

文章编号 1004-924X(2006)03-0386-05

球透镜耦合效率研究

吕昊,刘爱梅

(孝感学院物理系,湖北孝感432000)

摘要:根据能量积分法计算了球透镜用于激光二极管(LD)与单模光纤(SMF)之间耦合的耦合效率,并对其进行研究。结果表明:当采用单球透镜时,所带来的轴向偏差为 $\pm 30\ \mu\text{m}$,横向偏差为 $\pm 1.0\ \mu\text{m}$,沿着X-Y平面的轴向倾角偏差为 $\pm 1.2^\circ$;当采用双球透镜时,角向偏差最大,横向偏差次之,轴向偏差最小。

关键词:球透镜;耦合效率;轴向偏差;横向偏差;角向偏差

中图分类号:TH703 文献标识码:A

Research on coupling efficiencies of ball lenses

LU Hao, LIU Ai-mei

(Department of Physics, Xiaogan University, Xiaogan 432000, China)

Abstract: The coupling efficiencies of the ball lenses used in coupling of the laser diode(LD) and single mode fiber(SMF) were calculated and researched by a energy integration method. Research results indicate that when the single ball lens is used in the LD-ball lens-SMF system, the axial alignment tolerance is $\pm 30\ \mu\text{m}$, the lateral alignment tolerance is $\pm 1.0\ \mu\text{m}$ and the tilting on the X-Y plane pivoting at the fiber tip is $\pm 1.2^\circ$. When the double ball lenses are used in the LD-ball lenses-SMF system, the coupling loss of the tilting tolerance is maximum, the coupling loss of the lateral alignment tolerance is smaller than that of the tilting tolerance and the coupling loss of the axial alignment tolerance is minimum.

Key words: ball lens; coupling efficiency; axial alignment tolerance; lateral alignment tolerance; tilting tolerance

1 引言

球透镜是一个简单的被抛光的玻璃球、石英球、蓝宝石或其他材料制成的球体^[1],对二极管激光器波长有很高的透过率。球透镜可以镀反抗膜,其透过率可以达到 $>99.95\%$ ^[2]。与梯度折射

率透镜^[3-5]相比,它具有结构简单、容易制造、价格低、质量轻以及不需要严格校准等特点^[6-7]。在光通信中,球透镜为常见的光学元件。虽然球透镜会有球差而降低耦合效率,但因为其制作取得容易,封装上也较非球面镜简易方便,所以若需要大量生产,球透镜必然是可以考虑的光学元件^[8-9]。现在美国沉积科学公司实现了球透镜镀膜工艺的

收稿日期:2005-10-22;修订日期:2006-04-18.

基金项目:孝感学院科研基金项目。

突破,该工艺利用低压化学蒸汽沉积法(LPCVD)在球透镜的整个表面形成均匀、坚固的多层增透膜。因此,各国已经开始对球透镜进行生产和研究,但国内尚没有此方面的相关报道。本文根据能量积分法计算了球透镜用于激光二极管(LD)与单模光纤(SMF)之间耦合的耦合效率,并对其进行了研究。

2 理论分析

如图 1 所示,根据能量积分法计算两个球透镜之间的耦合效率。

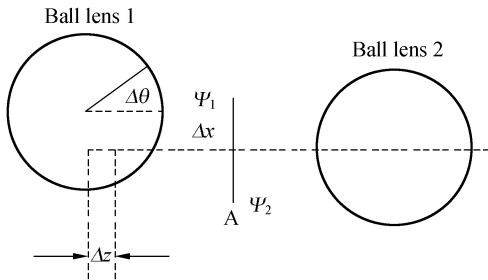


图 1 球透镜耦合效率计算

Fig. 1 Coupling efficiency computation of ball lenses

根据高斯光束近似球透镜的场分布, ψ_1 是左边的球透镜在 A 点处的场分布, ψ_2 是右边的球透镜在 A 点处的场分布, ψ_1 和 ψ_2 的极坐标场分布形式可以表示为:

$$\psi_1(r) = \psi_2(r) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{W_0} e^{-\frac{r^2}{w_0^2}}, \quad (1)$$

其中: W_0 为光斑半径。

(1) 如果存在轴向位移 Δz , 则 ψ_1 在 A 点处的极坐标场分布形式为:

$$\psi_1(r, \Delta z) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{W(\Delta z)} e^{-r^2 \left[\frac{1}{W(\Delta z)^2} + \frac{jk}{2R(\Delta z)} \right]}, \quad (2)$$

其中: $k = 2\pi/\lambda$,

$$W(\Delta z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{2 \times \Delta z}{k W_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$R(\Delta z) = \Delta z \left[1 + \left(\frac{W_0^2 k}{2 \times \Delta z} \right)^2 \right]$$

(2) 如果存在横向位移 Δx , 则 ψ_1 在 A 点处的极坐标场分布形式为:

$$\psi_1(r, \phi) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{W_0} e^{-\left[(r \cos(\phi) + \Delta x)^2 + (r \sin(\phi))^2 \right] \cdot \frac{1}{w_0^2}}, \quad (3)$$

(3) 如果存在轴向倾角 $\Delta\theta$, 则 ψ_1 在 A 点处

的极坐标场分布形式为:

$$\psi_1(r, \phi, \Delta\theta) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{W_0} e^{-\left[\frac{r^2}{w_0^2} + jkr\Delta\theta \cdot \cos(\phi) \right]}, \quad (4)$$

最后, 耦合效率 η 可以由两个球透镜光场分布的积分求得:

$$\eta = \frac{\left| \iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_1 \psi_2^* r dr d\phi \right|^2}{\iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_1 \psi_1^* r dr d\phi \iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_2 \psi_2^* r dr d\phi}, \quad (5)$$

在式(5)中, 如果令 ψ_2 的场分布为理想分布, ψ_1 用公式(2)、(3)、(4)分别代入, 可以求出轴向位移、横向位移和轴向倾角带来的耦合损耗。

如果在直角坐标系中, 式(5)可以表示成为:

$$\eta = \frac{\left| \iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_1 \psi_2^* dx dy \right|^2}{\iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_1 \psi_1^* dx dy \iint_0^{2\pi} \iint_0^\infty \psi_2 \psi_2^* dx dy}, \quad (6)$$

式(6)与文献[10-11]给出的耦合效率公式相同, 可以用来计算单个球透镜用于 LD 与 SMF 之间的耦合效率。但是文献[10-11]采用的一种方法是基于传统的光学分析设计, 并且在平衡球差的基础上通过采用几何和衍射方法来计算耦合效率; 另一种方法是采用 Maxwell 方程来计算耦合效率, 两种方法都是建立在直角坐标系上。

3 球透镜耦合效率分析

球透镜用于 LD 和 SMF 之间耦合时, 由于不对准因素会降低耦合效率, 为此对耦合时出现轴向偏差、横向偏差和角向偏差进行测量。图 2 为球透镜用于 LD 和 SMF 之间的耦合示意图。

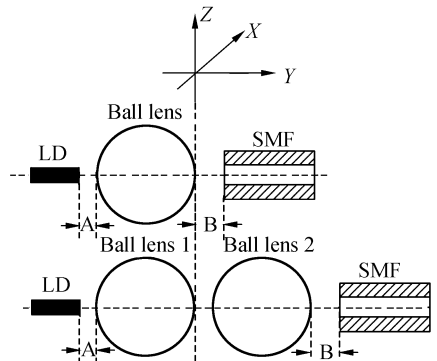


图 2 球透镜用于 LD 与 SMF 间耦合

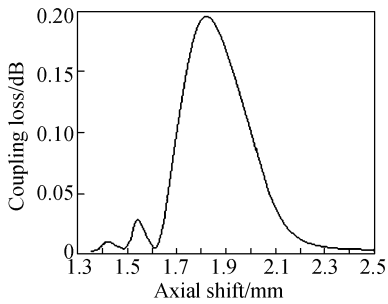
Fig. 2 Coupling of ball lenses between LD and SMF

表 1 给出了基本器件的参数。图 3、图 4 和图 5 为三种偏差带来的耦合损耗图。其中(a)、(b)和(c)为采用单球透镜的耦合损耗,对应的(a')、(b')和(c')为采用双球透镜的耦合损耗。

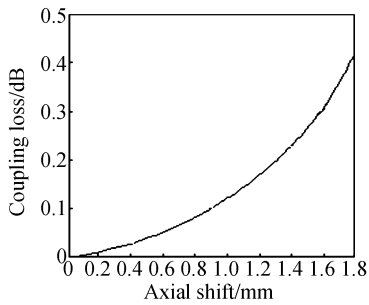
表 1 测量球透镜用的物理常数和参数

Tab. 1 Physical constants and parameters in measuring ball lens

Physical constants	Parameters
Ball lens nominal diameter	1.5 mm
Laser diode to ball lens nominal distance	1.13 mm
Nominal maximum output power	5 mW
Emission center wavelength	1 550 nm
Far field beam divergence half angle a-long X	$\theta_{//} = 30^\circ$
Far field beam divergence half angle a-long Y	$\theta_{\perp} = 30^\circ$
Nominal distance of the SMF from ball lens for maximum coupling	1.86 mm
diameter of SMF	10 μm



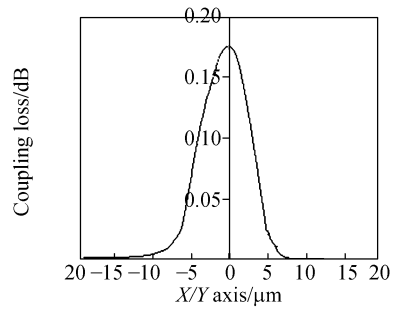
(a)



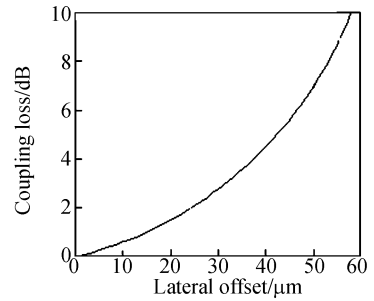
(a')

图 3 沿 Z 轴方向球透镜与 SMF 间距离变化的耦合效率

Fig. 3 Coupling efficiencies of the distance from the output surface of the ball lens to tip of the SMF along the axial Z-axis

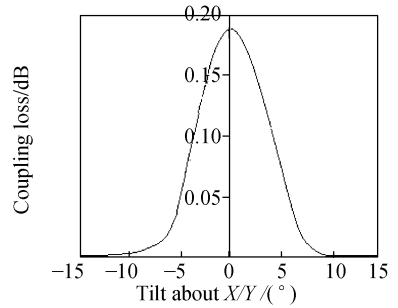


(b)

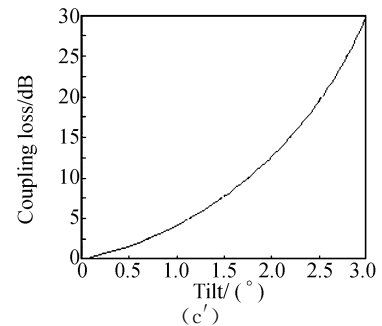


(b')

图 4 沿横向 X-Y 方向的耦合效率
Fig. 4 Coupling efficiency of lateral X- and Y-position about the center of the optical axis



(c)



(c')

图 5 X-Y 平面上角度偏差引起的耦合效率
Fig. 5 Coupling efficiency of tilted angles about the lateral X- and Y-planes

(1)图3(a)为沿着Z轴(光轴)方向,随着球透镜和单模光纤之间距离变化的耦合效率图。从图中可以看出,当单模光纤沿着光轴远离球透镜时,存在多个峰值,并且当通过最大峰值后,耦合效率逐步降低。对于其余的峰值,可能是由于近轴光线的相互干涉和球差引起的。

(2)在最大耦合效率附近,沿着横向X-Y方向的校准偏差要比沿着Z轴小得多。为了获得95%以上的耦合效率,沿着Z轴的偏差是 $\pm 30 \mu\text{m}$ (从峰值为止算起)。如果沿着横向X-Y方向,那么偏差将减小到 $\pm 1.0 \mu\text{m}$,如图4(b)。

(3)在X-Y平面,角度偏差对耦合效率有着相当的影响,当角度大于 1.2° ,耦合效率下降5%,所以角度偏差为 $\pm 1.2^\circ$,如图5(c)。

(4)从图3(a')、图4(b')和图5(c')中可以看出,使用双球透镜用于LD和SMF耦合时,轴向位移偏差带来的损耗最小,横向位移偏差带来的损耗次之。比起光纤直接耦合,轴向位移和横向位移引起的损耗减小了。主要是因为光准直带来的结果。但是轴向倾角带来的损耗非常大,很小的角度偏差就会接受不到光信号。

(5)比较图3(a)和3(a')、图4(b)和4(b')以及图5(c)和5(c'),可以看出,单球透镜耦合损耗要比双球透镜耦合损耗要小得多。但是如果将耦合系统进行精密校准,前者的总耦合效率要比后者略低^[12]。

4 结 论

(1)根据能量积分法计算了球透镜的耦合效率公式,该耦合效率不仅适用于单球透镜耦合系统,也适用于双球透镜耦合系统。

(2)当采用激光二极管-球透镜-单模光纤耦合系统时,球透镜所带来的轴向偏差为 $\pm 30 \mu\text{m}$,横向偏差为 $\pm 1.0 \mu\text{m}$,沿着X-Y平面的轴向倾角偏差为 $\pm 1.2^\circ$ 。

(3)当采用激光二极管-球透镜-球透镜-单模光纤耦合系统时,角向偏差最大,横向偏差次之,轴向偏差最小。

(4)比较两种耦合系统,后者带来的耦合损耗要比前者带来的损耗大得多,但是如果将耦合系统进行精密校准,并且不考虑三种偏差带来的损耗,前者的总耦合效率要比后者略低。

(5)对采用三个以上球透镜用于LD与SMF耦合,测试结果表明系统的耦合效率随着球透镜的个数增加而降低,一方面是因为系统很难进行很好的校准,因此导致球差相应的增加,三种偏差增大,耦合效率降低;另一方面由于光线在球透镜反射的次数增加,从而引起散射损耗的增加,降低耦合效率。因此当采用球透镜用于LD与SMF、SMF-SMF和SMF-LD耦合时,单球透镜或者双球透镜耦合系统最好。

参考文献:

- [1] YANG L, CHANG K. Ball lens modeling for laser/fiber coupling. A direct solution of Maxwell's equations[J]. *IEEE*, 1995, 1(1):242-243.
- [2] RICHARD A, SCHWARZ D A. Ball lens coupled fiber-optic probe for depth-resolved spectroscopy of epithelial tissue[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10):1159-1161.
- [3] 马莹, 王成, 缪同群. VCSEL直接倍频蓝光固态激光器的研究[J], 光学精密工程, 2005, 13(3):253-259.
MA Y, WANG CH, MIAO T Q. Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(3):253-259. (in Chinese)
- [4] 金龙文, 郝寅雷, 王岩, 等. 光通信用自聚焦透镜的制备[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5):483-486.
JIN L W, HAO Y L, WANG Y, et al. Preparation of a self-focusing lens for optical communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5):483-486. (in Chinese)
- [5] 郝寅雷, 金龙文, 赵文兴. 低色差GRIN棒透镜的设计原则[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4):324-328.
HAO Y L, JIN L W, ZHAO W X. Designing principles for a low chromatic aberration GRIN rod lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(4):324-328. (in Chinese)
- [6] JIANG W, SUN Y ZH, ZHAO F, et al. Ball-lens based optical add/drop multiplexers: designs and implementations [J]. *SPIE*, 2002:161-171.

- [7] CHEUNG Y M, YIU C H. Simulation of the alignment sensitivity on the coupling efficiency of ball-lens capped TO-can laser diode source into a single-mode fiber[J]. 4th *International Symposium on EMAP*, 2002:197-203.
- [8] ROGERS D Z. Ball lenses for telecom & datacom application[Z]. DSI, 2002:1-8.
- [9] 赵勇, 李鹏生, 浦昭邦. 半导体激光器与单模光纤耦合效率的分析[J]. 光学技术, 1999, 11(6):7-10. (in Chinese)
ZHAO Y, LI P SH, PU SH B. Analysis on the coupling efficiency between semiconductor laser diode and single mode fiber[J]. *Optical Technology*, 1999, 11(6):7-10. (in Chinese)
- [10] WILSON R G. Ball lens coupling efficiency for laser diode to single mode fiber; Comparison of independent studies by distinct method[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15):3201-3205 .
- [11] RATOWSKY R P, DERI R J, *et al.* Laser diode to single mode fiber ball lens coupling efficiency; full wave calculation and measurement[J]. *Applied Optics*, 1997, 36:3435-3438.
- [12] 柯昌剑, 刘德明. 球透镜准直器耦合效率的研究[J]. 中国激光, 2002, 6(A29):371-374.
KE CH J, LIU D M. Study on the coupling efficiency of spherical-lens collimators[J]. *Chinese Journal of laser*, 2002, 6(A29):371-374. (in Chinese)

作者简介: 吕昊(1976—), 男, 孝感学院物理系讲师。长春理工大学博士研究生, 主要从事光电子器件和集成光学的研究。