

文章编号 1004-924X(2014)12-3205-07

湍流环境中光纤耦合效率的提高

宋鸿飞*, 车英, 赵馨, 李鹏飞, 周见红

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:在空间激光通信应用中,空间光与单模光纤的耦合效率是影响通信系统性能的重要因素。考虑大气湍流会降低激光与光纤的耦合效率,本文从湍流强度与光学系统分辨率之间的关系出发,研究了大气湍流对光纤耦合效率的影响,导出了接收口径、系统焦距、入射光波长、接收光纤半径、大气相干长度等与单模光纤耦合效率之间的关系。提出了两种在湍流环境中提高光纤耦合效率的方法。方法一是在外界湍流强度发生变化时,通过改变耦合系统焦距,使耦合效率保持在较高值;方法二则是采用锥状光纤接收来提高耦合效率。最后对提出的方法进行了分析、仿真和室外耦合效率测试,验证了所提出的改善耦合效率方法的有效性。

关键词:空间激光通信;光纤耦合效率;大气湍流;锥状光纤

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3205

Improvement of fiber coupling efficiency in atmospheric turbulence

SONG Hong-fei*, CHE Ying, ZHAO Xin, LI Peng-fei, ZHOU Jian-hong

(College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: yaogee@163.com

Abstract: In high speed free space optical communication systems, the efficiency that a laser beam is coupled into a single-mode fiber is an important factor. However, the laser propagation through atmospheric turbulence degrades the fiber coupling efficiency. According to the relation between turbulence intensity and optical system resolution, this paper explores the effect of atmospheric turbulence on fiber coupling efficiency, and derives the relationship of the receiving aperture, focal length, the wavelength of incident light, fiber radius and atmospheric coherence length with the single mode fiber coupling efficiency. Two methods were proposed to improve the fiber coupling efficiency in a turbulence environment. The first method is to maintain the coupling efficiency to be the maximum by adjusting the focal length of the coupling system when turbulence environment is deteriorated. The second one is to use a taper fiber in receiving end of the focal plane to improve the coupling efficiency. Finally, corresponding analysis, simulation and a coupling efficiency experiment at outdoor were performed, and it verifies the effectiveness of the improved method for fiber coupling efficiency.

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-08-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11104020)

Key words: space laser communication; fiber coupling efficiency; atmospheric turbulence; tapered optical fiber

1 引言

1 550 nm 波段激光在通信上的应用,使光相干探测、光前置放大、光波分复用等技术遍及到激光通信领域,从而为通信系统的高速化、小型化提供了前提条件^[1]。在空间激光通信中,上述技术应用的前提是将空间光耦合到单模光纤中,因此光纤耦合效率是一个主要问题^[2-5]。理想情况下,空间光到单模光纤的耦合效率主要受模式匹配、对准偏差、菲涅尔反射、吸收损耗、平台振动等影响,理论计算的最大耦合效率约为 81%^[6]。在大气湍流中实现光纤耦合还必须考虑大气湍流对耦合效率的影响,通常情况湍流中的耦合效率是大气折射率结构常数、链路距离、天顶角等的函数。另外,湍流引起的光强闪烁、光束漂移、光斑扩展等都会对耦合效率产生影响。湍流中提高耦合效率的方法^[7-8]主要有自适应光学、相干光纤阵列接收等方法。其中,自适应光学方法可使湍流环境中单模光纤的耦合效率提高约 2.5 倍,耦合效率为 60% 左右;相干光纤阵列耦合和具体使用的光纤阵列单元数目、口径等因素有关,如 7 单元光纤阵列在湍流环境中,当保证耦合效率为 0.1 时,可使激光传输距离提高 2.5 倍,即从 400 m 提高到 1 000 m。本文从湍流强度与接收系统分辨率角度出发,研究了湍流中光纤的耦合效率。从 Fried 理论导出接收口径、系统焦距、入射光波长、接收光纤半径、大气相干长度与耦合效率之间的关系。根据理论推导结果,研究了湍流环境中提高光纤耦合效率的方法,并完成了相关分析、仿真与测试实验。

2 光纤耦合效率

理想情况下光纤耦合效率的计算^[9-10]是光波场模式匹配的结果,耦合效率是艾利光波场与高斯光波场相关运算的结果。本文使用一个口径为 D , 焦距为 f 的薄透镜完成了空间光到单模光纤耦合,其耦合结构如图 1 所示。

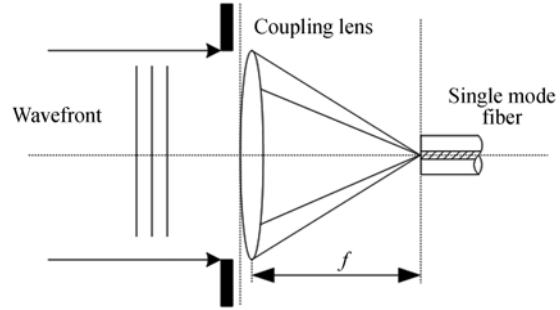


图 1 空间光到单模光纤耦合原理图

Fig. 1 Geometry of optical system for space light coupling to single mode fiber

耦合效率 η 计算在透镜焦平面处完成,表示为耦合到光纤中的光功率均值 $\langle P_c \rangle$ 与入射光场光功率均值 $\langle P_i \rangle$ 的比值:

$$\eta = \frac{\langle P_c \rangle}{\langle P_i \rangle} = \frac{\langle \left| \int_A U_i(r) U_m(r) dr \right|^2 \rangle}{\langle \left| \int_A U_i(r) dr \right|^2 \rangle}, \quad (1)$$

式中: $U_i(r)$ 为入射光波模场,在透镜焦点处为艾利模场。如果不考虑相位分布,只考虑强度分布, $U_i(r)$ 表示为:

$$U_i(r) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[2 \frac{J_1(3.83r/\omega)}{(3.83r/\omega)} \right], \quad (2)$$

其中: D 为接收口径, f 为耦合透镜焦距, λ 为入射光波长, ω 为艾利光斑的模式半径, J_1 为第一类贝塞尔函数, r 为极坐标下的距离。

$U_m(r)$ 为光纤断面模场,用高斯函数表示为:

$$U_m(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

式中: r 为极坐标下的距离; ω_0 为单模光纤的模式半径。

将式(2)、(3)带入式(1)中完成耦合效率计算,计算时使用贝塞尔公式可得到:

$$\eta = \left| \int \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0} J_1\left(\frac{3.83}{\omega} r\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) dr \right|^2. \quad (4)$$

对式(4)完成积分运算,得到:

$$\eta = 2\pi \exp\left(-\frac{3.83^2}{4} \frac{1}{(\omega/\omega_0)^2}\right) \times I_{1/2}^2\left(\frac{3.83^2}{8} \frac{1}{(\omega/\omega_0)^2}\right), \quad (5)$$

式中: $I_{1/2}$ 为修正的二分之一阶贝塞尔函数。以 ω/ω_0 为自变量, η 为因变量绘制出图 2。

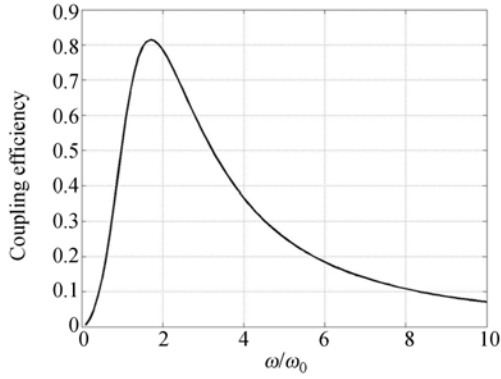


图 2 模式匹配时的光纤耦合效率

Fig. 2 Fiber coupling efficiency on pattern matching

由图 2 可以看出,理想情况下当艾利模场和高斯模场满足一定关系时,耦合效率存在最大值。求解式(5)的极值,可得当 $\omega/\omega_0 = 1.709$ 时,方程解有极大值 $\eta \approx 0.81$ 。此时,耦合系统中的相关参数满足关系:

$$\frac{D\pi\omega}{2\lambda f} = 1.12. \quad (6)$$

3 湍流中光纤耦合效率

大气湍流对传输激光在接收端主要产生光强闪烁、光束漂移、光斑扩展效应^[11-13]的影响。其中光强闪烁会引起光功率的波动,从而导致光纤耦合效率的波动。如果计算瞬时耦合效率,将是一个波动的值,与耦合效率的计算公式不符。根据式(1)可知其结果是均值,耦合计算依据光波复振幅完成,与光波相位无关,故在湍流中影响耦合效率的主要因素是光束漂移、光斑扩展。Fried 给出了湍流中长、短曝光成像原理,这些原理与光束漂移、光斑扩展相关。光束漂移是长曝光结果,光斑扩展是短曝光结果。本文只分析短曝光过程,即研究光斑扩展与耦合效率的关系。Fried 给出的湍流强度与成像系统分辨率之间的关系为:

$$R = \frac{4D^2}{\lambda f} \int_0^1 x [\arccos x - x(1-x^2)^{1/2}] \times \exp\left[-3.44\left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} x^{5/3} \left(1 - \frac{1}{2}x^{1/3}\right)\right] dx, \quad (7)$$

式中: R 为成像系统分辨率, r_0 为大气相干长度。由此可知湍流环境下光学系统所能分辨的最小角度为:

$$\theta_{\min} = \frac{1}{R}. \quad (8)$$

由此可得到光斑半径为:

$$\omega = f\theta_{\min}. \quad (9)$$

将式(9)、(8)、(7)分别带入式(5)中得到湍流环境下的光纤耦合效率。耦合效率与透镜口径、耦合焦距、入射波长、光纤半径、大气相干长度有关。图 3 为在一定已知条件下,上述参数与耦合效率之间的仿真结果。

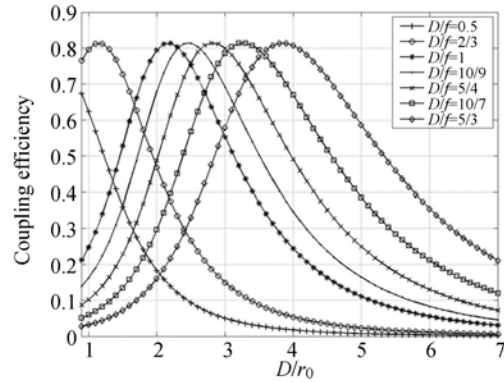


图 3 当接收口径为 20 cm,接收波长为 1 550 nm,耦合光纤半径为 5 μm 时,不同相对孔径下光斑扩展耦合效率与 D/r_0 之间的关系

Fig. 3 Fiber coupling efficiency for spot extension as a function of D/r_0 with different relative apertures, where $D=20$ cm, $\lambda=1\ 550$ nm, $\omega=5\ \mu\text{m}$

根据上述推导及仿真结果得出以下结论:

- (1)湍流引起的光斑扩展对耦合效率影响很大。当湍流强度增加时,光纤耦合效率迅速降低;
- (2)湍流强度增加时通过增加耦合系统的口径对提高耦合效率意义不大,这与 Fried 当初定义大气相干长度的理论一致;

(3)湍流中光纤耦合效率是接收口径、入射光波长、耦合光纤半径、耦合系统焦距、大气相干长度的函数。当上述参数满足一定关系时,耦合效率存在极大值。由图 3 可以看出,不同情况下耦合效率均存在极值。当湍流强度变化时通过改变耦合系统的相对孔径可以提高系统的耦合效率,保证耦合效率存在极大值。例如,当大气相干长

度由 20 cm 变化到 5 cm 时,为使耦合效率最大,系统的相对孔径应该从 2/3 调整到 5/3。

(4)光斑扩展引起焦平面光斑 ω 增大。由表 4 表达式 $\omega/\omega_0=1.709$ 可知,如果增大接收光纤有效半径 ω_0 ,可以提高湍流中的耦合效率。

4 耦合效率提高方法

根据前面的讨论结果,本文采用焦距可变系统和锥状光纤接收两种方法来提高耦合效率。

4.1 采用焦距可变系统提高耦合效率

当 $\omega/\omega_0=1.709$,即 $\omega=1.709\omega_0$ 时可使系统耦合效率达到最大值。而 ω 的变化又与湍流强度相关。将上述关系带入式(7)、(8)、(9)中得到:

$$\frac{f^2 \lambda}{D^2 \omega_0} = 6.836 \int_0^1 x [\arccos x - x(1-x^2)^{1/2}] \times \exp\left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} x^{5/3} \left(1 - \frac{1}{2} x^{1/3}\right)\right] dx. \quad (10)$$

在湍流环境中如果接收口径 D 、焦距 f 、入射波长 λ 、接收光纤模式半径 ω_0 、大气相干长度 r_0 满足式(10),可使耦合效率达到最大值,与式(6)类似。通过实时测量 r_0 ,根据 r_0 按图 3 曲线实时调整耦合系统焦距 f ,从而使耦合效率保持在高值。图 4 为接收口径为 20 cm,接收波长为 1 550 nm,耦合光纤半径为 5 μm 时,耦合系统焦距与大气相干长度之间的关系曲线。

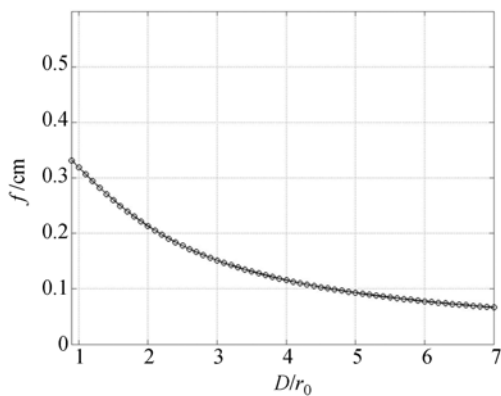


图 4 当接收口径为 20 cm,接收波长为 1 550 nm,耦合光纤半径为 5 μm 时,光斑扩展耦合系统焦距与大气相干长度之间的关系

Fig. 4 Focal length of coupling system for spot extension as a function of D/r_0 , where $D=20$ cm, $\lambda=1\ 550$ nm, $\omega=5\ \mu\text{m}$.

由图 4 可以看出,当大气相干长度变小时,即湍流环境恶化时,通过调整耦合系统的焦距仍可以保持最大的耦合效率。例如,使用口径为 20 cm 的接收系统,当大气相干长度在 20~3 cm 变化时,耦合透镜系统的焦距为 34~7 cm。该方法在一定的湍流变化范围内,能够保证耦合效率始终保持在 81%。

4.2 采用锥状光纤接收提高耦合效率

增大接收光纤芯径,抑制由于湍流引起的光斑扩展效应。耦合原理如图 5 所示,接收光纤为锥形。

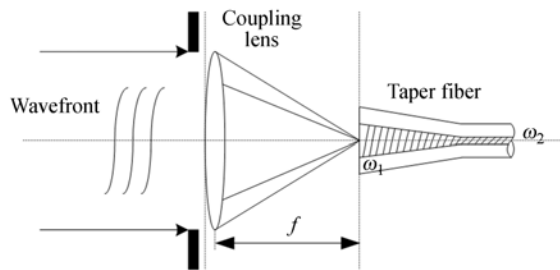


图 5 带有锥状的单模光纤耦合系统

Fig. 5 Geometry of optical system with taper fiber

目前,锥形光纤多用于大功率激光耦合中,由多模光纤构成^[14-15]。此时,光纤的模式可以忽略不计,接收端芯径可以达到 1 000 μm 。但是光纤应用器件中使用的普通单模光纤的芯径一般为 10 μm ,如果采用锥形的话,其锥形端不能太大。图 5 中, ω_1 为锥形光纤大端光纤的模式半径, ω_2 为小端光纤的模式半径,当光耦合进光纤大端并在光纤中传输时,都按高斯模场进行计算,在式(1)中带入光纤两端的高斯模场半径,得到从大端传输到小端时的耦合效率 η_2 为:

$$\eta_2 = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}. \quad (11)$$

则湍流中总的耦合效率为 $\eta = \eta_1 \eta_2$ 。图 6 给出了不同 ω_1/ω_2 时的耦合效率。假设光纤大端面半径为 50 μm ,可以抑制湍流光斑扩展(即湍流引起的光斑经扩展后仍全部落在光纤端面内)。小端半径为 5 μm ,则在光纤端面处的耦合效率可达到 $\eta_1=0.81$,在锥状光纤小端处的耦合效率 $\eta_2=0.2$,则总的耦合效率为 0.162,而在图 2 中不使用锥状光纤时的耦合效率低于 0.1。

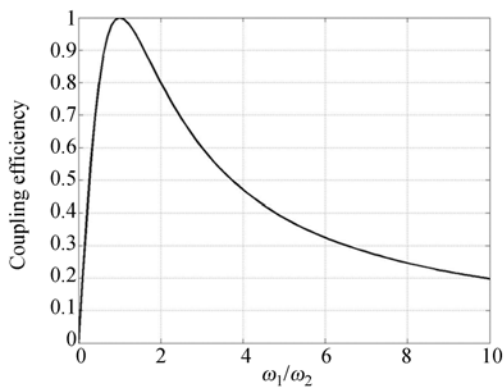


图 6 端面大小不同时的耦合效率

Fig. 6 Coupling efficiency on different sizes of fiber sections

5 实验

5.1 湍流中单模光纤耦合效率测试

搭建实验系统完成了耦合效率实际测试,具体测试条件如下:测试时天气状况好(可认为弱湍流环境);链路距离在 3 km 左右,海拔高度为 230 m(GPS 实测);激光发射功率为 1 W 左右,接收使用 Nikon 系列 70~300 mm 变焦镜头;光功率计 1 s 采样存储数据 3 000 个;单模光纤的芯径为 10 μm。实验结果如表 1 所示。在湍流环境中,由于光强闪烁会造成光纤耦合效率的波动,计算得到的瞬时耦合效率是一个波动的值,因此表中耦合效率以光功率均值记录。

大值,这主要是由于单模光纤芯径太小,对准偏差很大。此外,傍晚时湍流较弱, D/r_0 值接近 1 也是耦合效率不高的一个主要原因。

表 1 耦合效率测试数据

Tab.1 Testing data of coupling efficiency

焦距 /mm	焦平面处光功率 /nW	光纤出射功率 /nW	耦合效率/%
70	220.368	11.46	5.2
150	220.368	21.156	9.6
200	220.368	24.902	11.3
250	220.368	26.003	11.8
300	220.368	22.478	10.2

5.2 湍流中锥形光纤耦合效率测试

由于单模光纤目前没有锥状形式,因此,锥形光纤改善耦合效率实验通过多模形式测试完成,如图 8 所示。

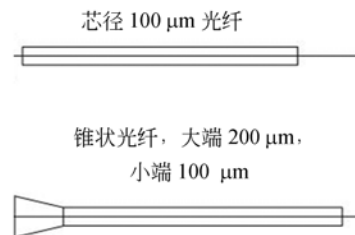


图 8 锥状光纤改善耦合效率

Fig. 8 Taped fibers for coupling efficiency improvement

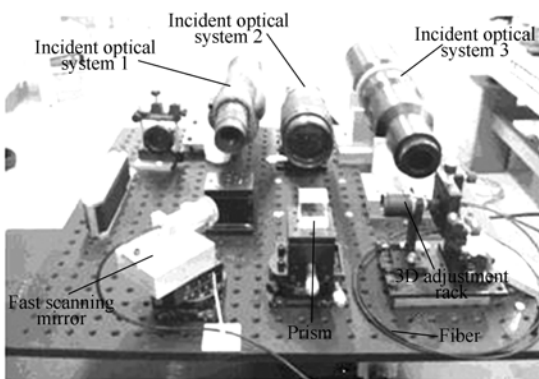


图 7 湍流中单模光纤耦合效率测试实验装置

Fig. 7 Experiment setup for coupling efficient test of single mode fiber in atmospheric turbulence

由表 1 可以看出改变焦距可以提高耦合效率,和理论分析结果一致,但是没有达到理论的最

将图 7 实验装置中的单模光纤分别换为芯径为 100 μm 的多模光纤和锥形光纤(大端为 200 μm,小端为 100 μm),分别完成了测试实验。实验显示:芯径为 100 μm 光纤的耦合效率为 36.3%,而锥状光纤的耦合效率为 59.2%,结果表明锥状光纤可以有效提高耦合效率。

6 结论

空间光到单模光纤的耦合效率是影响通信系统性能的重要影响因素。本文从耦合系统分辨率角度出发,研究了湍流引起光斑扩展与单模光纤的耦合效率之间的关系,提出了耦合效率的提高方法,并完成了相关实验验证。实际上,湍流引起

的光束漂移也会对耦合效率产生影响,分析时只要将式(7)换为 Fried 长曝光公式即可。在空间激光通信或是在一般空间中进行光纤耦合时,伺服跟踪系统用来抑制由湍流低阶倾斜项引起的光束漂移,但是不能抑制由湍流高阶项引起的光斑扩展。为了抑制光斑扩展,需要使用自适应光学系统,这样就增加了系统的复杂性。本文提出的

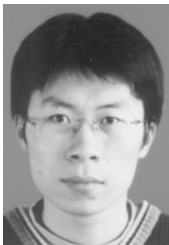
焦距可变系统不仅能够提高耦合效率,而且体积增加不大,不足的是需要已知当时的大气相干长度 r_0 。当湍流较弱时,使用锥形光纤接收,通过增大接收面积可抑制湍流引起的光斑扩展对耦合效率的影响;但当湍流变强时,抑制能力明显降低。本文结果可为空间光到单模光纤耦合效率的计算及其系统设计起到参考与指导作用。

参考文献:

- [1] HIDEKI T, MORIO T. Study on the fiber coupling efficiency for ground-satellite laser communication links[J]. *SPIE*, 2010, 7587:75870U.
- [2] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*, 2013, 6(5):670-680.
WU C J, YAN CH X, GAO ZH L. Overview of space laser communications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):670-680. (in Chinese)
- [3] 付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, 5(2):116-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, *et al.*. Research status development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2):116-125. (in Chinese)
- [4] MA J, ZHAO F, TAN L Y. Degradation of single-mode fiber coupling efficiency due to localized wavefront aberrations in free-space laser communications [J]. *Opt. Eng.*, 2010, 49(4):045004.
- [5] WINZER P J, LEEB W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 986-988.
- [6] TAN L Y, YANG Q B, YU S Y, *et al.*. Statistical distribution of fiber-coupling efficiency in the satellite-to-ground downlink [J]. *Opt. Eng.*, 2011, 50(10):105001.
- [7] YAMAC D, DAVIDSON F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(10):4946-4954.
- [8] 杨惠珍, 蔡冬梅, 陈波, 等. 无波前传感器自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(5):680-684.
- YANG H ZH, CAI D M, CHEN B, *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wavefront sensor and its application in atmospheric laser communications [J]. *Chinese of Journal of Lasers*, 2008, 35(5):680-684. (in Chinese)
- [9] 韩立强, 王祁, Shida Katsunori, 等. 盲优化波前校正提高自由空间光通信光纤耦合效率[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9):1999-2002.
- HAN L Q, WANG Q, SHIDA K, *et al.*. Improving fiber coupling efficiency of free space optical communication using blind optimization wavefront correction [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9):1999-2002. (in Chinese)
- [10] 郝明明, 秦莉, 朱洪波, 等. 基于半导体激光短阵列的 976 nm 高功率光纤耦合模块[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 895-903.
HAO M M, QIN L, ZHU H B. *et al.*. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 895-903. (in Chinese)
- [11] 向劲松, 陈彦, 胡渝. 大气湍流对空间光耦合至单模光纤的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(3): 377-380.
XIANG J S, CHEN Y, HU Y. Influence of atmospheric turbulence on coupling space light into single mode fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3):377-380. (in Chinese)
- [12] 朱洪波, 李艳华, 郝明明, 等. 基于偏振复用技术的新型半导体激光加工光纤耦合模块[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1137-1143.
ZHU H B, LI Y H, HAO M M, *et al.*. Fiber coupled diode laser module for laser processing by polarization multiplexing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1137-1143. (in Chinese)

- [13] 齐晓玲,蔡志岗,徐宇科,等. 光耦合理论及其在通信元器件中的应用[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 521-526.
 QI X L, CAI ZH G, XU Y K, *et al.*. A theoretical study of optical coupling in optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 521-526. (in Chinese)
- [14] 史光辉. 半导体激光耦合新方法[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 343-352.
 SHI G H. Improved method for semiconductor laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 343-352. (in Chinese)
- [15] 陈雪坤,张璐,吴志勇. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 208-215.
 CHEN X K, ZHANG L, WU ZH Y. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 208-215. (in Chinese)

作者简介:



宋鸿飞(1980—),男,吉林白山人,博士研究生,讲师,2002年于东北大学获得学士学位,2007年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事信息获取与处理及智能控制方面的研究。E-mail: yao-gee@163.com

导师简介:



车英(1964—),男,吉林榆树人,博士,教授,博士生导师,1987年,1990年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,2011年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光电检测及智能控制方面的研究。E-mail: cheying@cust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)