

# 半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合技术研究

欧阳德钦 阮双琛 郭春雨 林庆典 陈祖聪

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要** 采用梯度折射率光纤透镜耦合法实现了半导体激光器到单模光纤的高效率耦合,并在这一系统基础上完善了半导体激光器全光纤耦合的  $ABCD$  矩阵理论。实验中,利用梯度折射率光纤的聚焦特性,选取合适的长度,实现了半导体激光器到单模光纤的高效率耦合,最大耦合效率达 80.5%。此全光纤耦合方式具有体积小、制作简单、成本低等优点,对低成本、实用化的尾纤输出半导体激光器的实现具有重要的意义。

**关键词** 激光器;半导体激光器;全光纤耦合;梯度折射率光纤; $ABCD$  矩阵;单模光纤

**中图分类号** TN248.4; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1205004

## Research on All-Fiber Coupling between a Diode Laser and Single-Mode Fibers

Ouyang Deqin Ruan Shuangchen Guo Chunyu Lin Qingdian Chen Zucong

(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** Grin fiber lens is used in achieving the effective coupling between laser diode (LD) and single mode fibers (SMFs). The  $ABCD$  matrix theory of the all-fiber coupling of LDs is also consummated. During the experiment, the optimized length of the Grin fiber is precisely accomplished through a home-made fiber-progressing system to achieve a high coupling efficiency according to the focusing characteristic of Grin fiber, and the maximum efficiency of 80.5% is ultimately realized. This all-fiber coupling configuration has several advantages including the small-sized, easy-made and low cost, which is important for the realization of the low-cost, pigtailed LDs.

**Key words** laser; diode laser; all-fiber coupling; Grin fiber;  $ABCD$  matrix theory; single-mode fiber

**OCIS codes** 060.2270; 060.2340; 060.2400; 060.2430; 140.2020

## 1 引言

随着半导体激光抽运固体激光器(DPSSL)、高速大容量光纤通信、高功率光纤激光器及超连续谱光源的高速发展,对半导体激光器(LD)的要求也越来越高。但 LD 发射光斑的不对称性及大的发散角,在很大程度上限制了其应用,尾纤输出 LD 很好地解决了上述问题<sup>[1]</sup>,LD 与光纤的耦合效率是最主要的考虑因素。高效率的耦合不仅直接影响光纤传输的中继距离,而且对改善 LD 抽运掺铒光纤放大器、DPSSL 等光通信器件及系统的性能<sup>[2]</sup>,对提高全光纤激光器<sup>[3,4]</sup>及全光纤化超连续谱光源<sup>[5~7]</sup>

的输出功率都有着十分重要的意义。

目前已有多种方法实现了 LD 与光纤的高效率耦合,有直接耦合法、透镜耦合法、透镜组耦合法、球透镜耦合法、锥形球透镜法以及楔形柱透镜法等。近年来透镜耦合技术已经趋于成熟,但成本较高,基于此低成本的全光纤耦合结构有了一定发展,比如锥形球透镜法、楔形柱透镜法等。

对于全光纤化 LD 与光纤的耦合技术,成本较低,但目前耦合效率不高。对光纤进行球透镜处理后,光纤端面起到透镜的作用,通过控制球透镜的大小即可实现 LD 与光纤的耦合,此种方法较直接耦

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-20

基金项目: 教育部博士点基金(20104408110002)资助课题。

作者简介: 欧阳德钦(1988—),男,硕士研究生,主要从事超连续谱光源方面的研究。E-mail: ouyangdeqin@126.com

导师简介: 阮双琛(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器及超连续谱等方面的研究。

E-mail: scruan@szu.edu.cn

合效率有所提高,同时也增加了工作距离,即 LD 发光面到球形端面光纤的距离,对封装提供了便利,且由于球透镜面积较大,其纵向、横向、角度损耗都有所降低,便于光路的调节<sup>[8]</sup>。

日本的 Kazuo Shiraishi 小组<sup>[9]</sup>早在 1995 年就提出利用梯度折射率光纤来实现 LD 到光纤的高效率耦合,由于梯度折射率光纤具有聚焦作用,选择合适的梯度折射率光纤长度,使其焦点恰好位于梯度折射率光纤与单模光纤(SMF)熔接面处,便可以实现 LD 到光纤的高效率耦合。此种方法具备了球透镜和梯度折射率透镜的双重优点,经过两次聚焦,使光斑进一步缩小,所以耦合效率较单模光纤直接加工成球透镜有很大提高<sup>[10]</sup>。但由于对梯度折射率光纤长度难以实现精准的控制,制约了其实用化的发展。

本文采用梯度折射率光纤,利用自行设计的定点切割系统实现了对其长度的精确控制,并将梯度折射率光纤端面加工成球透镜,实现了 LD 与单模光纤的高效率耦合,并且采用目前仍有应用的傍轴近似理论进行了理论分析<sup>[11]</sup>,对商业化的生产具有一定的指导意义。

## 2 实验结构

实验中采用两种结构的耦合方式分别研究了 LD 到单模光纤的耦合。搭建了球透镜加工平台,可以实现不同大小的光纤球透镜制作;并搭建了定点切割系统,可以实现对梯度折射率光纤长度的精准切割。

实验所用单模光纤为 SMF-28,模场直径约为  $9\ \mu\text{m}$ ;所采用的 LD 波长为  $658\ \text{nm}$ ,慢轴和快轴发散角分别为  $10^\circ$  和  $17^\circ$ ,发光面积尺寸为  $50\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 。所采用的梯度折射率光纤参数为:包层折射率为 1.45601;纤芯包层折射率差为 0.032;纤芯直径约为  $100\ \mu\text{m}$ ;纤芯包层折射率差分布曲线如图 1 所示。

### 2.1 球透镜耦合结构

直接将单模光纤端面加工成球透镜,如图 2 所示,利用球透镜的聚焦特性增大 LD 与单模光纤的耦合效率。

### 2.2 梯度折射率光纤/球透镜混合耦合结构

在单模光纤前端熔接梯度折射率光纤球透镜,利用球透镜及梯度折射率光纤的双重聚焦特性实现 LD 与单模光纤的高效率耦合,如图 3 所示。

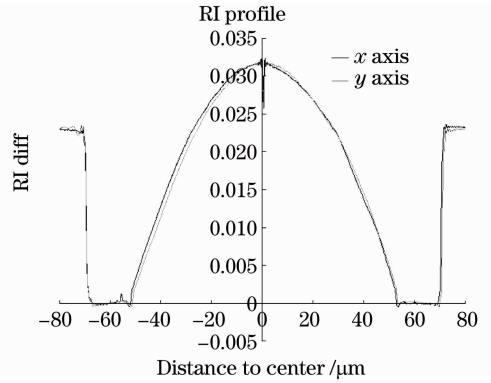


图 1 梯度折射率光纤相对折射率(相对于包层折射率)  
Fig. 1 Relative refractive index of Grin fiber (relative to index of fiber cladding)

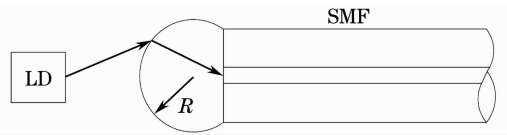


图 2 球透镜耦合结构

Fig. 2 Coupling configuration using hemispherical-ended fiber structure

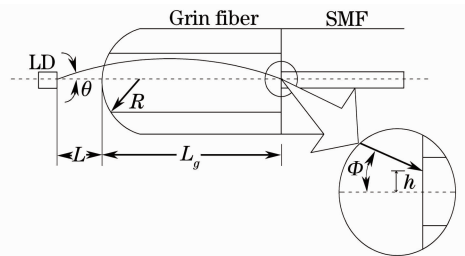


图 3 梯度折射率光纤/球透镜混合耦合结构

Fig. 3 Coupling configuration using hemispherical-ended Grin fiber structure

## 3 理论分析

### 3.1 梯度折射率光纤聚焦特性

在梯度折射率光纤中光线沿正弦轨迹传输,每传输一个正弦周期的距离即为梯度折射率光纤的截距,满足  $p = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} = \frac{2\pi a}{\sqrt{2\Delta}}$ ,  $a$  为纤芯直径,  $\Delta$  为纤芯轴线与包层折射率差。

从图 4 可以看出梯度折射率光纤具有聚焦作用,每传输半个截距的距离实现一次聚焦(对应着半个正弦周期),所以可以根据聚焦作用来实现 LD 到光纤的高效率耦合。只要选取适当长度的梯度折射率光纤,使单模光纤端面恰好处在梯度折射率光纤透镜的焦点处,便可实现 LD 到单模光纤的全光纤高效率耦合。

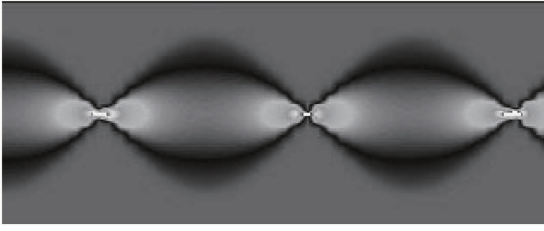


图4 光束传播算(BPM)法模拟梯度折射率  
光纤内的光束传播

Fig. 4 Light propagation in Grin fiber by using BPM

利用程函方程 $(\nabla l)^2 = n^2$ 可求得微分方程：

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dz^2} + \frac{n_2}{n_1} \mathbf{x} = 0, \quad (1)$$

式中 $\nabla$ 为哈密顿算子, $l$ 为光程, $\mathbf{r}$ 为光纤径向矢量, $n_2, n_1$ 分别为光纤纤芯轴线折射率及光纤包层折射率。

解微分方程(1),即可求出梯度折射率光纤的传输矩阵为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{M}_g = \begin{bmatrix} \cos(gL_g) & \frac{1}{g} \sin(gL_g) \\ -g \sin(gL_g) & \cos(gL_g) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $g = \frac{\sqrt{2\Delta}}{a}$ 为聚焦参数, $\Delta = n_2 - n_1, L_g$ 为梯度折射率光纤的长度。

### 3.2 梯度折射率光纤耦合的 ABCD 矩阵理论模拟

若半导体激光器光束的椭圆度不是很大,可以用模场半径为 $\omega_0 = (\omega_x \omega_y)^{1/2}$ 的圆高斯光束近似,其中 $\omega_x, \omega_y$ 分别为LD快轴和慢轴发出的高斯光束的模场半径。理想情况下,半导体激光器的光束束腰正好处在光纤接受平面上,即高斯光束曲率半径为无穷大,此时的耦合效率最高。实验中由于所采用的LD发散角较小,满足傍轴近似条件,非傍轴区的光场分量不再考虑。在圆高斯光束近似及傍轴近似条件下对图3所示的结构采用ABCD理论进行分析。

LD到梯度折射率光纤球形端面的空间传输矩阵为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $L$ 为工作距离。

梯度折射率光纤球形端面处折射时传输矩阵为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R} \frac{n_g - 1}{n_g} & \frac{1}{n_g} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $n_g$ 为梯度折射率光纤纤芯轴线的折射率, $R$ 为球透镜的曲率半径。

梯度折射率光纤内的传输矩阵为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \cos r & A_g \sin r \\ -\frac{1}{A_g} \sin r & \cos r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中定义 $A_g = \frac{a}{\sqrt{2\Delta}} = \frac{1}{g}, r = \frac{L_g}{A_g}$ 。

梯度折射率光纤与光纤交界面处的传输矩阵为

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_g/n_{SMF} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $n_{SMF}$ 为单模光纤纤芯折射率。

LD发出的类高斯光束经空间距离 $L$ ,梯度折射率光纤到单模光纤端面处的总传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{M}_0, \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3$ 为从LD到单模光纤端面处的各个不同的传输矩阵。经计算得到：

$$A = \cos r - \frac{A_g (n_g - 1) \sin r}{R n_g}, \quad (8)$$

$$B = L \left[ \cos r - \frac{A_g (n_g - 1) \sin r}{R n_g} \right] + \frac{A_g \sin r}{n_g}, \quad (9)$$

$$C = -\frac{n_g}{A_g n_{SMF}} \sin r - \frac{(n_g - 1) \cos r}{R n_{SMF}}, \quad (10)$$

$$D = \frac{\cos r}{n_{SMF}} - L \left[ \frac{n_g \sin r}{A_g n_{SMF}} + \frac{(n_g - 1) \cos r}{R n_{SMF}} \right]. \quad (11)$$

由 $q$ 参数定义及其所服从的ABCD公式<sup>[13]</sup>

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R'(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}, \quad (12)$$

$$q = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (13)$$

式中 $\omega(z)$ 为高斯光束的束腰大小, $R'$ 为高斯光束的曲率半径。求解(12),(13)式可得梯度折射率光纤与单模光纤交界面处的光斑半径：

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\left( \frac{n_g}{n_{SMF}} \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AD - BC} \right)}, \quad (14)$$

曲率半径

$$R' = \frac{A^2 + \alpha^2 B^2}{AC + \alpha^2 BD}, \quad (15)$$

式中 $\alpha = \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2 n_0}, n_0$ 为空气折射率。将(8)~(11)式代入(14),(15)两式即可得光斑半径及曲率半径随不同参数的变化函数。

实验中,对耦合效率影响最大的为梯度折射率光纤长度及球透镜的半径,工作距离 $L$ 为实验中可调变量,故首先以球透镜半径 $R, L_g$ 为变量模拟梯度折射率光纤与单模光纤熔接点处的光斑直径变化,如图5所示。

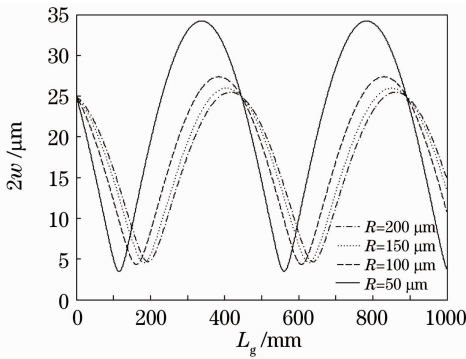


图 5 不同球透镜半径下,光斑直径随梯度折射率光纤长度的变化

Fig. 5 Spot size diameter as a function of the length of Grin fiber at different radiuses of lensed fiber

由图 5 可看到光斑直径随梯度折射率光纤长度  $L_g$  的增大呈现周期性的变化,体现出了梯度折射率光纤的聚焦特性;且球透镜增大到一定程度时,其半径变化对光斑直径的变化不再有明显影响,所以选取固定的  $R$ ,以  $L$  和  $L_g$  为变量进行模拟。

聚焦效果最好。当  $L$  持续增大时,梯度折射率光纤内的光斑直径将会大于其纤芯直径,导致光斑在梯度折射率光纤内截止,增加了损耗,而小的  $L$  将不利于对系统的调试及封装。图 7 中可以看到随着  $R$  的增加,光斑直径最小处对应的工作距离  $L$  有增大趋势,实际中希望工作距离越大越好,但从图 5 可以看出继续增大  $R$  并不会进一步地减小光斑直径,且对应最小光斑直径的  $L$  也不会持续增大。理论工作距离可达  $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 。

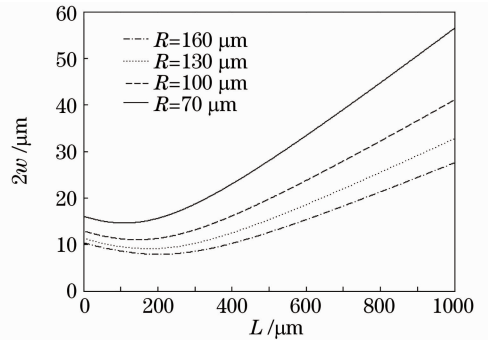


图 7 梯度折射率光纤长度一定,不同球透镜半径下,光斑半径随工作距离的变化

Fig. 7 Spot size diameter as a function of working distance at a fixed Grin fiber length

## 4 实验结果及分析

### 4.1 球透镜耦合实验

直接把单模光纤端面加工成球透镜对光测其耦合效率,球透镜结构示意图如图 2 所示,实验中该结构在高倍相机下的照片如图 8 所示。

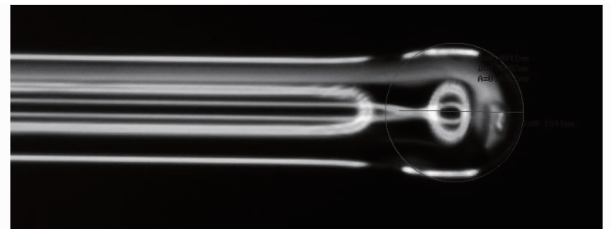


图 8 单模光纤球透镜实物图

Fig. 8 Photograph of the fabricated lensed SMF

实验中将单模光纤一端加工成球透镜,通过控制工艺逐渐改变球透镜半径,实验测得了不同球透镜半径下的耦合效率,结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看出随着球透镜半径的增大,耦合效率先增大后减小,有一个最佳的球透镜半径对应最高的耦合效率,太大太小都不利于实现聚焦。实验中测得当球透镜半径为  $79.9 \mu\text{m}$  时,耦合效率最高为  $64.3\%$ ,工作距离约为  $50 \mu\text{m}$ 。

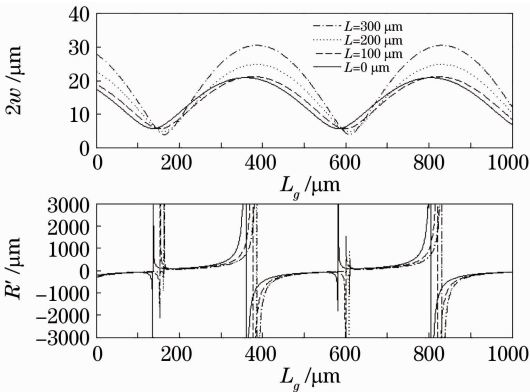


图 6 不同工作距离下,光斑直径及曲率半径随梯度折射率光纤长度的变化

Fig. 6 Spot size diameter and curvature radius as a function of Grin fiber length at different working distances

由图 6 可知,随着梯度折射率光纤的长度  $L_g$  的增大,高斯光束束腰曲率半径也呈现出周期性的变化。实验中对  $L_g$  的选取应当满足此处的光斑直径最小,这样就可以有更多的光耦合进模场直径较小的单模光纤;其次,对于  $L_g$  的选取还需满足此处的曲率半径为负无穷,这样单模光纤接收到的是会聚高斯光束,否则为发散影响其耦合效率。

选取  $L_g$  为最佳参数后,考虑工作距离  $L$  对光斑直径的影响,以  $L$  和球透镜半径  $R$  为变量进行模拟。

由图 7 可知,一定的球透镜半径  $R$  下,随着  $L$  的增大,光斑直径逐渐减小到最小值,之后随  $L$  增大持续增加,原因是球透镜有个最佳的焦距,最佳焦距处



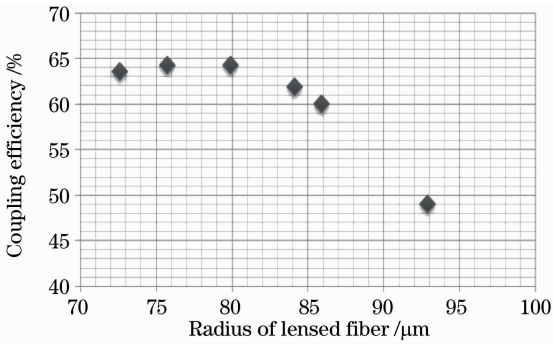


图9 不同球透镜半径所对应的耦合效率  
Fig. 9 Coupling efficiencies at different radiuses of the lensed SMF

#### 4.2 梯度折射率光纤/球透镜混合耦合实验

实验中发现仅采用梯度折射率光纤透镜实现LD与单模光纤的耦合效率并没有太大的改善,因此采用梯度折射率光纤与球透镜相结合的耦合方法来提高LD到单模光纤的耦合效率。

结构示意图如图3所示,实验中结构在高倍相机下的照片如图10所示。

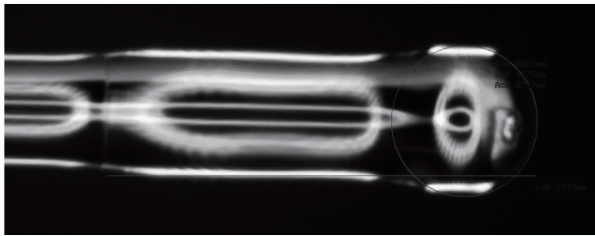


图10 单模光纤熔接梯度折射率光纤球透镜实物图  
Fig. 10 Photograph of the fabricated lensed Grin fiber

实验中先熔接梯度折射率光纤与单模光纤,之后在定点切割系统下截取特定的梯度折射率光纤长度,采用与单模光纤球透镜同样的方法。为了说明同一梯度折射率光纤长度下,不同的球透镜半径对耦合效率的影响,选取梯度折射率光纤长度为 $622.9 \mu\text{m}$ ,测得不同球透镜半径下的耦合效率如图11所示。

将梯度折射率光纤前端面加工成球透镜处理后,耦合效率明显升高。不同的球透镜形状下对应着不同的耦合效率,球透镜半径变化与单模光纤球透镜有相同的规律,从图11可以看出当球透镜半径持续增大时,对耦合效率的影响并不明显,这也验证了图5中的理论模拟,即持续增大球透镜半径不会对光斑直径产生较大影响。这样就大大增加了此种结构制作的重复性。实验中梯度折射率光纤的切割误差为 $\pm 15 \mu\text{m}$ 。

由理论分析可知,不同的梯度折射率光纤长度将会对耦合效率产生不同的影响,实验中截取不同

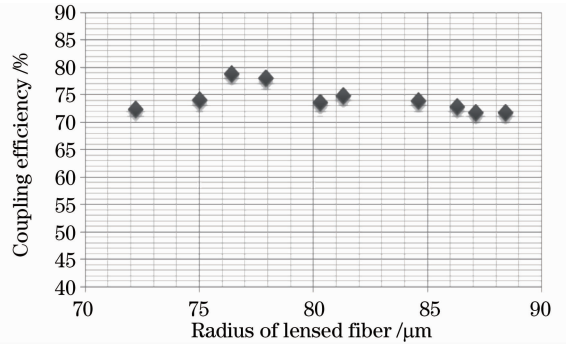


图11 不同梯度折射率光纤球透镜半径所对应的耦合效率  
Fig. 11 Coupling efficiencies at different radiuses of lensed Grin fiber

梯度折射率光纤长度测得的最佳耦合效率分布如图12所示。

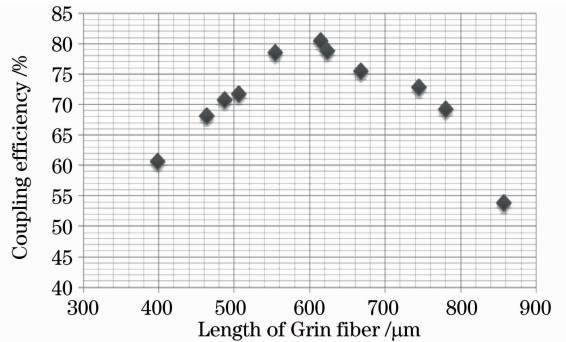


图12 不同梯度折射率光纤长度所对应的最佳耦合效率  
Fig. 12 Optimum coupling efficiencies at different lengths of Grin fiber

实验中对不同长度的梯度折射率光纤,每次均加工成球透镜进行对光测试,观测同一梯度折射率光纤长度下不同球透镜半径的最大耦合效率。当选取梯度折射率光纤长度为 $614 \mu\text{m}$ ,且球透镜半径为 $86.6 \mu\text{m}$ 时,测得最大耦合效率为 $80.5\%$ ,工作距离约为 $80 \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

利用梯度折射率光纤的聚焦特性,实现了半导体激光器与单模光纤的高效率全光纤化耦合,制作简单,成本低,可重复性强。完善了半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合理论,并且实验验证了理论的正确性,即可以采用ABCD矩阵理论指导半导体激光器与单模光纤的耦合实验。实验测得了两种不同全光纤结构的耦合效率,将单模光纤加工成球透镜对光可达到 $64.3\%$ 的耦合效率;单模光纤熔接梯度折射率光纤并将梯度折射率光纤加工成球透镜后,在梯度折射率光纤长度为 $614 \mu\text{m}$ ,且球透镜半

径为  $86.6 \mu\text{m}$  时,测得最大耦合效率高达  $80.5\%$ 。

实验中由于梯度折射率光纤的长度不易精确控制,故在以后进一步提高耦合效率的工作中,需重点考虑切割精度问题,尽可能提高切割精度。由于半导体激光器发光面积较小且容易损坏,故实验中不可使光纤接触发光面,并且要在保证高效率耦合的情况下增加其工作距离。由于光纤直径及半导体激光器的发光面积均很小,所以受外界影响波动较大,对其封装时要重点考虑。

### 参 考 文 献

- 1 Yao Shun, Pang Xiaolin, Dai Jingjing *et al.*. Analysis of fiber coupled laser diode's beam quality with bending fiber approach [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1730~1733  
尧 舜, 庞晓林, 代京京等. 绕纤法分析光纤耦合输出半导体激光器的光束质量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1730~1733
- 2 Xue Yuhao, Zhou Jun, Lei Siyuan *et al.*. The research development of fiber-based high average power ultrashort pulse amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11): 28~34  
薛宇豪, 周 军, 雷思远等. 高平均功率超短脉冲激光光纤放大研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(11): 28~34
- 3 Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan *et al.*. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1932~1936  
冯宇彤, 杜松涛, 杨 燕等. 基于LD脉冲调制的全光纤MOPA结构激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1932~1936
- 4 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1861~1865  
汪园香, 姜培培, 杨丁中等. 全光纤结构主振荡功率放大掺镱脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1861~1865
- 5 Guo Chunyu, Ruan Shuangchen, Chen Zucong *et al.*. An all-fiber supercontinuum source pumped with a 18.4 W picoseconds

- fiber laser [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2011, **28**(3): 218~224  
郭春雨, 阮双琛, 陈祖聪等. 18.4W皮秒光纤激光器及其全光纤化超连续谱光源[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2011, **28**(3): 218~224
- 6 Wang Sijia, Hu Minglie, Fang Xiaohui *et al.*. Experimental research on the compact high power supercontinuum source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 208~212  
王思佳, 胡明列, 方晓惠等. 紧凑型高功率超连续光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 208~212
- 7 Chen Shenping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 30 W picoseconds pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1943~1949  
陈胜平, 谌鸿伟, 侯 静等. 30 W皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1943~1949
- 8 Ma Huiping, Liu Lihua, Yang Lemin *et al.*. Study on optic fiber coupling and application of optic fiber with spherical end face [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(4): 46~48  
马惠萍, 刘丽华, 杨乐民等. 光纤耦合问题的研究及球形端面光纤的应用[J]. *光电工程*, 2002, **29**(4): 46~48
- 9 Kazuo Shiraishi, Naoto Oyama, Kazuhito Matsui, Lemura *et al.*. A fiber lens with a long working distance for integrated coupling between laser diodes and single mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(8): 1736~1744
- 10 Kazuo Shiraishi, Shin-Ichi Kuroo. A new lensed-fiber configuration employing cascaded GI-fiber chips [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 787~794
- 11 Niu Jinxing, Mao Haitao, Li Fangzheng *et al.*. A practical method for coupling between semiconductor laser and graded-core fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(6): 424~426  
牛金星, 毛海涛, 李方正等. 半导体激光器与变芯径光纤实用化耦合技术研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(6): 424~426
- 12 L. William, A. Emkey Curtis. Analysis and evaluation of graded-index fiber-lenses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(9): 1156~1164
- 13 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. Principles of Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009. 75~77  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 75~77

栏目编辑: 宋梅梅