

基于渐变折射率光纤的激光器高效耦合方法

刘鹏, 王承林

邢台学院物理与电子工程学院, 河北 邢台 054001

摘要 针对半导体激光二极管(LD)与单模尾纤(SMF)的耦合问题,提出了一种基于渐变折射率光纤(GIF)的耦合机制。GIF被设计为SMF的前端耦合部分,采用大芯径以匹配LD输出远场分布,椭圆形的纤芯形状可有效匹配LD椭圆输出光束,并实现有效聚焦与控制。基于有限差分束传播法对耦合过程进行的理论分析表明,采用该方法功率耦合效率可达到88%,1 dB插入损耗对应的GIF长度容差为75 μm ,长轴与短轴方向的横向偏移容差分别为28 μm 和10 μm 。该方案对高功率LD耦合单模光纤设计有一定的参考价值。

关键词 激光光学; 光纤耦合; 有限差分束传播法; 渐变折射率光纤; 半导体激光二极管

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.051407

Efficient Coupling Method of Laser Based on Graded-Index Fiber

Liu Peng, Wang Chenglin

School of Physics and Electronic Engineering, Xingtai University, Xingtai, Hebei 054001, China

Abstract The mechanism based on graded-index fiber (GIF) is provided for efficient coupling between laser diode (LD) and single mode fiber (SMF). As the central component, the GIF is placed in front of SMF. A large-sized elliptical core is designed in GIF for matching the far field of LD, and the beam from LD can be focused and coupled into SMF. By analyzing with finite difference beam propagation method, the power coupling efficiency is able to reach 88%. For 1 dB insert loss, the tolerance in fiber length of GIF is 75 μm , and the tolerances of offset in the direction of major axis and minor axis are 28 μm and 10 μm , respectively. The scheme is useful for the design of high power LD coupling single mode tail fiber.

Key words laser optics; fiber coupling; finite difference beam propagation method; graded-index fiber; laser diode

OCIS codes 140.3325; 060.3510; 140.5960

1 引言

在激光工程领域,半导体激光器常用于构建光通信系统中与光纤配套使用的激光光源,或作为光纤激光器和放大器的抽运源^[1-4]。在该领域,具有典型代表意义的光器件是整合封装单模尾纤输出的半导体激光二极管(LD)^[5-8],其在业内具有十分广泛的应用。但是由于LD的制作工艺,其远场输出特性与普通单模光纤(SMF)的模场严重失配,两者之间的耦合一直是该领域的技术难点,高效率的耦合机制直接决定了LD整合封装后的输出光功率以及成品率^[9-10]。

目前,LD芯片与SMF间常用的耦合方式^[11-13]有端面对准耦合、复合透镜耦合以及光纤微透镜耦合。端面对准耦合虽然方式直接,结构简捷,但通常耦合效率较低,且该结构容易引起较强的光反馈,导致LD输出特性波动。借助复合透镜可以获得耦合位置的平面波前,并可部分消除像散影响,但该方法常不能同时满足光斑尺寸的匹配,耦合效率一般为30%,且造价昂贵。光纤微透镜是一种行之有效的耦合方法,但制作工

收稿日期: 2016-12-30; **收到修改稿日期:** 2017-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61327006)、邢台市科学技术与发展计划任务(2012ZZ060-4)、河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2017305)、河北省科技计划自筹经费项目(16210411)

作者简介: 刘鹏(1974—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光、光纤传感方面的研究。

E-mail: liupengcn1974@163.com

艺相对困难,常用的楔形微透镜光纤虽工艺简单,但耦合效果并不突出。因此,深入研究 LD 与 SMF 之间的微光耦合原理,并探求更为高效的耦合机制在该领域非常重要。

渐变折射率光纤(GIF)^[14-15]是一种成熟的商品化光纤,具有十分特殊的光学导波特性和,特别是在光束整形与模场变换等方面的能力突出,非常适合耦合光学领域使用。本文针对折射率导引型 LD 与 SMF 之间的耦合问题,提出一种全新的耦合思路。该方法首先使用透镜组对 LD 出射的椭圆形远场激光光束进行会聚,由于并不需要对光束进行复杂整形,因而简单透镜组即可实现该功能;得到的椭圆形光束直接入射具有大尺寸椭圆形纤芯结构的渐变折射率光纤(EGIF),然后利用 EGIF 的光束变换能力,对椭圆入射光束进行整形,并进一步对光斑束腰进行压缩,最后将之转化为与 SMF 模场相匹配的光束后注入单模光纤,由此实现两者之间的低损耗高效率耦合。

2 理论分析

2.1 边发射 LD 光场分布与 SMF 模场特性分析

边发射 LD 的光场分布^[16-17]可分别用其近场与远场特性来描述。近场分布是指光场在 LD 解理面处的分布,远场特性是指光场离开输出腔面传播一定距离后在空间的分布情况,LD 与 SMF 间的耦合位置即位于其远场区域。近场情况下,LD 管芯的发光区大小一般在 $1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 以内,垂直结方向光斑半径在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,平行结方向光斑半径不超过 $10\ \mu\text{m}$ 。由于发光区域的几何尺寸很小,因而衍射现象比较明显,并且沿垂直结方向和平行结方向的远场发散角不同。通常情况下,由于有源区的厚度不足 $0.3\ \mu\text{m}$,因此在垂直结方向发散角比较大,典型值为 $30^\circ \sim 60^\circ$ (半峰全宽),光束发散较快;平行结方向的分发散角小一些,典型值在 10° 左右,光束发散得慢一些。因而,LD 具有椭圆形的远场分布。由于边发射 LD 输出光场与椭圆高斯光束极为相近,故理论上常以椭圆高斯光束进行分析。图 1 所示为 LD 输出光束在传播空间的光强分布,平行结与垂直结方向对应的出射束腰分别为 ω_{0x} 、 ω_{0y} ,经传播后其远场形成椭圆形分布的大尺寸光斑。

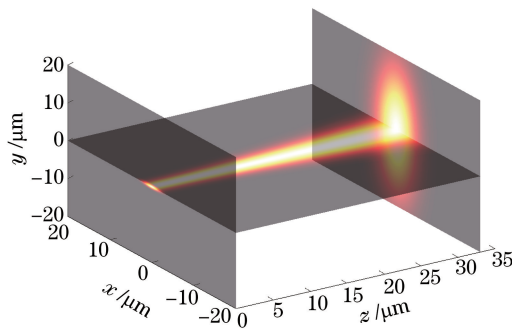


图 1 LD 输出光束的光强分布

Fig. 1 Intensity distribution of LD output beam

SMF 常用作通信传输光纤或 LD 输出尾纤,其纤芯为圆形,且芯径很小,模场直径多在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。图 2(a)为 Corning 公司生产的单模光纤 SMF-28 的模场分布,其在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的模场直径典型值为 $10.4\ \mu\text{m}$;图 2(b)为输出波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 的 LD 典型远场分布图(图 1 远场位置)。

对比图 2(a)与(b)不难发现,SMF 模场与边发射 LD 远场无论是光斑尺寸还是光斑形状均相去甚远,因而直接耦合势必损耗极大。并且,由于 SMF 的导波特性和,其光传输过程的平面波前与边发射 LD 远场曲面波前亦不匹配,这同样是导致耦合损耗的原因之一。

2.2 基于 EGIF 的 LD 与 SMF 耦合特性分析

设计如图 3 所示 LD 与 SMF 耦合系统,系统核心光器件为具有大尺寸椭圆形纤芯结构的 EGIF,其承担光束整形与光斑压缩的工作。透镜组由两个焦距分别为 f_1 、 f_2 的透镜组成,透镜间距 $L = f_1 + f_2$,入射透镜与 LD 距离为 l_1 ,出射透镜与 EGIF 距离为 l_2 ,其承担 LD 远场光束的初级放大与波前变换工作。

2.3 耦合系统光传输特性

由于透镜组具有旋转对称性,并且 LD 两正交方向光束传输特性相对独立,因此可选择其中任一方向作

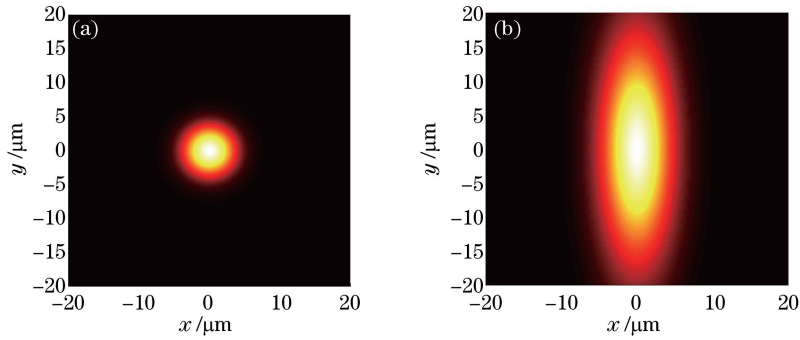


图2 (a) SMF 模场分布; (b) LD 远场分布

Fig. 2 (a) Mode field distribution of SMF; (b) far field distribution of LD

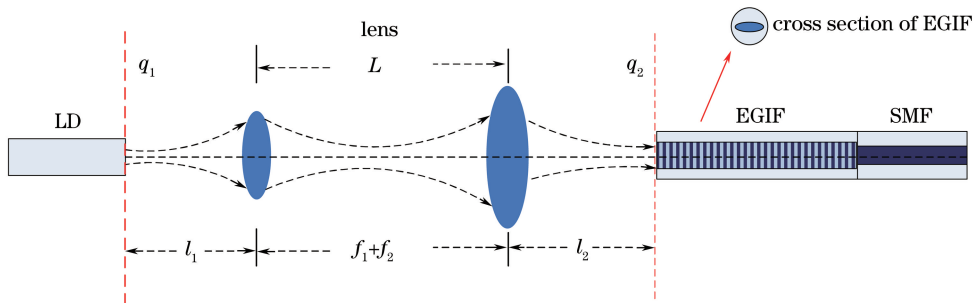


图3 基于透镜组与 EGIF 相结合的 LD 与 SMF 耦合系统结构示意图

Fig. 3 Structure of coupling system between LD and SMF based on battery of lenses and EGIF

为代表展开光路分析。如图3所示, LD 出射光束的 q 参数可表示为

$$\frac{1}{q_1} = -i/z_{R1}, \quad z_{R1} = \pi\omega_{01}^2/\lambda, \quad (1)$$

式中 ω_{01} 为 LD 出射束腰(可对应平行结或垂直结任一方向), z_{R1} 为该方向所对应的瑞利距离。光束经透镜组的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_T & l \\ 0 & \frac{1}{M_T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_T & M_T l_1 + l + \frac{l_2}{M_T} \\ 0 & M_T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 $M_T = -f_2/f_1$ 。根据 ABCD 定律, LD 出射光束经透镜组变换后在 EGIF 端面得到的入射光束的 q 参数为

$$q_2 = M_T^2 q_1 + M_T^2 l_1 + M_T l + l_2. \quad (3)$$

考虑到 EGIF 入射光束需具有平面波前属性,则 EGIF 端面处入射光束的 q 参数需满足

$$\frac{1}{q_2} = -i/z_{R2}, \quad z_{R2} = \pi\omega_{02}^2/\lambda, \quad (4)$$

式中 ω_{02} 为 EGIF 端面处入射光束束腰(方向与 LD 出射光束相对应), z_{R2} 为相应的瑞利距离。

综合考虑(1)~(4)式可得

$$\begin{cases} \omega_{02} = |M_T| \omega_{01} \\ l_2 = -M_T^2 l_1 - M_T (f_1 + f_2) \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式可知, LD 出射光束经透镜组变换后,其所获光束在平行结与垂直结方向束腰位置仅与 LD 位置有关,而与入射光束自身性质无关,两方向具有相同的放大率,并且都具有平面波前。

结合商用光器件参数及系统整合封装的操作便利性,表1给出一组典型的耦合体系光学参数。其中, λ 为光束波长, ω_{0x} 、 ω_{0y} 分别为 LD 出射光束在平行结与垂直结方向的束腰半径, n_0 为 EGIF 纤芯折射率峰值, n_1 为 EGIF 包层折射率, a_x 为 EGIF 椭圆纤芯半长轴, a_y 为相应半短轴, 纤芯折射率呈抛物线函数变化。根据(5)式, LD 出射光束经透镜组后在 EGIF 入射面处得到的椭圆光束平行结方向束腰 $\omega'_{0x} = 26 \mu\text{m}$, 垂直

结方向束腰 $\omega'_{0y} = 7 \mu\text{m}$ 。

表 1 耦合系统参数值

Table 1 Parameter values of coupling system

Parameter	λ	f_1	f_2	ω_{0x}	ω_{0y}	L_1	L_2	n_0	n_1	a_x	a_y
Values / μm	1.55	10	100	2.6	0.7	10	100	1.46	1.45	45	15

LD 入射光束在渐变折射率光纤中传播时其光斑半径呈周期性变化^[18], 周期 $L_T = \pi a / \sqrt{2\Delta}$, 其中 Δ 为相对折射率差 $\Delta = (n_0^2 - n_1^2) / (2n_0^2)$ 。自起始传播位置开始, 光斑半径极值点分别出现在半周期长度的整数倍位置。当传播距离为半周期长度的奇数倍时, 光斑极值为 $\omega_{e1}(z) = \lambda a / (\pi n_0 \omega_0 \sqrt{2\Delta})$; 当传播距离为半周期长度的偶数倍时, 光斑极值为 $\omega_{e2}(z) = \omega_0$, 其中 ω_0 是入射光束的束腰值。不同传播位置处的极值性质(极大或极小)取决于渐变折射率光纤的纤芯半径和入射光束束腰的大小。

如表 1 所示, 选择 EGIF 的长轴与短轴尺寸成比例的原因在于两方面: 1) 纤芯形状与大小尽可能匹配入射光束的大尺寸椭圆光斑; 2) 确保光束在 EGIF 中沿长、短轴两垂直方向(x 方向和 y 方向)传播时能在同一纵向位置获得极值, 便于与 SMF 耦合。由表 1 可知, EGIF 的长轴长度是短轴长度的 3 倍, 因此相应的这两个方向的光束传播周期也是 3 倍关系, 通过计算可得长轴方向的光传播周期为 $954 \mu\text{m}$, 短轴方向的传播周期为 $318 \mu\text{m}$ 。并且, 根据上述理论, 长、短轴方向的传播光束均在半周期的奇数倍位置达到极小值。计算得 x 方向光斑半径极小值为 $3.93 \mu\text{m}$, y 方向光斑半径极小值为 $4.87 \mu\text{m}$, 小于单模光纤模场直径 $10.4 \mu\text{m}$ 。图 4 为经透镜组变换后 LD 入射光束在 EGIF 中的光斑变化规律, 当传播长度 $z = 477 \mu\text{m}$ 时(z 代表传播方向), 两方向光斑同时达到极小值, 传播长度对应 x 方向一倍半周期, 对应 y 方向三倍半周期。若在该位置接入 SMF, 势必取得良好的耦合效果。

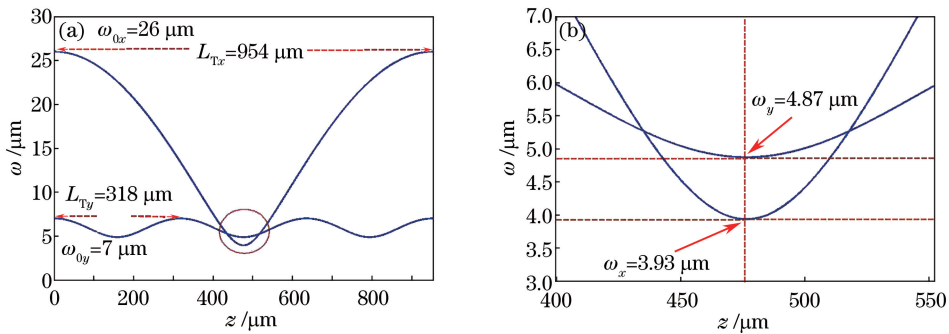


图 4 LD 入射光束在 EGIF 中传播时光斑变化规律。(a) 整体变化规律; (b) 局部放大图

Fig. 4 LD incident beam characteristics in EGIF. (a) Entire information; (b) local enlarged

3 数值分析

采用有限差分束传播法(FDBPM)对耦合过程进行了数值模拟, 计算中 EGIF 的传播长度定为 $477 \mu\text{m}$, 取 SMF 长度为 $313 \mu\text{m}$ (足够长以确保输出模场稳定)。图 5 为 EGIF 与 SMF 耦合过程的光场传播情况, 图 5(a)、(b)为 xoz 面内传播场图, 图 5(c)、(d)为 $yo z$ 面内传播场图。

为更直观了解 LD 入射光束在 EGIF 与 SMF 中的传输情况, 图 6 给出了几个关键耦合位置的场分布数值结果, 分别对应 EGIF 入射面、EGIF 与 SMF 耦合面、SMF 输出面位置。对比图 6(a)~(c)可知: 1) 在入射面位置光场具有较大的椭圆形输入光斑, 如图 6(a)所示, 渐变折射率光纤设计成大尺寸椭圆形纤芯结构正是为了更好地承载该入射光束; 2) 入射光束经过 EGIF 的变换后到达长轴方向半周期位置(EGIF 与 SMF 耦合面)时, 光斑达到最小值, 如图 6(b)所示, 此时光斑虽然还是椭圆形, 但由于整体光斑半径小于 SMF 模场半径, 因此可以高效地耦合进入 SMF; 3) 图 6(c)为经过稳定传播后 SMF 中的模场分布。

当不考虑其他损耗情况下, 利用 FDBPM 法计算上述耦合系统的耦合效率为 96% , 对应的损耗值为 0.18 dB 。若将各种损耗因素考虑进去(透镜损耗、菲涅耳反射损耗、熔接损耗共计 0.38 dB), 总损耗值为 0.56 dB , 对应的耦合效率为 87.9% 。

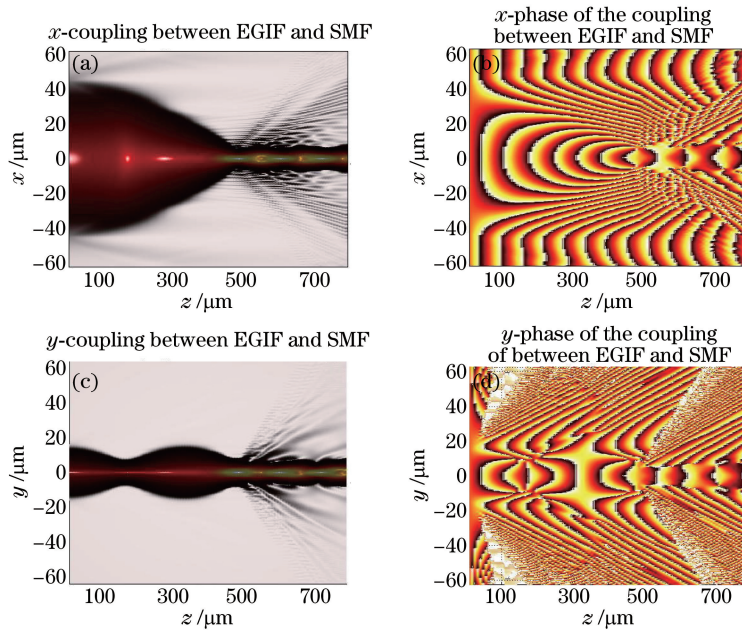


图5 EGIF与SMF的耦合光场分布特性。(a) x 向光场强度分布;(b) x 向光场相位分布;
(c) y 向光场强度分布;(d) y 向光场相位分布

Fig. 5 Coupling distribution characteristics of EGIF and SMF. (a) Intensity distribution of x direction;
(b) phase distribution of x direction; (c) intensity distribution of y direction; (d) phase distribution of y direction

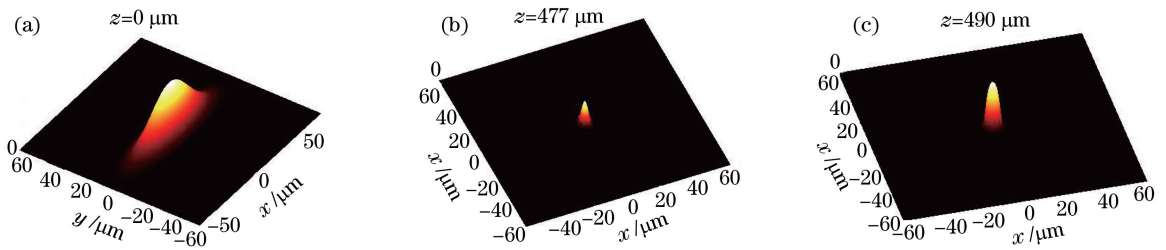


图6 耦合关键位置光场强度分布。(a) EGIF入射面;(b) EGIF与SMF耦合面;(c) SMF输出面
Fig. 6 Intensity distribution in key positions. (a) Incident plane of EGIF; (b) coupling plane between
EGIF and SMF; (c) output plane of SMF

在实际操作过程中,由于渐变折射率光纤的长度通常不易精确控制,因而长度容差对于该耦合系统而言是非常重要的参量。为此,计算了耦合损耗随EGIF在一周期长度内的变化情况(含各种损耗因素),相应的变化关系如图7所示。图中,损耗最低点位于 $477 \mu\text{m}$ 处,这与上述分析是完全对应的,以 $477 \mu\text{m}$ 为中心,随着EGIF的长度增长或减短系统的耦合损耗均会逐渐变大。达到1 dB损耗值所对应的长度容差为 $75 \mu\text{m}$ 左右,增长3 dB的损耗值所对应的长度容差为 $150 \mu\text{m}$ 左右。

此外,对EGIF的侧向偏移情况下的耦合过程也进行了研究,数值计算了相应的耦合损耗,如图8所示。其中 x -offset对应长轴方向的偏移损耗, y -offset对应短轴方向偏移损耗。由图8可知,长轴方向的偏移容差明显比短轴方向大,相应引入1 dB的损耗值所对应的长轴方向容差在 $28 \mu\text{m}$ 左右,而短轴方向容差为 $10 \mu\text{m}$ 左右。造成长轴与短轴方向容差差别的原因在于渐变折射率光纤的椭圆形纤芯结构设计,长轴方向芯区尺寸较短轴方向大,因而在聚拢光束的能力方面较强,受横向偏移的影响也较小。

综合以上各种偏离情况下的损耗特性,以附加1 dB损耗为上限,相应的容差如表2所示。

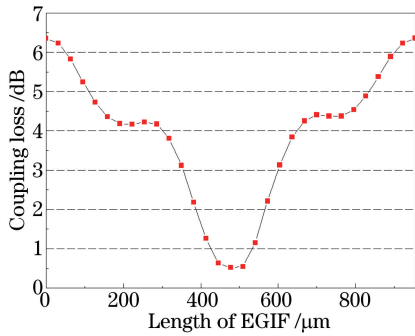


图7 EGIF长度变化对耦合损耗的影响

Fig. 7 Relationship between coupling loss and length of EGIF

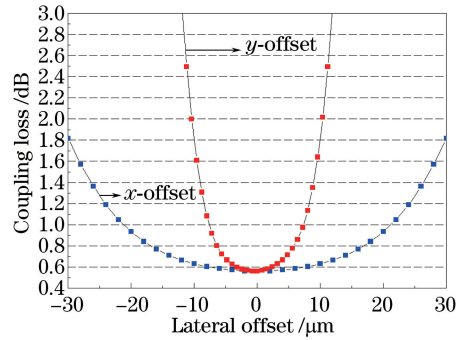


图8 侧向偏移情况下的损耗特性

Fig. 8 Loss characteristics of lateral offset

表2 不同偏离情况对应的1 dB损耗容差

Table 2 1 dB loss of tolerance for different deviations

Length-offset	x-offset	y-offset
75 μm	28 μm	10 μm

4 结 论

针对LD与单模光纤的耦合问题,提出了一种以渐变折射率光纤为核心光器件的耦合方法,并通过严密的理论及数值分析论证了该方法的有效性。渐变折射率光纤采用了大尺寸椭圆形纤芯结构,最大程度地匹配了激光二极管远场光束特性,同时其特殊的光束变换与整形能力确保了与单模光纤之间的高效耦合。此外,椭圆芯渐变折射率光纤的引入,降低了此类问题耦合光路中透镜的设计难度,使得简单透镜组即可满足高效耦合需求。结合矩阵理论与有限差分束传播法对耦合过程进行了相关分析,结果表明,在考虑到各种基础损耗之后,采用该方法仍可获得88%的耦合效率。该方法可为高功率单模尾纤输出半导体激光器封装模块的设计提供一定的借鉴参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Liu Qingwen, Wang Qingyue, Xue Yinghong, *et al.* 2.41 W ultrashort pulsed laser diode pumped Yb³⁺-doped fiber amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 819-822.
刘庆文, 王清月, 薛迎红, 等. 激光二极管抽运掺Yb³⁺光纤放大器获得2.41 W超短脉冲输出[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 819-822.
- [3] Wu Hualing, Guo Linhui, Wang Zhao, *et al.* Design of high brightness fiber-coupled diode laser system based on dual-emitters[J]. Chinese J Lasers, 2015, 43(10): 1001012.
吴华玲, 郭林辉, 王 昭, 等. 基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合系统设计[J]. 中国激光, 2015, 43(10): 1001012.
- [4] Wang Xiangpeng, Peng Hangyu, Li Zaijin, *et al.* 880 nm high-power fiber-coupled diode laser module for active illumination[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1500-1504.
王祥鹏, 彭航宇, 李再金, 等. 880 nm 半导体激光主动照明光纤耦合模块[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1500-1504.
- [5] Hu Fangrong, Xiong Xianming, Zhang Jianjia. Research on reliability of high power laser diode fiber coupling module [J]. Laser and Infrared, 2006, 36(5): 358-360.
胡放荣, 熊显名, 张剑家. 高功率半导体激光器光纤耦合模块的可靠性研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 358-360.
- [6] Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing, *et al.* High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers[J]. Chinese

- J Lasers, 2007, 34(11): 1472-1475.
- 高欣, 薄报学, 张晶, 等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1472-1475.
- [7] Zhu Hongbo, Hao Mingming, Liu Yun, *et al.* 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1684-1690.
- 朱洪波, 郝明明, 刘云, 等. 808 nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1684-1690.
- [8] Wang Yanhong, Wang Haiwei, Wang Gao. Design of high efficiency fiber coupling system based on microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041401.
- 王艳红, 王海伟, 王高. 基于微透镜阵列的高效率光纤耦合系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041401.
- [9] Hao Mingming, Zhu Hongbo, Qin Li, *et al.* Research on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class output power[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(6): 651-659.
- 郝明明, 朱洪波, 秦莉, 等. 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制[J]. 发光学报, 2012, 33(6): 651-659.
- [10] Ning Changchun, Chen Tianlu, Suo Langsangmu, *et al.* High power fiber coupled diode laser system[J]. Laser and Infrared, 2007, 37(10): 1041-1043.
- 宁长春, 陈天禄, 索朗桑姆, 等. 大功率半导体激光器光纤耦合技术研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1041-1043.
- [11] Huang Sunyuan, Gaebe Carl E, Kimberly A, *et al.* High coupling optical design for Laser diodes with large aspect ratio[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000, 23(2): 165-169.
- [12] Zan Qingbo, Hao Xiaojian, Zhou Hanchang. Design of laser light path of optical fiber coupling lens based on Zemax[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102201.
- 笕清波, 郝晓剑, 周汉昌. 基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102201.
- [13] Ming Y S, Kuan L Y, Huang S Y, *et al.* A novel scheme of lensed fiber employing a quadrangular-pyramid-shaped fiber endface for coupling between high-power laser diodes and single mode fibers[J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(5): 1374-1379.
- [14] Ogura A, Shiraishi K. A field-profile transformer utilizing a graded-index oval-core (GIO) fiber[J]. J Lightwave Technol, 2002, 19(1): 49-53.
- [15] He Y Z, Shi F G. A graded-index fiber taper design for laser diode to single-mode fiber coupling[J]. Opt Commun, 2006, 260(1): 127-130.
- [16] Wagner R E, Tomlinson W J. Coupling efficiency of optics in single-mode components[J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2671-2688.
- [17] Liang Yiping, He Huawei, Xiong Lingling, *et al.* A Partical-coherence model describing the far-field distribution of laser diode[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2180-2184.
- 梁一平, 何华伟, 熊玲玲, 等. 激光二极管远场分布的部分相干模型[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2180-2184.
- [18] Kishimoto R, Koyama M. Coupling characteristics between single-mode fiber and square law medium[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(6): 882-893.