

doi: 10.3788/gzxb20124103.0294

用非球面透镜制作光纤约 1 : 1 空间耦合器

温午麒¹, 康建翎¹, 丁欣¹, 陆颖¹, 杨鹏飞¹, 伏祥勇¹, 宁鼎², 姚建铨¹

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2 中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

摘 要:针对光纤的泵浦耦合问题,对由两片非球面透镜组成的接近 1 : 1 光纤间空间耦合器进行了计算和实验验证.利用高斯光束的变化规律对光路进行了分析研究,并根据二极管输出光相干性不好的特点,对非球面透镜进行了光路追迹的模拟计算.研究发现,在泵浦光波长等因素发生变化时,利用非球面透镜组成的耦合系统较双曲面透镜有更高的稳定性.实验中选用符合计算结果要求的非球面透镜组成耦合装置,利用一台二极管激光器(尾纤输出端面直径约 200 μm , N. A. 约 0.2)泵浦一段芯径约 200 μm (N. A. 约 0.42)的多模光纤,耦合装置的透过率约 95%,在光纤端面有反射的条件下约 90%的泵浦光耦合进光纤.

关键词:类高斯光束;空间耦合器;非球面透镜;光纤

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0294-5

0 引言

在光纤激光器中,泵浦耦合部分负责将泵浦光传递到增益光纤的端面,泵浦耦合系统的优劣影响着激光器的整体效率等特性参量.由于泵浦源(二极管激光器)的尾纤及待泵浦光纤的端面尺寸比较小,光纤激光器的耦合具有一定的难度.使用光学镜片组成空间耦合器已有许多研究^[1-4],如通过购买方式获得现成的耦合装置,厂家一般不提供光路参量,当需要在耦合镜片中间放置反射镜等器件时会遇到困难.所以耦合装置特性的研究和测量对后续实验具有重要的指导意义.在很多关于耦合的文献中提到了耦合器需要满足的两个基本条件^[5],不少学者还关注了泵浦光(一般是二极管激光)的高斯光束特性,还有文献对高 M^2 值泵浦光情况进行了分析^[1,3].但目前设计空间耦合器主要问题还是减镜片的像差,文献[6-9]用球面透镜搭建的耦合装置聚焦出的光斑是一环形,聚焦效果不好.用非球面透镜能很好地消除透镜的球差,在一些实验中也已得到应用.本文研究了一台二极管激光器(尾纤输出端面直径标称 200 μm ,数值孔径 0.2)到一根芯径尺寸大约相同光纤的泵浦耦合问题,对由两个相同的非球面透镜组成的约 1 : 1 耦合装置的光路进行了计算.用高斯光束理论和非相干的面光源光模型进行了理论分析,对非球面透镜及耦合器光路进行了光

线追迹计算,参照计算结果选取了符合要求的非球面透镜组成了耦合装置.将此耦合装置用于将一 LD 泵浦源到一芯径尺寸大约相同的多模光纤间的耦合,实验测量了耦合效率.结果表明,这种耦合器具有多种优点,结构简单,只用一种透镜;光路基本呈左右对称的特性,中间可放反射镜等器件;能很好地消像差,为使用非球面透镜在光路设计上提出了较高的要求.

1 理论分析及光路计算

耦合设计需要考虑光源所具有的面积、发散角和相干特性.而二极管激光器在尾纤端面输出后特性比较复杂,本文使用 975 nm 二极管激光器,用红外成像装置测得的远场光斑如图 1.测量光谱,带宽约 1 nm,相干性不是很好.

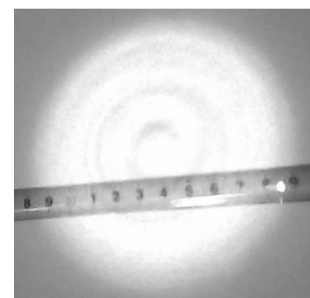


图 1 二极管激光器远场光斑
Fig. 1 Far field spot of the LD

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(No. 2010CB327801)、国家自然科学基金重点项目(No. 60637010)、国家自然科学基金(No. 60971027,60978021,10874128,61178028)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0610)资助

第一作者:温午麒(1970-),男,副教授,博士,主要研究方向为固体激光器. Email: lasertju@163.com

收稿日期: 2011-05-30; **修回日期:** 2011-11-15

文献[1-3]认为输出光束可以描述为束腰同在尾纤端面的一些不同阶横模高斯光束的组合. 高阶高斯光束等相位面的变化规律与基模高斯光束是相同的. 无论高阶横模还是基模,都可以用基模的 q 参量进行光路的计算,而对于 M^2 值为 m^2 的模来说,相同位置处光斑尺寸是基模的 m 倍. 本文的耦合光路如图 2. LD 的尾纤端面放在第一个透镜的前焦平面,而待泵浦的光纤将放在第 2 个

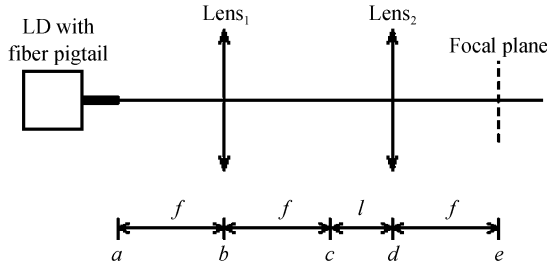


图 2 耦合系统

Fig. 2 Schematic diagram of coupling system

透镜的后焦平面. 在图 2 的 a 点,基模的 q 值为

$$q_a = i\pi\omega_0 / \lambda \tag{1}$$

基模经两个透镜后, e 处的 q 参量为

$$\frac{1}{q_e} = \frac{f-l}{f^2} - i \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \tag{2}$$

所以在 e 处基模的光斑尺寸与 a 处的相等. 同样高阶横模在 e 处的光斑尺寸也与 a 处相应阶模式的光斑尺寸相同. 虽然 e 处不一定是束腰位置,但在 e 处获得的光斑的整体尺寸将与尾纤的输出面尺寸相同. 当 $l=f$ 时, e 处为光束束腰.

分析时,假定透镜是无像差的. 实验所用的二极管激光器的数值孔径为 0.2,需要考虑像差的因素. 这样,利用(高阶)高斯光束模型对耦合的分析转化为消镜片的像差工作. 另外衍射也会对聚焦质量有影响并使最后获得的光斑只能接近于 LD 尾纤端面尺寸.

文献[10]曾将激光二极管出射的高斯光束等效为大量光线. 根据大功率二极管泵浦源相干性不是很好的特点,可以将二极管激光器的尾纤端面近似为非相干的面光源,并且发出的光具有一定的张角. 该模型虽然有些极端,但可按本文图 3 的方式使用普通的光线追迹方法计算,计算难度小,并适于考察透镜像差的影响. 图 2 中 a 处是 $lens_1$ 前频谱面,而 e 是 $lens_2$ 的后频谱面,当两个透镜相同时 e 处的像的尺寸应与 a 处物的尺寸相等. 这一结论与采用高斯光束概念的分析结果相同,但在其它方面两种方法的计算结果有一些细微差异. 如图 2 中 l 的改变将改变 $lens_2$ 像空间中高斯光束束腰位置,而且束腰尺寸可能会小于 f 处的尺寸. 考虑到光线追迹方法对本实验的合理性和可行性,本文采用该方法计

算耦合器的耦合效果.

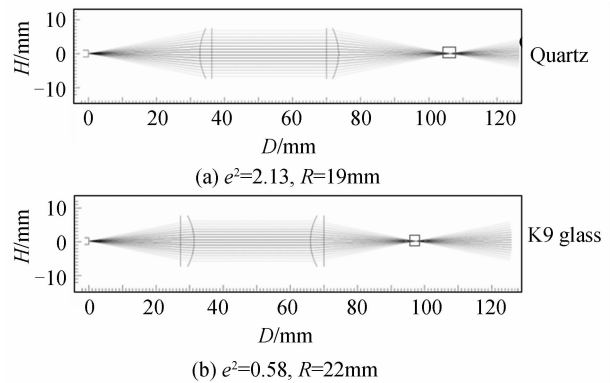


图 3 耦合系统的光路

Fig. 3 The optical pathway diagram of the coupling system

由于非球面透镜的制作难度等因素,在二次曲线范围内设计透镜的表面,考虑到制作的工艺等原因,透镜设为平凸透镜,凸面由方程(3)旋转产生^[11]

$$Z(Y) = \frac{Y^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1 - e^2)R^2Y^2})} \tag{3}$$

式(3)中的 e^2 决定了曲线的形状, $e^2 = 0$ 时为球面, $0 < e^2 < 1$ 为椭球面, $e^2 = 1$ 为抛物面, $e^2 < -1$ 为扁圆, $e^2 > 1$ 为双曲面.

研究透镜的质量可以考察点光源的成像效果. 由于泵浦源的发射光束有一定的发散角 ($N. A. = 0.2$), 程序中将点光源的出射光束赋予同样的发散角特性. 利用程序计算非球面曲线的 e^2 来确定其形状, 此处选取两片平凸透镜组成耦合系统. 透镜凸面的放置可分两种情况: 第一种为两透镜凸面分别朝向泵浦源和待耦合的光纤; 第二种为两透镜平面分别朝向泵浦源和待耦合的光纤. 在程序运行中将 e^2 初始值设为 0, 之后逐步改变 e^2 并观察点光源成像效果, 得出 e^2 的最佳取值. 计算发现: 第一种方案下, 透镜曲线方程中的 $e^2 > 1$, 为双曲线; 第二种方案下, 透镜曲线方程中的 $0 < e^2 < 1$, 为椭圆.

在第一种方案下, 以 $\varphi 20$ mm 透镜为例, 为使准直光束与镜片尺寸相匹配, 将透镜的 R 设为 19 mm. 如材料选为石英时, 在 975 nm 波段的折射率约为 1.4585, 经计算得出 e^2 最佳值约为 2.13, 为双曲面透镜. 此时点光源的耦合光路如图 3(a), 图中透镜凸面朝向泵浦源和光纤端面 ($e^2 = 2.13, R = 19$ mm), 透镜材料为石英, 方框位置为光线聚焦处, 点光源所成光斑直径约 $0.2 \mu\text{m}$. 该方案中由透镜的非球面完成光线的准直和聚焦, 因此理论上透镜厚度变化不会影响成像效果. 在第二种方案下, 以 $\varphi 20$ mm 透镜为例, 为使准直光束与镜片尺寸匹配, 透镜凸面的 R 值设为 22 mm. 当材料为 K9 玻璃时, 其 975 nm 波段折射率约为 1.50, 经计算得出 e^2 约为 0.58 时耦合效果最佳, 为椭球面透镜. 此时点光

源的耦合光路如图 3(b), 输出光斑直径为 $1.3 \mu\text{m}$. 不同于上一方案, 该方案中透镜厚度对于成像效果存在一定影响, 但经程序计算显示透镜厚度的变化对成像效果影响不大.

图 4 为采用球面透镜和两种非球面透镜组成的耦合系统光线聚焦处的放大图. 图 4(a) 是使用普通

球面镜进行耦合时的效果, 图中可见存在明显的球差, 光束的聚焦效果不好. 由图 4(b) 和 (c) 分别是图 3(a) 和 (b) 小方框区域的放大图, 可以看出, 用非球面透镜并进行优化设计后的耦合系统, 泵浦光汇聚到了很小的范围内. 聚焦光斑很小, 预计可以满足 (尽量接近) $1:1$ 的耦合要求.

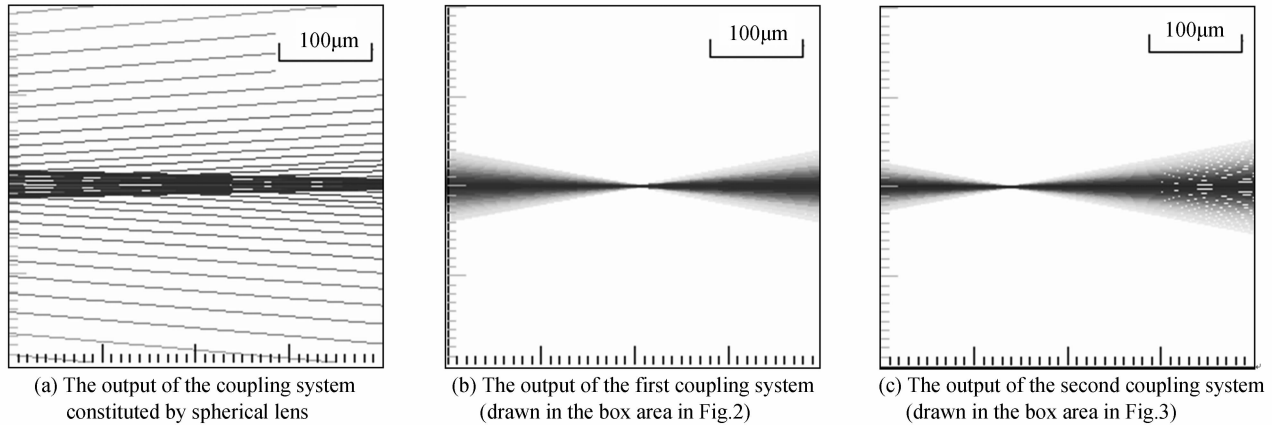


图 4 泵浦光聚焦处的放大图

Fig. 4 The enlarged drawing of pump beam focus region

计算所得的透镜参量如 e^2 是针对特定波长和透镜材质的. 在泵浦光波长或透镜材料改变时, 将会引起折射率的改变, 透镜的参量如 e^2 值要重新计算. 值得注意的是, LD 在工作过程中, 出射光波长会在一定范围内漂移, 也会导致透镜对泵光的折射率发生变化. 所以耦合器的设计还要考虑折射率变化对于耦合系统输出的影响. 表 1 给出了在折射率发生变化时, 点光源对应的两种非球面透镜 (组成的两种耦合器) 的输出光斑的变化情况.

表 1 输出光斑尺寸随透镜折射率的变化
Table 1 Relationship between the changes of output spot and lens refractive index

	Refractive index	Spot diameter/m
Plan 1	1.4285	91.8
	1.4385	57.2
	1.4485	27.0
	1.4585	0.2
	1.4685	23.2
	1.4785	43.8
	1.4885	61.9
Plan 2	1.47	1.3
	1.48	1.3
	1.49	1.0
	1.50	1.3
	1.51	1.4
	1.52	1.8
	1.53	2.4

由表 1 可见, 采用双曲面透镜组成的耦合系统其输出光斑的尺寸对于折射率的改变较为敏感, 而采用椭球面透镜的情况下, 点光源输出光斑的尺寸

随折射率的变化不大, 基本保持在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的水平. 说明其在波长产生漂移的情况下具有很好的稳定性, 并且可用于目标波长附近一定范围内其它波段的耦合. 另外通过计算得知, 在镜片厚度和 e^2 在一定范围变化时, 采用椭球面透镜具有更高的稳定性. 若点光源经耦合成直径为 r' 的光斑, 可推知直径为 r 的面光源经该耦合系统将成直径 $r+r'$ 的光斑. 可见采取第二种方案, 聚焦光斑只比尾纤端面尺寸略大 $1 \sim 2 \mu\text{m}$, 再加上衍射的影响, 耦合效果接近于 $1:1$ 的比例, 且对波长的变化具有很好的稳定性.

2 实验

实验选用 LightPath 公司的 LENS CODE 8630562 型号透镜组成耦合系统, 该透镜数值孔径 N. A. 为 0.24, 采用了十次方程曲线, 在 633 nm 可完全消除球差. 厂商标注的透镜非球面方程为

$$Z(Y) = \frac{Y^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1 - e^2)R^2 Y^2})} + A_4 Y^4 + A_6 Y^6 + A_8 Y^8 + A_{10} Y^{10} + A_{12} Y^{12} + A_{14} Y^{14} + A_{16} Y^{16} \quad (4)$$

式中 e^2 约 0.573 5, 曲线的高次项系数均为 $10^{-7} \sim 10^{-11}$ 数量级, 总体接近于二次方曲线. 但实验所用 LD 并不工作在 633 nm. 透镜在 633 nm 的折射率为 1.587 1, 根据厂商给出的折射率数据, 经插值计算得到该镜片在 975 nm 的折射率为 1.578 6. 由于折射率的变化, 透镜在 975 nm 处不可能完全消除球差, 但从二次方程的角度看, 由于两波长处折射率相差不多, 此透镜还是基本满足要求的. 计算中, 将透镜

的方程简化为一条二次曲线。

透镜按 e^2 约 0.5735 的二次曲线来考虑,对点光源的耦合光路如图 5(a),点光源所成光斑直径为 $1.3 \mu\text{m}$ 。以位于 LD 尾纤中心和边缘的三个点光源代表 LD 尾纤输出端面,计算其耦合光路,结果如图 5(b),输出光斑直径为 $201.4 \mu\text{m}$ 。计算结果表明其聚焦效果很好,符合系统设计要求。

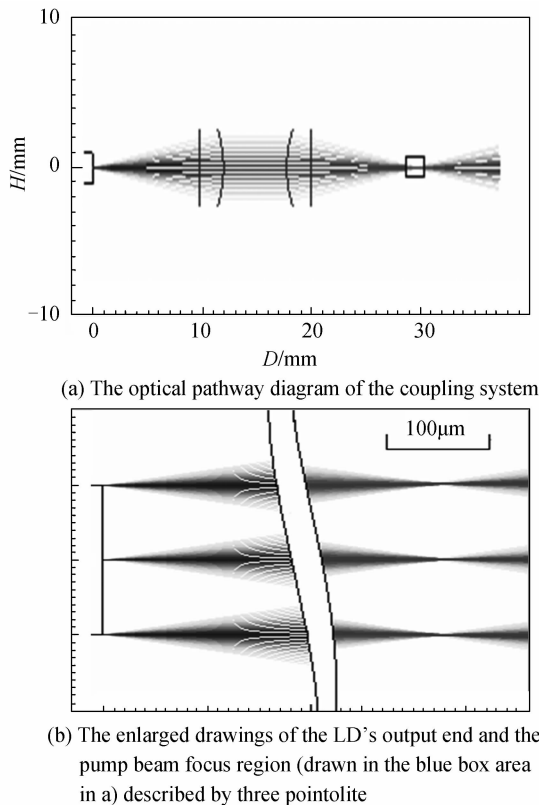


图 5 采用 LENS CODE 8630562 型号透镜构成的耦合系统的输出结果

Fig. 5 Output of the coupling system constituted by LENS CODE 8630562

透镜表面镀了宽带增透膜, $975 \mu\text{m}$ 处的透过率约 99.6%, LD 输出功率在 0~95 W 范围测量,耦合器的透过率约 95%。

由于 LD 尾纤端面直径标称 $200 \mu\text{m}$, 实验使用电子科技集团公司第四十六所生产的芯径标称 $200 \mu\text{m}$ /包层直径 $250 \mu\text{m}$ 的多模光纤来测量耦合装置的耦合效率。首先测量出此光纤芯径约 $204 \mu\text{m}$, 数值孔径 N. A. 约 0.42; 对 LD 尾纤端面测量, 发光区直径约 $194 \mu\text{m}$, N. A. 约 0.2。将多模光纤的一个端面放置到泵浦光会聚处, 多模光纤长度约 150 mm, 测量从光纤另一端透射的光能量, 在 LD 功率 0~95 W 范围内约 86% 的 LD 功率从光纤端面透射。考虑到多模光纤表面没有镀增透膜, 设端面的反射率为 4%, 则约 90% 的 LD 功率进入了多模光纤的光纤芯。假设光纤端面镀增透膜, LD 功率的 93% 能耦合进光纤芯。

由于衍射效应的存在, 使得该系统中点光源在不考虑球差的情况下会因衍射形成直径为 $5 \mu\text{m}$ 的光斑。对比点光源因球差所成的 $1.3 \mu\text{m}$ 光斑(计算值), 可见此时衍射效应成为影响耦合效率的主要因素。由于衍射使得耦合器输出光斑略大于待耦合光纤纤芯, 使这种由两个相同镜片组成的耦合器理论上不能实现绝对的 1:1 耦合, 同时影响耦合效率。

3 结论

理论分析和计算表明, 在泵浦光波长等因素发生变化时, 利用椭球面透镜组成的耦合系统较双曲面透镜有更高的稳定性。并在实验中利用非球面透镜实现了高效率的接近于 1:1 的光纤间的耦合。在 LD 尾纤端面尺寸 $194 \mu\text{m}$, 被耦合的多模光纤芯径 $204 \mu\text{m}$ 的情况下实现了约 90% 的 LD 功率耦合进多模光纤。

参考文献

- [1] DENG Yuan-long, YAO Jian-quan, RUAN Shuang-chen, *et al.* Design of lens coupling system between fibers for high power laser beam[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2005, **20**(3): 7-10.
邓元龙, 姚建铨, 阮双琛, 等. 大功率激光光纤透镜耦合系统设计[J]. *光电技术应用*, 2005, **20**(3): 7-10.
- [2] DENG Hua-qiu, LONG Qing-yun, XU Jie-han. Lens coupling of gaussian beam between optical fibers[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5): 602-610.
邓华秋, 龙青云, 许捷翰. 高斯光束在光纤间的透镜耦合[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5): 602-610.
- [3] LI Wu-jun, WANG Tao, WANG Xiao-ying, *et al.* Space coupling technology of multi-mode fiber coupling LD output beams[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2006, **26**(1): 87-90.
李武军, 王涛, 王晓颖, 等. 多模光纤耦合 LD 输出光束的空间耦合技术[J]. *西安工业学院学报*, 2006, **26**(1): 87-90.
- [4] ZHANG Fan, WANG Chun-can, GENG Lei, *et al.* Transmission grating coupler for side-pumping high-power double-clad fiber lasers[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1): 38-42.
张帆, 王春灿, 耿蕾, 等. 用于高功率侧向泵浦的透射光栅耦合器[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(1): 38-42.
- [5] LI Yu, ZHANG Kuo-hai, LI Qiang, *et al.* Research on fiber optic coupling for the high-power laser beam[J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(5): 276-278.
李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. *应用激光*, 2004, **24**(5): 276-278.
- [6] WU Zhong-lin, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Beam reshaping and coupling system of the pump source in DCF laser[J]. *Science Technology and Engineering*, 2004, **4**(2): 115-117.
吴中林, 楼祺洪, 周军, 等. 双包层光纤激光器泵浦源的光束整形及耦合系统[J]. *科学技术与工程*, 2004, **4**(2): 115-117.
- [7] YANG Hua-jun, HU Yu, XIE Kang. Optimum design for high precision laser beam collimation system of free-space laser communication[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(6): 724-727.
杨华军, 胡渝, 谢康. 光通信中高准确度激光束准直系统优化设计[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(6): 724-727.

- [8] AKIRA O, YASUO S, NOBUHIRO K, *et al.* Multichannel optical coupling with an aspherical lens and its application to an all-optical monolithic wavelength converter module [C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 2002, **52**: 29-33.
- [9] WENG Xiao-yu, GUO Han-ming, DONG Xiang-mei, *et al.* Focusing characteristics of laguerre-gaussian radially polarized beam through high numerical aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 798-802.
翁晓羽, 郭汉明, 董祥美, 等. 拉盖尔高斯径向偏振光高数值孔径聚焦特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 798-802.
- [10] LIN Lin, LI Bing-bin, GUO Zhen, *et al.* Light intensity distribution of fiber-coupled laser beam and analysis of impact factors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1205-1210.
林林, 李兵斌, 过振, 等. 光纤耦合激光束输出光空间分布及其影响因素分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1205-1210.
- [11] KIM H T, YANG H J. Semi-continuous interpolation algorithm for aspherical surface grinding [C]. *TENCON 2005*, 2005 IEEE Region 10:1-5.

Fiber Spatial Coupler of About 1 : 1 Ratio Constituted by Aspherical Lens

WEN Wu-qi¹, KANG Jian-yi¹, DING Xin¹, LU Ying¹,
YANG Peng-fei¹, FU Xiang-yong¹, NING Ding², YAO Jian-quan¹

(1 *Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Institute of Laser & Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(2 *The 46th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China*)

Abstract: For the aim of the fiber pump coupling, calculation and experiment are carried out for the fiber 1 : 1 spatial coupler composed of two aspherical lens. Optical pathway is analyzed according to the variation regularity of Gaussian beam. According to the poor coherence of the LD output beam, ray tracing calculation is carried out for the optical pathway diagrams of the coupler. It can be found that the coupler constituted with ellipsoid lens is more stable than that with hyperboloid lens in the case of the wavelength changing and so on. The aspherical lens that meets the calculation result is chosen to constitute the coupler. The couplers with transmittance of 95% composed for the experiments demonstrated a coefficient of 90% LD coupling into a length of multimode fiber with core diameter of 200 micro-meter without antireflection coating at the end surface.

Key words: Gaussian like beam; Spatial coupler; Aspherical lens; Fiber