数值孔径为  $0.11$ , 平均耦合效率为

75%.

## 5 耦合光学系统的高低温可靠性实验

为了检验采用全金属化耦合焊接工艺固定的耦合光学系统的可靠性, 我们对耦合好的尾纤输出激光器进行了高低温实验, 在  $-20, 20, 60, 70, 80^\circ\text{C}$  分别放置  $30\text{min}$ , 然后待温度恢复到室温后再测试输出光功率, 测试结果见图 8. 从测试结果看, 输出光功率无衰退迹象, 证明了这种耦合光学系统的温度可靠性, 适合于在我国南北方的极端气候下使用.

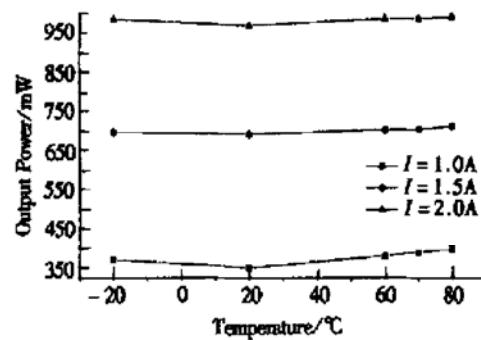


图 8 高低温可靠性实验

FIG. 8 Temperature Reliability Testing

## 6 结论

大功率半导体激光器光纤耦合模块的耦合光学系统设计需根据光纤数值孔径、光纤芯径、激光器光束发散情况、器件体积、耦合成品率、性价比等因素综合考虑. 我们给出了一些一般性设计原则, 实际情况需在满足要求的前提下, 尽量简化耦合光学系统, 减少元件数量, 并设法将数个元件集成为一体, 以减少不可靠环节, 提高长期稳定性. 根据这一设计原则, 设计并实现了两种不同的耦合光学系统, 分别满足数值孔径为  $0.11$  和  $0.22$  的光纤耦合要求, 其中  $\text{N.A.} = 0.22$  的光纤耦合得到的平均耦合效率为  $88\%$ , 最大耦合效率为  $92\%$ ;  $\text{N.A.} = 0.11$  的光纤耦合得到的平均耦合效率为  $75\%$ . 在  $-20\text{--}80^\circ\text{C}$  的温度范围内进行了高低温可靠性实验, 结果表明无衰退迹象. 我们用这两种耦合光学系统研制成功了输出功率在  $15\text{--}30\text{W}$  的大功率半导体激光器光纤耦合模块, 并用于中国科学院物理研究所研制的 LD 泵浦全国态  $\text{Nd: YVO}_4$  绿光激光器中, 获得了大于  $5\text{W}$  的  $532\text{nm}$  绿光输出.

## 参考文献

- [ 1 ] ZHENG Lian-xi, XIAO Zhi-bo, HAN Qin *et al.*, High-Power SQW Lasers by MOCVD Growth, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**( 5): 392[ 郑联喜, 肖智博, 韩勤, 等, MOCVD 生长大功率单量子阱激光器, 半导体学报, 1996, **17**( 5): 392].
- [ 2 ] FANG Gao-zhan, XIAO Jian-wei *et al.*, 157W Q-CW Al-GaAs/GaAs Linear Laser Diode Arrays, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**( 1): 102[ 方高瞻, 肖建伟, 等, 157W 准连续 AlGaAs/GaAs 激光二极管线列阵, 半导体学报, 2000, **21**( 1): 102].
- [ 3 ] LIU Xue-feng, HUANG De-xiu *et al.*, Study on Output-Coupling Structure Using in Semiconductor Laser Amplifier, Chinese Journal of Semiconductors, 1993, **14**( 7): 423[ 刘雪峰, 黄德修, 等, 一种半导体激光放大器输出耦合方式的研究, 半导体学报, 1993, **14**( 7): 423].
- [ 4 ] J. Q. Yao, Current Development and Outlook for LD Pumped Solid State Lasers, 97's Seminar on Leading Edge Development and Industrialization Strategy of Information Optoelectronics, 1997, 42—60[ 姚建铨, 激光二极管泵浦的固体激光器的发展现状及展望, 97 年度信息光电子前沿发展与产业开发对策研讨会, 1997, 42—60].
- [ 5 ] T. L. Dai, Semiconductor Laser Diodes Pumped Solide State Lasers, Chengdu Sichuan University Press, 1993[ 戴特力, 半导体二极管泵浦固体激光器, 成都四川大学出版社, 1993].
- [ 6 ] Takeshi Ozeki and B. S. Kawasaki, Efficient Power Coupling Using Taper-Ended Multimode Optical Fibers, Electron. Lett., 1976, **12**( 23): 607—608.
- [ 7 ] W. H. Cheng, C. S. Wang *et al.*, Highly Efficient Power Coupling Between GaAlAs Lasers and Tapered-Hemispherical-End Multimode Fibers, Appl. Opt., 1982, **21**( 19): 3409—3410.
- [ 8 ] Regis S. Fan and R. Brian Hooker, Tapered Polymer Single-Mode Waveguides for Mode Transformation, IEEE. Journal of Lightwave Technology, 1999, **17**( 3): 466—474.

## Two Practical Fiber Coupling Optical Systems for High Power Fiber-Coupled Laser Diodes Module<sup>\*</sup>

CHEN Shao-wu, HAN Qin, HU Chuan-xian and JIN Cai-zheng

(National Research Center for Optoelectronics Technology, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Two kinds of novel coupling optical system, special for fiber-LD coupling, are presented and developed by considering the astigmatism and far-field intensity distribution characteristics of 808nm high power GaAs/GaAlAs quantum well laser diode. The average coupling efficiency for fiber numerical aperture of 0.11 and 0.22 is 75% and 88% respectively. The actual performance of the coupling optical system is studied by measuring the coupling efficiency statistical distribution, the coupling deviation and the temperature-depending characteristics. The two coupling optical systems are used successfully in the high power fiber-coupled laser diodes module with fiber-coupled output power of 15—30W and numerical aperture of 0.11—0.22. The actual performance of the module indicates that the coupling optical system is reliable, effective and practical.

**Key words:** semiconductor laser diodes; optical systems; optical fibers; reliability

EEACC: 4320J; 4125; 0170N      PACC: 4260B

Article ID: 0253-4177(2001)12-1572-05

\* Project Supported by Chinese National High Technology (863) Plan Under Grant No. 863-715-Z35-3B.

CHEN Shao-wu male, was born in 1968, associate professor. His current research interests include high power fiber-coupled laser diodes module and high speed integrated light emitting module used in optical communication.