

基于组合透镜与渐变折射率光纤改进 激光器耦合效率的新方法*

延凤平^{1)2)†} 刘鹏³⁾ 谭中伟¹⁾ 陶沛琳¹⁾ 李琦¹⁾
彭万敬¹⁾ 冯亭¹⁾ 谭思宇¹⁾

1) (北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

2) (全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

3) (邢台学院物理系, 邢台 054001)

(2011年12月5日收到; 2012年2月16日收到修改稿)

提出一种利用组合透镜系统与渐变折射率光纤相结合改进激光器管芯到单模尾纤耦合性能的新方法. 这种方法首先利用组合透镜系统对具有像散的激光器输出光束进行整形, 然后采用渐变折射率光纤对整形后的光束进行聚焦处理, 并将处理后的光束耦合进入普通单模光纤. 利用 Jones 矩阵理论分析表明, 采用这种方法可以得到 86% 的功率耦合效率, 1 dB 插入损耗对应的渐变折射率光纤长度、横向偏移和倾斜角容差分别为 60 μm , 30 μm 和 2.4°, 且结构简单, 便于操作, 特别适合于大功率激光的激光模块到单模光纤的耦合. 对于提高激光器输出功率, 改善光束质量具有重要意义.

关键词: 像散, 组合透镜, 光束整形, 耦合

PACS: 42.15.Eq, 42.60.By, 42.79.Ry

1 引言

如何提高激光器 (LD) 芯片与单模光纤之间的耦合效率是激光器研究领域永恒的研究课题, 它不仅直接关系到 LD 输出光的光束质量, 而且还关系到 LD 的成品率. 一般的耦合方式是在 LD 芯片出射端加聚焦透镜将 LD 芯片发射的光束聚焦后直接耦合进入单模光纤^[1-6]. 这种方法看起来简单, 操作方便, 但是对于无像散的 LD 出射光束来说, 其耦合效率只有 40%—60%, 而对于存在较大像散的 LD 出射光束而言, 其耦合效率仅可能达到 30% 左右, 而且对 LD 芯片出射面、聚焦透镜焦距及单模光纤入射面之间在位置及轴向相对偏移角度方面非常敏感^[7-11]. 因此, 研究并发现一种操

作相对简单、容差大且效率高的耦合方法对于提高 LD 出射功率、改善输出光束质量迫在眉睫.

条形半导体激光器通常根据侧向光束的导引机理分为增益导引型与折射率导引型两种. 增益导引型 LD 具有较大的像散, 在耦合设计中不能忽略其影响, 而折射率导引型 LD 的像散较小, 通常不予考虑^[12-15].

渐变折射率光纤具有特殊的光学特性, 在导波光领域具有广泛的应用前景, 特别是其在光束整形与模场变换等方面具有优势, 非常适合耦合光学领域使用^[16-21].

本文针对具有大像散的增益导引型半导体激光器与普通单模光纤的耦合问题, 提出一种全新的耦合方法. 这种方法首先利用组合透镜系统对 LD 出射的大像散椭圆形激光光束进行整形与汇聚, 得

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877042, 61077069)、河北省高等学校技术研究指导项目 (批准号: Z2011201) 和邢台市科学技术与发展计划 (批准号: 2011ZZ052-4) 资助的课题.

† E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

到圆形光束;其次利用渐变折射率光纤(GIF)的光束变换效应,将整形后的圆形光束进行束腰压缩,转化为与普通单模光纤(SMF)模场相匹配的光束并注入单模光纤,由此实现LD出射的大像散椭圆形激光光束与普通单模光纤的低损耗耦合.

2 基于组合透镜与渐变折射率光纤的耦合系统

图1为基于组合透镜与渐变折射率光纤的耦

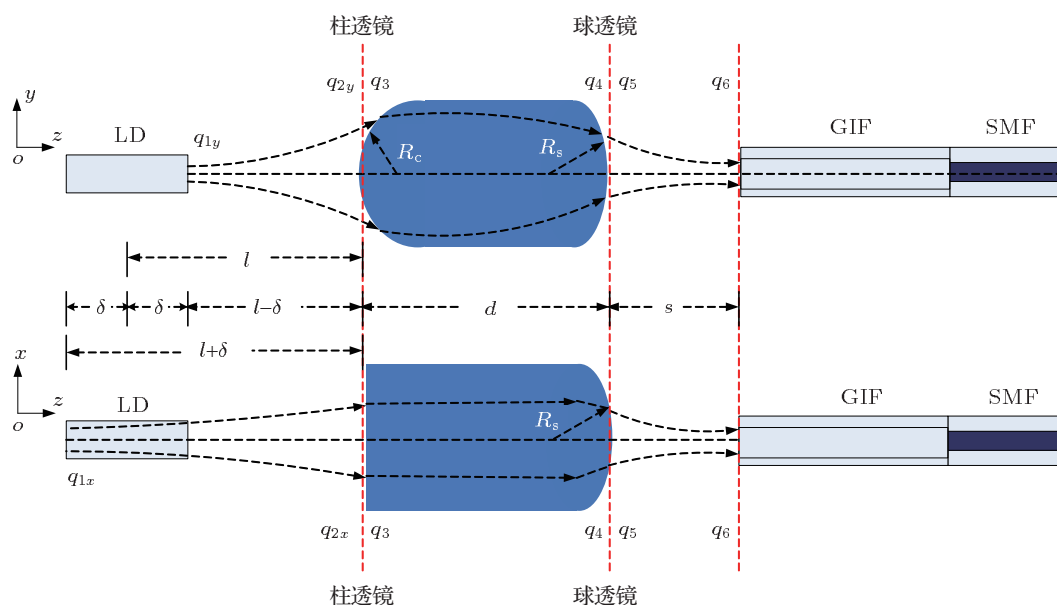


图1 基于组合透镜与GIF相结合的LD与SMF耦合系统结构示意图

图1中,LD管芯出射端的 q 参数可表示为

$$\begin{aligned} q_{1x} &= i\pi\omega_{0x}^2/\lambda, \\ q_{1y} &= i\pi\omega_{0y}^2/\lambda; \end{aligned} \quad (1)$$

平行结与垂直结方向在自由空间的传播矩阵分别表示为

$$\begin{aligned} M_{12x} &= \begin{pmatrix} 1 & l+\delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ M_{12y} &= \begin{pmatrix} 1 & l-\delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

于是到达柱透镜表面的 q 参数可分别表示为

$$\begin{aligned} q_{2x} &= q_{1x} + (l+\delta), \\ q_{2y} &= q_{1y} + (l-\delta); \end{aligned} \quad (3)$$

合系统光路结构示意图,其中上下图分别表示LD垂直结和平行结平面内的光束整形与耦合过程.设LD输出光为椭圆高斯光束,其像散为 2δ ,出射束腰分别为 ω_{0y}, ω_{0x} .组合透镜由入射透镜柱透镜和出射球透镜组成,柱面半径与球面半径分别为 R_c, R_s ,透镜厚度为 d ,折射率为 n .柱透镜对入射椭圆高斯光束进行整形^[22],使像散椭圆光斑成为无像散圆光斑;球透镜对整形后的光束进行汇聚,以期在GIF入射面获得具有平面波前的高斯光束.渐变折射率光纤纤芯半径为 a ,轴线处折射率为 n_0 ,纤芯边沿即包层折射率为 n_1 .

在平行结与垂直结方向,柱透镜的传输矩阵分别为

$$\begin{aligned} M_{23x} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/n \end{pmatrix}, \\ M_{23y} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (1-n)/(nR_c) & 1/n \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

经柱透镜整形后,两垂直方向的光束特性变为一致,即有统一的参数 q_3 ,于是

$$nq_{2x} = q_{2y} / [(1-n)/q_{2y}(nR_c) + 1/n]. \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式,简化后得

$$\begin{aligned} & i\pi\omega_{0x}^2/\lambda + n(l+\delta) \\ &= \frac{[i\pi\omega_{0y}^2/\lambda + (l-\delta)]}{(1-n)[i\pi\omega_{0y}^2/\lambda + (l-\delta)] + 1/n}. \end{aligned} \quad (6)$$

令 (6) 式等号左右实部与虚部分别相等, 可得关于 l 与 R_c 的方程组, 求解该方程组可以得到 LD 束腰中心与柱透镜间距和柱透镜的柱面半径

$$l = \frac{1}{2(Z_{R_x} - Z_{R_y})} \left\{ 2\delta(Z_{R_x} + Z_{R_y}) + \left[2\delta(Z_{R_x} + Z_{R_y})^2 - 4(Z_{R_x} - Z_{R_y})^2(\delta^2 - Z_{R_x}Z_{R_y}) \right]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

$$R_c = \frac{(n-1)(l^2 - \delta^2 - Z_{R_x}Z_{R_y})}{2\delta}, \quad (8)$$

其中 Z_{R_x} , Z_{R_y} 分别为椭圆高斯光束平行结、垂直结方向的瑞利距离. 上两式的结果显示, LD 束腰中心与柱透镜间距和柱透镜的柱面半径均只取决于 LD 的光束参数, 即只与束腰大小和像散相关.

利用 Jones 矩阵理论, LD 出射光经球透镜汇聚后入射到 GIF 表面的整个过程中, 变换矩阵可表示为

$$M_{36} = M_{56}M_{45}M_{34} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{(1-n)s}{R_s} & d + sn + \frac{(1-n)sd}{R_s} \\ \frac{1-n}{R_s} & \frac{(1-n)d}{R_s} + n \end{pmatrix}, \quad (9)$$

其中, M_{34} , M_{45} , M_{56} 分别表示厚透镜、球透镜及球透镜传播到 GIF 表面的变换矩阵. 于是

$$q_6 = \frac{q_3 + d}{(1-n)(q_3 + d)/R_s + n} + s. \quad (10)$$

经过整形并汇聚在 GIF 表面的入射光束为圆高斯光束, 具有平面波前, 即为束腰所在位置, 于是该处的 q 参数亦可表示为

$$q_6 = i\pi\omega_0^2/\lambda = iZ_R. \quad (11)$$

由 (10) 式与 (11) 式相等可得

$$\frac{q_3 + d}{(1-n)(q_3 + d)/R_s + n} + s = iZ_R. \quad (12)$$

利用

$$q_3 = nq_{1x} + n(l + \delta) = inZ_{R_x} + n(l + \delta), \quad (13)$$

(12) 式可化简得:

$$\left\{ R_s [n(l + \delta + s) + d] + n(1-n) [Z_{R_x}Z_R + ns(l + \delta)] + i \left\{ [nR_s(Z_{R_x} - Z_R)] + n(1-n) [sZ_{R_x} - Z_R(l + \delta)] \right\} \right\} = 0. \quad (14)$$

于是其虚部与实部同时为零, 即

$$\begin{aligned} R_s [n(l + \delta + s) + d] + n(1-n) [Z_{R_x}Z_R + ns(l + \delta)] &= 0, \\ nR_s(Z_{R_x} - Z_R) + n(1-n) [sZ_{R_x} - Z_R(l + \delta)] &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

选取如下参量:

$$\begin{aligned} A &= nZ_{R_x}, \\ B &= - \left\{ nZ_{R_x}^2 + (l + \delta) [n(l + \delta + s) + d - sn^2] \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$C = sZ_{R_x} \{ [n(l + \delta + s) + d] - n^2(l + \delta) \}.$$

结合 (11) 式, 求解方程组 (15), 可得到经整形与汇聚后得到的束腰位于 GIF 入射面处的圆高斯光束的束腰与球面半径:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\lambda \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right)}, \quad (17)$$

$$R_s = \frac{n(n-1) [sn(l + \delta) + Z_{R_x}Z_R]}{n(l + \delta + s) + d}. \quad (18)$$

表 1 耦合系统的初始参数值

$\lambda/\mu\text{m}$	n_0	n_1	n	$a/\mu\text{m}$	$\omega_{0x}/\mu\text{m}$	$\omega_{0y}/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$s/\mu\text{m}$
0.98	1.46	1.45	1.45	56	2.6	0.7	50	50

由上述分析过程可知, 一旦确定初始椭圆高斯光束参数、LD 像散值、透镜厚度以及球透镜与 GIF 间距等值, 则 LD 与透镜组间距、透镜参数以及最终得到的圆高斯光束参数即可获得. 表 1 给出一组典型耦合系统的光学参数, 根据 (7), (8), (17), (18)

式, 可计算出耦合系统的其他光学参数, 如表 2 所示. 由表 2 可知, LD 与柱透镜间距为 65 μm , 整形后在 GIF 入射面处得到高斯光束束腰为 30 μm .

圆高斯光束在 GIF 中传播过程中光斑半径的变化可表示为 [23]

$$\omega_f^2(z) = \frac{\omega_f^4}{\omega_0^2} [\sin(z/F)]^2 + \omega_0^2 [\cos(z/F)]^2. \quad (19)$$

其中 F 为归一化折射率: $F = a/\sqrt{2\Delta}$, Δ 为相对折射率差, $\Delta = (n_0^2 - n_1^2)/2n_0^2$, $\omega_f = \sqrt{\lambda F/\pi n_0}$. 利用一阶导数零点法得到极值点的传播位置

$$z_e = \frac{k}{2}\pi F = \frac{k}{2}L_T \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (20)$$

L_T 为高斯光束在渐变折射率光纤中的传播周期, $L_T = \pi F = \pi a/\sqrt{2\Delta}$. 由 (20) 式可知, 自初始位置开始, 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, 极值为

$$\omega_{e1}(z) = \frac{\omega_f^2}{\omega_0} = \frac{\lambda F}{\pi n_0 \omega_0} = \frac{\lambda a}{\pi n_0 \omega_0 \sqrt{2\Delta}}. \quad (21)$$

当传播距离为半周期长度的偶数倍时, 极值为

$$\omega_{e2}(z) = \omega_0. \quad (22)$$

由 (21) 和 (22) 式可知, 不同传播位置处的极值性质取决于 GIF 的横向模场半径和入射高斯光束束腰的大小. 当 $\omega_f > \omega_0$ 时, $\omega_{e1} > \omega_{e2}$, 半周期长度奇数倍位置取极大值, 偶数倍位置取极小值; 当 $\omega_f < \omega_0$ 时, $\omega_{e1} < \omega_{e2}$, 半周期长度奇数倍位置取极小值, 偶数倍位置取极大值. 由于在保持相对折射率差恒定的情况下, GIF 横向模场半径只与纤芯半径有关, 因此实际决定极值性质的是纤芯半径值与入射高斯光束束腰大小.

表 2 耦合系统的待定参数值

$l/\mu\text{m}$	$l - \delta/\mu\text{m}$	$l + \delta/\mu\text{m}$	$R_c/\mu\text{m}$	$R_s/\mu\text{m}$	$\omega_0/\mu\text{m}$
153	65	241	40	109	30

3 数值分析及讨论

图 2 所示为高斯光束在 GIF 中传播时光斑极值的判别示意图.

图 2 中, 当 $a > \pi n_0 \sqrt{2\Delta} \omega_0^2 / \lambda$, 即 a 与 ω_0 的取值空间位于图中左上方的空白区域时, 半周期长度奇数倍位置取极大值, 半周期长度偶数倍位置取极小值, 即有 $\omega_{\max} = \lambda a / (\pi n_0 \omega_0 \sqrt{2\Delta})$, $\omega_{\min} = \omega_0$; 当 $a < \pi n_0 \sqrt{2\Delta} \omega_0^2 / \lambda$, 即 a 与 ω_0 的取值空间位于图中右下方的阴影区域时, 半周期长度奇数倍位置取极小值, 半周期长度偶数倍位置取极大值, 即有 $\omega_{\max} = \omega_0$, $\omega_{\min} = \lambda a / (\pi n_0 \omega_0 \sqrt{2\Delta})$; 当 $a = \pi n_0 \sqrt{2\Delta} \omega_0^2 / \lambda$, 即 a 与 ω_0 的取值恰好在图中两大区域的边界曲线上时, 半周期长度奇数倍位

置与半周期长度偶数倍位置取相同值. 此时意味着入射高斯光束束腰与 GIF 横向模场半径大小一致, 即 $\omega_0 = \omega_f$.

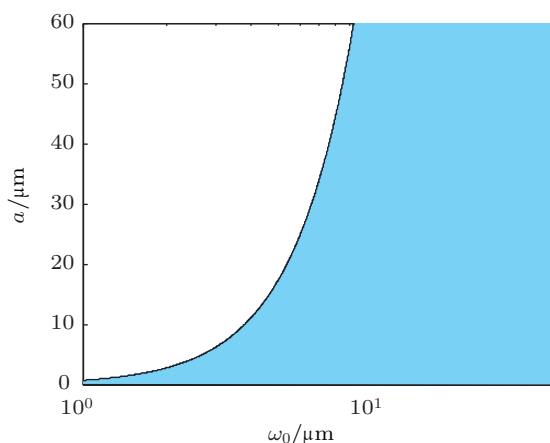


图 2 高斯光束在 GIF 中传播时光斑极值判别示意图

采用 Corning 公司的 SMF-28 型单模光纤, 其在 $0.98 \mu\text{m}$ 处的模场直径为 $3.13 \mu\text{m}$. 考虑到入射光束束腰为 $30 \mu\text{m}$, 则只要该光束在 GIF 中传播时光斑半径极小值小于普通单模光纤模场直径, 即能实现有效耦合. 根据 (24) 式, 取 GIF 纤芯半径为 $56 \mu\text{m}$, 折射率如表 1 所示, 则可计算出入射光束在 GIF 中的传播周期为 $L_T = 1186 \mu\text{m}$, 在半周期奇数倍位置出现光束极小值, 极小值 $\omega_{\min} = 2.68 \mu\text{m}$, 小于普通单模光纤的模场直径, 符合耦合条件.

图 3 所示为经透镜组整形后的光束束腰为 $30 \mu\text{m}$ 的高斯光束在所设计 GIF 中传播时光斑变化规律.

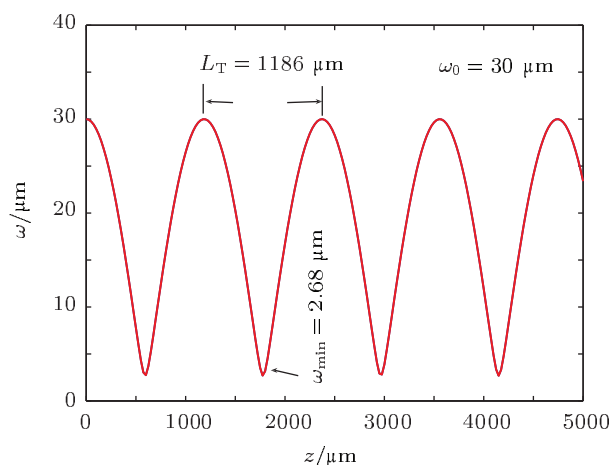


图 3 经透镜组整形后的 LD 入射光束在特定 GIF 中传播时光斑变化规律

利用束传播法 (BPM) 对耦合过程进行了模拟, 设定 GIF 长度为半周期长度为 $593 \mu\text{m}$, 为获得稳定的输出结果取 SMF 长度为 $400 \mu\text{m}$. 图 4 所示为 GIF 与 SMF 耦合过程的光场传播.

图 5 给出了耦合过程中几个关键位置的场分布特性, 分别对应 GIF 入射面、GIF 与 SMF 耦合面、SMF 输出面位置. 对比图 5(a)—(c) 可知, 在入射面位置光场具有大的输入光斑, 这与 GIF 的大芯径是相匹配的, 可以承载更多能量的光注入, 尽可能地避免了入射光的损失. 经过 GIF 的聚焦后到达

半周期位置时, 光斑达到最小值. 由于光斑半径小于 SMF 模场半径, 因此可以高效地耦合进入 SMF. 图 5(c) 为经过稳定传播后 SMF 中的场分布, 与图 5(b) 相比, 其光斑半径稍有增大.

图 6 给出了耦合面与 SMF 输出面位置处的横向场相位分布, 比较图 6(a) 与 (b) 可看到, 在 GIF 与 SMF 的交界面处场分布具有小光斑与平面波前, 而稳定传播后的 SMF 输出模场同样具有小光斑与平面波前, 两者很相似, 不存在相位失配的问题, 因此可获得较高的耦合效率.

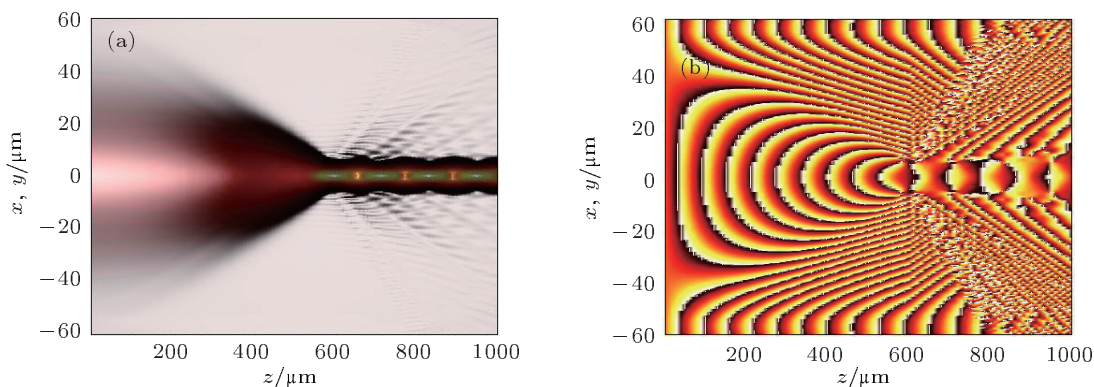


图 4 GIF 与 SMF 的耦合光场分布特性图 (a) 光场强度分布; (b) 光场相位分布

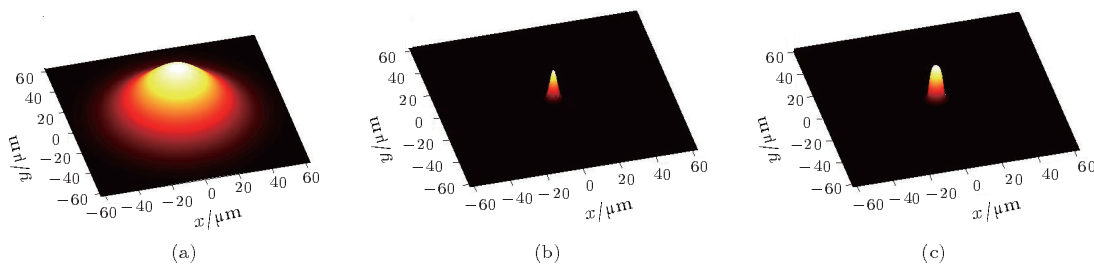


图 5 GIF 与 SMF 耦合过程中关键位置处光场强度分布 (a) GIF 入射面, $z = 0 \mu\text{m}$; (b) GIF 与 SMF 耦合面, $z = 593 \mu\text{m}$; (c) SMF 输出面, $z = 1000 \mu\text{m}$

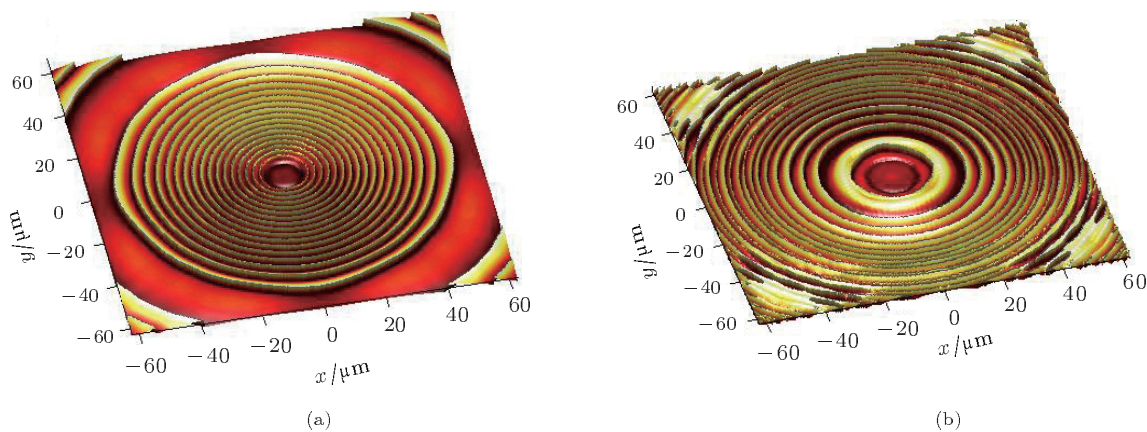


图 6 GIF 与 SMF 耦合过程中关键位置处光场相位分布 (a) GIF 与 SMF 界面, $z = 593 \mu\text{m}$; (b) SMF 输出面, $z = 1000 \mu\text{m}$

从几何光学角度来分析耦合过程, 则 GIF 在耦合过程中起到自聚焦透镜的作用. 在输入面至耦合面的距离内 GIF 对入射光具有很强的汇聚能力, 在半周期位置得到的聚焦光斑很小, 半径仅有 $2.68 \mu\text{m}$, 如此小的光斑半径从尺寸上完全满足与 SMF 的耦合要求. 由于一般情况下, 光斑半径越小, 其远场发散角越大, 如果耦合面处的远场发散角超过 SMF 数值孔径所对应入射角最大值 (半角: 12.5°), 则会有部分光在传播中通过 SMF 包层辐射出去, 加大耦合损耗. 通过计算发现该位置的光束远场发散角并不大, 在 GIF 中仅有 2.7° (半角, 基于半高全宽), 远小于 SMF 数值孔径所对应值, 满足入射条件, 因此从几何光学的角度同样证明了该耦合过程是高效的 [24,25].

以 P_1 表示 LD 入射光功率, P_2 表示 SMF 出射光功率, 定义耦合效率为 $\eta = P_2/P_1$, 定义耦合损耗为 $L = -10\lg(P_2/P_1)$. 通过上述 BPM 计算过程最终获得的耦合效率为 95.4%, 对应的损耗值为 0.2 dB. 一般情况下, 透镜组引入的损耗小于 0.1 dB, GIF 入射表面的菲涅尔反射损耗为 0.18 dB, GIF 与 SMF 间的熔接损耗小于 0.1 dB. 综合考虑上述所有情况, 总损耗值应为 0.58 dB, 对应的耦合效率为 88%.

由上述分析可知, 当 GIF 的长度为半周期的奇数倍时, 与 SMF 熔接后会获得最高效率的耦合, 但实际操作中往往并不容易精确控制 GIF 长度, 从而在一定程度上增大损耗. 图 7 所示为附加损耗随 GIF 长度变化的曲线. 由图 7 可知, 损耗最低点对应的 GIF 长度为 $593 \mu\text{m}$, 距离该点位置越远损耗值越大, 1 和 3 dB 的损耗容差对应的 GIF 长度分别为 60 和 $110 \mu\text{m}$.

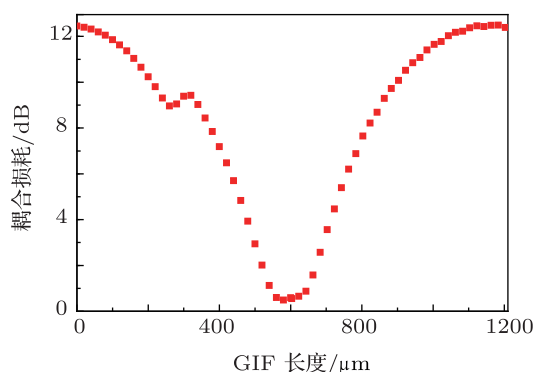


图 7 附加损耗随 GIF 长度的变化关系

图 8 所示为 GIF 横向偏移与倾斜角度入射所

引入的耦合损耗随横向偏移与倾斜角度的变化关系. 由图 8(a) 可见, 引入 1 dB 的损耗值所对应的横向偏移为 $30 \mu\text{m}$; 由图 8(b) 可见, 引入 1 dB 的损耗值所对应的倾斜角度为 2.4° , 且在 0° — 1.4° 的变化范围内具有近似恒定的损耗.

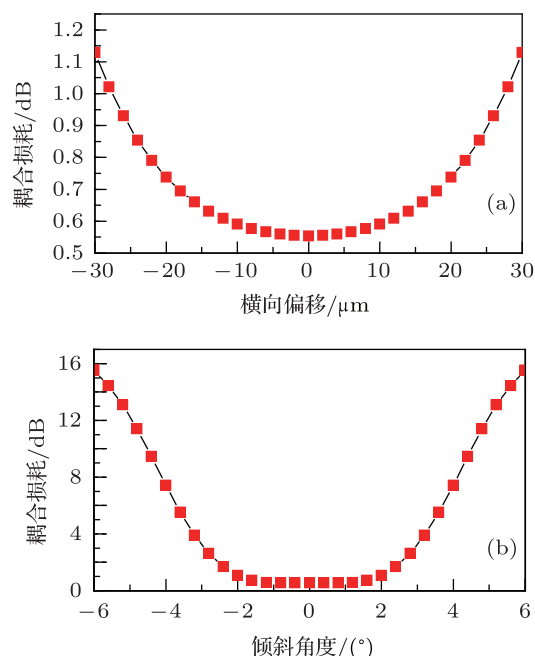


图 8 GIF 横向偏移与倾斜入射所引入的耦合损耗随偏移量的变化关系 (a) 横向偏移; (b) 倾斜角度

综合上述三种情况下损耗特性的分析, 以附加 1 dB 损耗为上限, 则对应的容差如表 3 所示.

表 3 不同偏离情况对应的 1 dB 损耗容差

类型	GIF 长度/ μm	横向偏移/ μm	倾斜角度/ $^\circ$
容差	60	30	2.4

4 结论

本文提出一种利用组合透镜系统与渐变折射率光纤相结合改进激光器管芯到单模尾纤耦合性能的新方法. 这种方法首先利用组合透镜系统对具有像散的激光器输出光束进行整形, 然后采用渐变折射率光纤对整形后的光束进行聚焦处理, 并将处理后的光束耦合进入普通单模光纤. 利用 Jones 矩阵理论对耦合过程进行了详细分析, 结果表明采用这种方法可以得到 86% 的功率耦合效率, 且耦合参数容差较大, 结构简单, 便于操作, 特别适合于大功率激光的激光模块到单模光纤的耦合. 这种方法对于提高激光器输出功率, 改善光束质量具有重要意义.

- [1] Ogura A, Shiraishi K 2002 *J. Light. Tech.* **20** 49
- [2] Shiraishi K, Yoda H, Endo T 2004 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **16** 1104
- [3] He Y Z, Shi F G 2006 *Opt. Commun.* **260** 127
- [4] Xiong D Y, Li Z F, Chen X S, Li N, Zhen H L, Lu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6648 (in Chinese) [熊大元, 李志锋, 陈效双, 李宁, 甄红楼, 陆卫 2007 物理学报 **56** 6648]
- [5] Kishimoto R, Koyama M 1982 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **30** 882
- [6] Ogura A, Kuchiki S, Shiraishi K 2001 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **13** 1191
- [7] Joyce W B, DeLoach B C 1984 *Appl. Opt.* **23** 4187
- [8] Saruwatari M, Sugie T 1981 *IEEE J. Quantum. Elect.* **17** 1021
- [9] Zhao G Y, Zhang Y X, Wang J Y, Jia J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1378 (in Chinese) [赵贵燕, 张逸新, 王建宇, 贾建军 2010 物理学报 **59** 1378]
- [10] Jian X G, Wu F T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4202 (in Chinese) [江新光, 吴逢铁 2008 物理学报 **57** 4202]
- [11] Yeh S M, Huang S Y, Cheng W H 2005 *J. Light. Tech.* **23** 1781
- [12] Bludau W, Rossberg R 1985 *J. Light. Tech.* **3** 294
- [13] Yoda H, Shiraishi K 2001 *J. Light. Tech.* **19** 1910
- [14] Yoda H, Sakurai T, Ogura A, Shiraishi K 2001 *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC '01)* Amsterdam, the Netherlands, September 30 – October 4, 2001 p418
- [15] Kuwahara H, Sasaki M, Tokoyo N 1980 *Appl. Opt.* **19** 2578
- [16] Hillerich B, Guttman J 1989 *J. Light. Tech.* **7** 99
- [17] Presby H M, Edwards C A 1992 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **4** 897
- [18] Kotsas A, Shiraz H G, Maclean T S M 1991 *Opt. Quantum. Elect.* **23** 367
- [19] Yang H M, Huang S Y, Lee C W 2004 *J. Light. Tech.* **22** 1395
- [20] Modavis R A, Webb T W 1995 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **7** 798
- [21] Li J L, Lü B D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3006 (in Chinese) [李建龙, 吕百达 2008 物理学报 **57** 3006]
- [22] Tang Z, Zhang R, Mondal S K 2001 *Opt. Commun.* **199** 95
- [23] Thual M, Chanclou P, Gautreau O 2003 *Elect. Lett.* **39** 1504
- [24] Yeh S M, Lu Y K, Huang S Y 2004 *J. Light. Tech.* **22** 1374
- [25] Lin I E 2005 *Precision Eng.* **29** 146

A novel method of improving coupling efficiency of laser diode based on synthesized lens with graduated index fiber*

Yan Feng-Ping^{1)2)†} Liu Peng³⁾ Tan Zhong-Wei¹⁾ Tao Pei-Lin¹⁾ Li Qi¹⁾
Peng Wan-Jing¹⁾ Feng Ting¹⁾ Tan Si-Yu¹⁾

1) (*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*Key Laboratory of All Optical Networks and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Beijing 100044, China*)

3) (*Physics Department of Xingtai College, Xingtai 054001, China*)

(Received 5 December 2011; revised manuscript received 16 February 2012)

Abstract

In this paper, a novel method of improving coupling efficiency of laser diode to single mode fiber based on synthesized lens with graduated index fiber is provided. The output beam with large astigmatism from laser diode is shaped and focused via synthesized lens and graduated index fiber, and then coupled into single mode fiber. Analysis using Jones matrix theory indicates that the power coupler effect of 86% is obtained from output port of the single mode fiber. The tolerances for fiber length of graduated index fiber, radial offset and tilt degree are 60 μm , 30 μm and 2.4 degree respectively for 1 dB insert loss. This method can be used for improving the quality of optical beam and increasing output power for laser diode to single mode fiber with a large output optical power.

Keywords: astigmatism, synthesized lens, beam shaping, coupling

PACS: 42.15.Eq, 42.60.By, 42.79.Ry

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60877042, 61077069), the Science and Technology Research Project of Colleges and Universities in Hebei Province, China (Grant No. Z2011201), and the Science and Technology Development Project of Xingtai, China (Grant No. 2011ZZ052-4).

† E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn