

空间激光与单模光纤和光子晶体 光纤的耦合效率

陈雪坤^{1,2}, 张璐^{1,2}, 吴志勇^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了设计最优光纤耦合系统, 利用高斯模场近似单模阶跃光纤的模场和大模面积光子晶体光纤的模场, 推导出了理想情况下空间激光与这两种光纤的耦合效率解析表达式以及光纤端面相对于耦合系统存在横向偏移和端面倾斜时的耦合效率解析表达式。基于上述理论表达式计算了空间激光与光纤的耦合效率, 并通过实验验证了此理论表达式的有效性。理论计算和实验均证实了单模阶跃光纤对于横向偏移更敏感, 当横向偏移量等于单模光纤的纤芯半径时所对应的耦合效率只有 20.25%, 为理论最大值的 1/4; 而大模面积光子晶体光纤对于端面倾斜更加敏感, 当端面倾斜 2° 时对应的耦合效率只有 40.5%, 为理论最大值的 1/2。所提出理论表达式和实验方法完全可以为设计光纤耦合系统提供准确的参数。

关键词: 单模光纤; 光子晶体光纤; 空间激光; 光纤耦合; 耦合效率; 横向偏移; 端面倾斜

中图分类号: TN25; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130602.0208

Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber

CHEN Xue-kun^{1,2}, ZHANG Lu^{1,2}, WU Zhi-yong^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
** Corresponding author, E-mail: ziluit@163.com*

Abstract: It is necessary to confirm the system parameters by theoretical analysis and experiments for designing a optimum fiber-coupling system. By approximating the mode fields of a Single Mode Fiber(SMF) with a step index and a Photonic Crystal Fiber(PCF) with a Large Mode Area(LMA) using the Gaussian mode field, two analytical expressions for fiber-coupling efficiency in an ideal case and in the presences of lateral offset and fiber-end tilt are derived. Based on the two theoretical expressions, the efficiency for free-space laser coupling into the fibers is computed. Moreover, the validity of the two expressions are verified by experiments. As a result, the theoretical computation and experiments demonstrate that the SMF with the step index is more sensi-

收稿日期: 2012-12-17; 修订日期: 2013-01-23

基金项目: 中科院长春光机所内创新资助项目(No. Y10532B110)

tive to the lateral offset compared to the PCF. When the offset is equal to the radius of the fiber core, the efficiency is only 20.25%, which is a quarter of the theoretical maximum efficiency. Besides, the PCF with the LMA is more sensitive to the fiber-end tilt. When the tilt angle is 2° , the efficiency is only 40.5%, which is a half of the theoretical maximum efficiency. In conclusion, the proposed theoretical expressions and experiments can provide accurate parameters for designing fiber-coupling systems.

Key words: single mode fiber; photonic crystal fiber; free-space laser; optical fiber coupling; coupling efficiency; lateral offset; end tilt

1 引言

空间光与光纤的耦合技术是激光雷达系统、自由空间光通信系统和恒星干涉仪系统中的关键和难点技术。在这些系统中高效率的空间光耦合是实现高性能系统的前提。空间光与光纤的耦合效率通常受耦合模场不匹配、横向偏移、端面倾斜和系统随机角抖动^[1-4]等因素的影响。对于星际自由空间光通信,激光经过几千公里的传输后其光斑有 km 量级的直径,而接收光学系统的口径不过 cm 量级(一般不超过 20 cm),因此接收的光波完全可近似为平面波。这种情况下研究的耦合问题就是研究模场不匹配、对不准和随机角抖动等因素对耦合效率的影响。

对于自由空间光通信系统,马晶^[5]和 Toyoshima^[6]等人都通过推导得到了在随机角抖动情况下的耦合效率解析表达式,由此研究了系统的随机角抖动对空间激光与单模光纤(SMF)的耦合效率的影响。而在恒星干涉仪系统中,由于光子晶体光纤(PCF)的无截止单模特性^[7-9],使 PCF 在恒星干涉仪中得到了广泛的应用,并且使用 PCF 代替传统的单模阶跃光纤(SMF-SIF)成为了一种趋势^[10-15]。Corbett 等人^[11-13]利用数值结合实验的方法研究了恒星干涉仪系统中星光与大模面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的耦合效率。而 Nahar 等人^[16]利用光束传输仿真结合实验的方法研究了空间激光与 PCF 的耦合效率。但由于 PCF 模场的复杂性,要得到空间激光与 PCF 耦合效率的解析表达式很困难。

基于已经提出的 PCF 模场的高斯近似理论^[17],本文推导了理想情况下空间激光与这两种光纤的耦合效率表达式和光纤端面相对于耦合系

统存在横向偏移和端面倾斜时的耦合效率表达式。基于此理论表达式研究了空间激光与光纤的耦合效率,并通过实验验证了此理论表达式的有效性。

2 耦合效率模型

2.1 理想情况下的耦合效率

通常自由空间光波到光纤的耦合模型如图 1 所示。自由空间传播的光波由一组耦合透镜聚焦到光纤端面上,耦合透镜组由一个等效焦距为 f ,

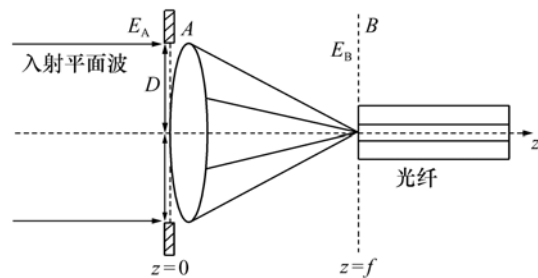


图1 耦合几何模型

Fig. 1 Model for coupling geometry

直径为 D 的薄透镜表示。将口径平面 A 处的入射光场表示为 $E_A(r)$,在耦合平面 B 处对应的聚焦光场表示为 $E_B(r)$ 。假设入射在耦合透镜处的光波为平面波,则经过聚焦后,在耦合平面 B 上的光场^[18]为:

$$E_B(r) = \frac{\pi D^2}{4\lambda f} \left[\frac{2J_1(3.83r/\omega_1)}{3.83r/\omega_1} \right]. \quad (1)$$

式中: λ 是光波波长, $J_1(\cdot)$ 是零阶第一类贝塞尔函数, $\omega_1 = 1.22\lambda f/D = 1.22\lambda F$ 是爱里斑半径, F 是光圈数。

SMF-SIF 和 PCF 的模场都可以用高斯光场进行近似^[17],其中高斯光场对 SMF 的光场有很高

的逼近精度。而对于 PCF, 高斯光场近似也有很高的近似精度^[17]。光纤近似模场为:

$$M(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right). \quad (2)$$

对于此模场表达式有:

$$\int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} |M(r)|^2 r dr d\theta = 1. \quad (3)$$

在耦合平面 B 处, 聚焦光场 $E_B(r)$ 到光纤的耦合效率由 $E_B(r)$ 和光纤模场 $M(r)$ 的重叠积分给出, 即为:

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} E_B(r) M(r) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} |E_B(r)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} |M(r)|^2 r dr d\theta}. \quad (4)$$

将 $E_B(r)$ 和 $M(r)$ 的表达式代入上式, 可得理想情况下的耦合效率表达式为:

$$\eta = \left| \int_0^{+\infty} \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0} J_1\left(\frac{3.83r}{\omega_1}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) dr \right|^2. \quad (5)$$

理想情况下的光纤耦合效率忽略了光纤端面引起的菲涅耳反射损耗, 该损耗可通过光纤端面镀膜来减小。

2.2 存在横向偏移和端面倾斜时的耦合效率

将光纤模场由极坐标变换为直角坐标可得 $x = r \cdot \cos\theta$, $y = r \cdot \sin\theta$ 。当光纤相对于耦合透镜光轴存在 x 方向和 y 方向上的横向偏移 Δx 和 Δy 时, 在耦合平面 B 上的光纤模场变为:

$$M(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \times \exp\left[-\frac{(r \cdot \cos\theta - \Delta x)^2 + (r \cdot \sin\theta - \Delta y)^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (6)$$

当光纤端面相对耦合系统存在端面倾斜时的耦合几何模型如图 2 所示。

设光纤与 $x-z$ 和 $y-z$ 平面之间的角度分别为 $\Delta\varphi_x$ 和 $\Delta\varphi_y$ 。对于倾斜 $\Delta\varphi_x$ 的情况, 沿 y 方向的空间周期为 $L_y = \lambda / \sin(\Delta\varphi_x)$, 因此沿 y 方向的相位变化为 $2\pi \frac{y}{L_y} = 2\pi \frac{y}{\lambda} \sin(\Delta\varphi_x)$ 。当 $\Delta\varphi_x$ 很

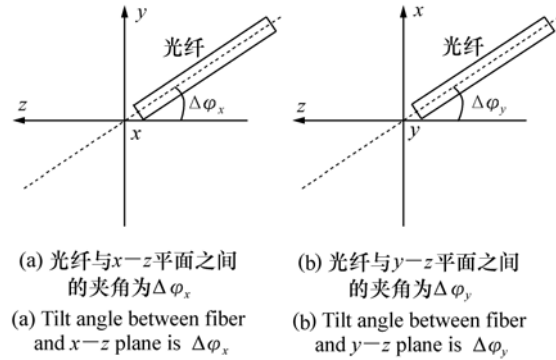


图2 存在端面倾斜时的耦合几何模型

Fig.2 Model for coupling geometry in the presence of fiber-end tilt

小时有 $\sin(\Delta\varphi_x) \approx \Delta\varphi_x$ 。对于倾斜 $\Delta\varphi_y$ 的情况, 沿 x 方向的空间周期为 $L_x = \lambda / \sin(\Delta\varphi_y)$, 因此沿 x 方向的相位变化为 $2\pi \frac{x}{L_x} = 2\pi \frac{x}{\lambda} \sin(\Delta\varphi_y)$ 。当 $\Delta\varphi_y$ 很小时有 $\sin(\Delta\varphi_y) \approx \Delta\varphi_y$ 。因此, 由光纤端面倾斜所引起的相位因子为:

$$\exp\left\{j2\pi\left[\frac{x}{\lambda}\sin(\Delta\varphi_y) + \frac{y}{\lambda}\sin(\Delta\varphi_x)\right]\right\}. \quad (7)$$

因此, 同时存在横向偏移和倾斜时的光纤模场在耦合平面 B 上的分布为:

$$M(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_0^2}} \times \exp\left[-\frac{(r \cdot \cos\theta - \Delta x)^2 + (r \cdot \sin\theta - \Delta y)^2}{\omega_0^2}\right] \times \exp\left\{j2\pi\left[\frac{r \cdot \cos\theta}{\lambda}\sin(\Delta\varphi_y) + \frac{r \cdot \sin\theta}{\lambda}\sin(\Delta\varphi_x)\right]\right\}. \quad (8)$$

将模场表达式 $M(r)$ 和聚焦光场表达式 $E_B(r)$ 代入耦合效率公式, 可得:

$$\eta = \left| \int_0^{2\pi+\infty} \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{2}}{\pi\omega_0} J_1\left(\frac{3.83r}{\omega_1}\right) \times \exp\left[-\frac{(r \cdot \cos\theta - \Delta x)^2 + (r \cdot \sin\theta - \Delta y)^2}{\omega_0^2}\right] \times \exp[jk(r \cdot \cos\theta \cdot \Delta y + r \cdot \sin\theta \cdot \Delta x)] dr d\theta \right|^2, \quad (9)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。当 $\Delta x = \Delta y = 0$ 且 $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi_y = 0$ 时, 可得到理想情况下的耦合效率式 (5)。

3 数值结果

SMF-SIF 的典型模场半径为 $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$, 而 LMA-PCF LMA-35 的模场半径为 $\omega_0 = 13 \mu\text{m}$ 。当入射光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 由式(5)可得 SMF-SIF 和 PCF LMA-35 在理想情况下的耦合效率与爱里斑半径之间的关系曲线, 如图 3 所示。

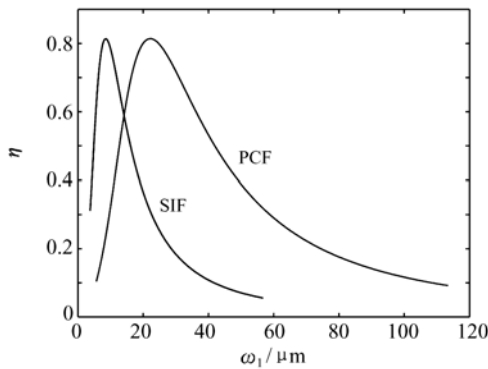


图 3 理想情况下耦合效率与爱里斑半径 ω_1 之间的关系

Fig. 3 Coupling efficiency as a function of Airy spot radius ω_1 in an ideal case

从图 3 可知, 在理想情况下, 空间激光到 SMF-SIF 和到 LMA-PCF 的理论最大耦合效率都为 81.5%。SIF 和 PCF 都对应一个最优爱里斑半径, 该最优爱里斑耦合到 SIF 或 PCF 时可实现最大耦合效率, 这是因为产生最优爱里斑的耦合透镜系统的数值孔径与光纤的数值孔径相比配。但 SIF 和 PCF 实现最优耦合时所对应的爱里斑半径却不同。这也意味着 SIF 实现最优耦合和 PCF 实现最优耦合需要不同数值孔径的耦合系统。对应图 3 的 SIF 和 PCF 的最优耦合系统如图 4 所示。

从图 4 中可知, PCF 对应的耦合透镜的数值孔径要比 SIF 的耦合透镜的数值孔径小得多, 这是因为 LMA-PCF 的数值孔径 ($NA = 0.046$) 比 SIF 的数值孔径 ($NA = 0.12$) 小得多。因此, 其对应的最优耦合透镜的焦距就比 SIF 的最优耦合透镜的焦距长得多。

当光纤端面相对耦合透镜系统仅存在横向偏移 Δx 或 Δy 时, $\Delta\phi_x = \Delta\phi_y = 0$, 而仅存在端面倾斜 $\Delta\phi_x$ 或 $\Delta\phi_y$ 时, $\Delta x = \Delta y = 0$ 。由式(9)可得归一化

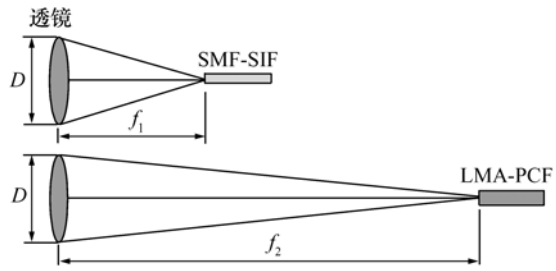
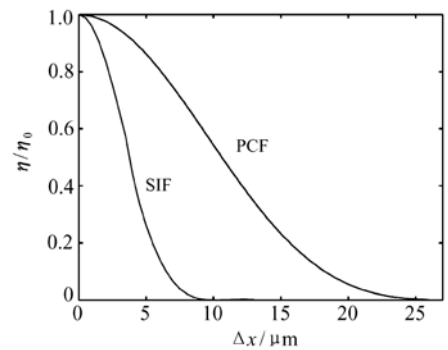


图 4 SIF 和 PCF 对应的最优耦合系统示意图

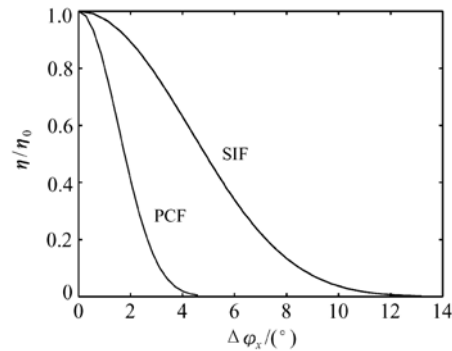
Fig. 4 Schematic illustrations of optimum coupling systems for SIF and PCF

耦合效率与横向偏移量和端面倾斜量之间的关系曲线如图 5 所示。



(a) 与横向偏移 Δx 之间的关系

(a) As a function of lateral offset Δx



(b) 与端面倾斜角 $\Delta\phi_x$ 之间的关系

(b) As a function of end tilt angle $\Delta\phi_x$

图 5 最优光纤耦合效率

Fig. 5 Optimum fiber coupling efficiencies

从图 5(a) 中可以看出, 实现相同的耦合效率时, PCF 比 SIF 可容许存在的横向偏移更大, 这是由于 LMA-35 的模场面积比阶跃 SMF 的模场面积大得多。因此, 精确的横向对准对于 SMF-SIF 是很重要的。从图 5(b) 中可以看出, 对于实现相同

的耦合效率, SIF 比 PCF 可以允许更大的端面倾斜, 这是由于 SIF 的数值孔径比 PCF 的数值孔径大得多, 所以 SIF 对端面倾斜不敏感。对于 PCF, 保持端面与耦合平面的平行是最重要的。因此, 从图 5 可以得出结论: SMF-SIF 对于横向偏移更敏感, 当横向偏移量等于 SMF 的纤芯半径时所对应的耦合效率只有 20.25%, 为理论最大值的 1/4; 而 LMA-PCF 对于端面倾斜更加敏感, 当端面倾斜 2° 时对应的耦合效率只有 40.5%, 为理论最大值的 1/2。

对于 PCF, 当耦合系统 F 数变化时, 归一化耦合效率与横向偏移和端面倾斜之间的关系如图 6 所示。

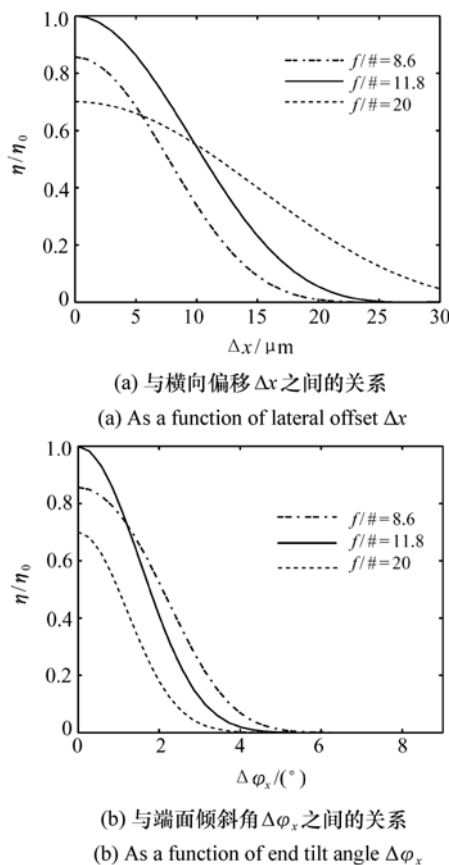


图 6 不同 F 数的耦合系统的归一化光纤耦合效率

Fig. 6 Normalized fiber coupling efficiencies for different F numbers

图 6(a) 中 $f/\# = 11.8$ 对应最优耦合系统的 F 数。从图可知, 当横向偏移 $> 10 \mu\text{m}$ 时, $f/\# = 20$ 的次最优耦合系统可以实现更高的耦合效率。因此, 可以得出结论: 当存在大的横向偏移时, 大 F

数(大于最优耦合系统的 F 数)的次最优耦合系统可以实现更高的耦合效率。这是由于大 F 数的耦合系统产生的爱里斑更大, 当存在很大的横向偏移时仍然有光斑可以耦合进光纤, 而小 F 数的耦合系统产生的爱里斑小, 当横向偏移很大时, 整个爱里斑都可能移出了光纤纤芯的区域, 所以耦合效率更低。

图 6(b) 中仍然是 $f/\# = 11.8$ 对应最优耦合系统的 F 数。从图可知, 当端面倾斜 $> 1.8^\circ$ 时, $f/\# = 8.6$ 的次最优耦合系统可以实现更高的耦合效率。因此当端面倾斜相对大时, 小 F 数(小于最优耦合系统的 F 数)的次最优耦合系统可以实现更高的耦合效率。这是由于小 F 数的耦合系统的数值孔径更大, 当存在较大端面倾斜时, 耦合系统的数值孔径对应的立体角范围与 LMA-PCF 光纤的数值孔径对应的立体角范围仍然有较大重合, 而大 F 数的耦合系统的数值孔径更小, 端面倾斜使耦合系统的数值孔径对应的立体角范围与 LMA-PCF 的数值孔径对应的立体角范围的重合很小, 所以耦合效率低。

4 实验

空间激光与 SIF-SMF 和 LMA-PCF 的耦合效

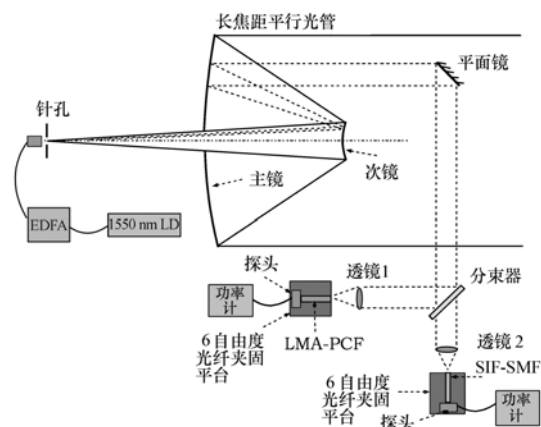


图 7 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率测量原理图

Fig. 7 Schematic diagram of coupling efficiency measurement for free-space laser coupling into SIF and PCF

率测量原理如图7所示。1 550 nm 激光器发出的激光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后由准直透镜组准直后照射在针孔上产生点光源。点光源经过平行光管后变为平面波,由平面镜反射到分束器上,分束器将50%的能量反射后由透镜组1聚焦在LMA-PCF上,由功率计测量耦合前和耦合后的功率。分束器将50%的能量透射后由透镜组2聚焦在SIF-SMF上,同样由功率计测量耦合

前和耦合后的功率。测量理想情况下的耦合效率时6自由度光纤夹固平台处于归零状态。当测量横向偏移和端面倾斜时由6自由度光纤夹固平台调节相应偏移量和倾斜量来实现。而通过更换耦合透镜组1和2可以实现不同耦合系统 F 数下耦合效率的测量。整个光路的调整使用了红外相机对光斑进行了成像。实验中所用器件的参数如表1所示。

表1 实验所用器件的参数

Tab. 1 Parameters used in the experiment

序号	器件名称	主要参数
1	1 550 nm 激光器	输出波长 1 550 nm, 输出功率 4 mW
2	EDFA	最大输出功率 2 W, 输出尾纤直径 9 μm
3	长焦距平行光管	焦距(4 000 \pm 1) mm, 口径 Φ 300 mm
4	平面反射镜	口径 Φ 100 mm, 面型误差 rms < $\lambda/50$
5	分光镜	口径 Φ 40 mm
6	耦合透镜组	$f/\#$ 8.6, 11.8, 20, 面型误差 rms < $\lambda/30$
7	SMF	模场半径 5.35 μm
8	光功率计	探测功率 -90 ~ 10 dBm, 不确定度 \pm 4% 测量分辨率 10 pW, 波长响应 400 ~ 1 700 nm
9	6 自由度平台	平移调整精度 0.2 μm , 旋转调整精度 8", 平移调整量 10 mm, 旋转调整量 10°
10	PCF	模场半径 13 μm

图8给出了理想情况下SMF和PCF的耦合效率的测量值和理论值的比较。

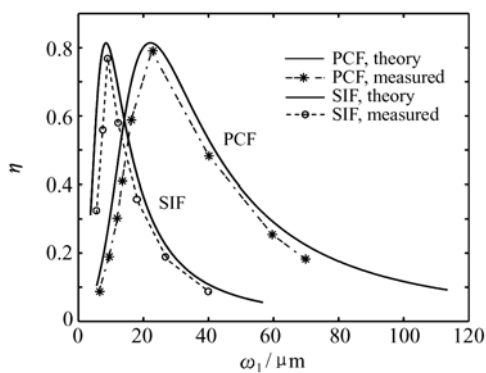
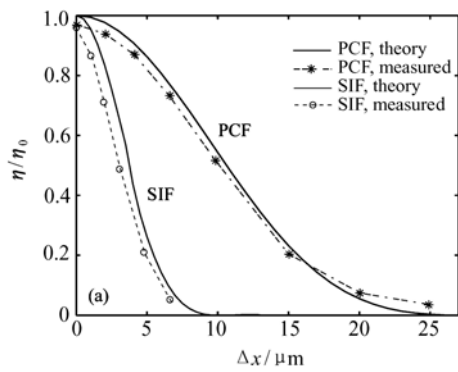


图8 理想情况下理论耦合效率和测量耦合效率与爱里斑半径 ω_1 之间的关系

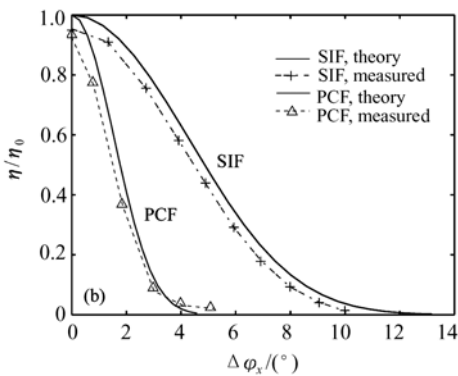
Fig. 8 Theoretical and measured coupling efficiencies as a function of Airy spot radius ω_1 in an ideal case

从图8可知,由于实验中所用的SIF-SMF和PCF的端面都没有镀膜,所以实际测量的耦合效率比理论耦合效率要小,实际测量的最大耦合效率只有78%。

图9给出了存在横向偏移和端面倾斜的情况下SMF和PCF的耦合效率的测量值和理论值的比较。从图9可知,SIF-SMF的测量耦合效率由于菲涅耳反射损耗的原因要小于理论计算值,但测量耦合效率曲线的趋势与理论曲线是一致的。对于LMA-PCF,测量耦合效率与理论曲线更接近,但也小于理论计算值。当存在大横向偏移和大角度倾斜时测量耦合效率比理论曲线要大,这是因为理论耦合效率计算使用了高斯模场来近似真实的PCF模场,而实际的LMA-35PCF由于是多孔结构,所以用高斯模场近似产生一定的误差。实际上即使爱理光斑偏移出了PCF的纤芯区域,但仍能照射在孔洞区域,从而仍有光耦合到PCF



(a) 与横向偏移 Δx 之间的关系
(a) As a function of lateral offset Δx



(b) 与端面倾斜角 $\Delta\phi_x$ 之间的关系
(b) As a function of end tilt angle $\Delta\phi_x$

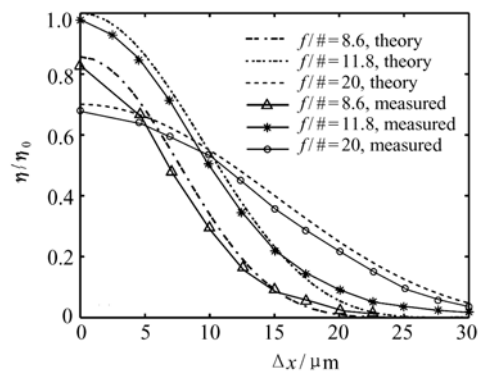
图9 理论的和测量的最优光纤耦合效率

Fig. 9 Theoretical and measured optimum fiber coupling efficiencies

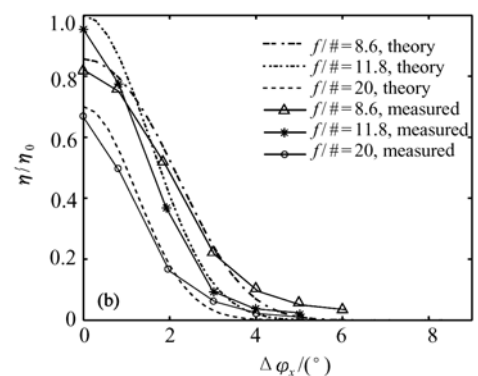
中,所以测量的耦合效率比理论计算值要大。

由以上实验结果和理论结果的对比可知,理论耦合效率表达式对 SMF 更适用。因此这里只针对不同的耦合系统,给出空间激光到 PCF 的理论耦合效率和测量耦合效率与横向偏移和端面倾斜之间的关系,如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,测量耦合效率的变化趋势与理论计算曲线的变化趋势一致,只是在大横向偏移和大端面倾斜时理论耦合效率偏小。通过实验测量结果和理论结果比较可知:虽然用理论耦合效率表达式计算 LMA-PCF 的耦合效率存在一定的误差,但是这些误差都在 5% 左右,而且都发生在大横向偏移和大端面倾斜的情况,因此用理论表达式分析 PCF 的耦合效率仍然是可行的。



(a) 与横向偏移 Δx 之间的关系
(a) As a function of lateral offset Δx



(b) 与端面倾斜角 $\Delta\phi_x$ 之间的关系
(b) As a function of end tilt angle $\Delta\phi_x$

图10 理论上和测量的不同 F 数耦合系统的归一化光纤耦合效率

Fig. 10 Theoretical and measured fiber coupling efficiencies for different F numbers

5 结论

本文利用高斯模场来近似 SIF-SMF 的模场和 LMA-PCF 的模场,从而推导出了理想情况下空间激光与这两种光纤的耦合效率表达式,并得到了光纤端面相对于耦合系统存在横向偏移和端面倾斜时的耦合效率表达式。数值结果和实验结果都表明:所得到的理论表达式准确地描述了耦合效率,并且证明了 SMF 对于横向偏移较为敏感,当横向偏移量等于 SMF 的纤芯半径时所对应的耦合效率只有 20.25%,为理论最大值的 1/4;而 PCF 对于端面倾斜比较敏感,当端面倾斜 2° 时对

应的耦合效率只有 40.5%,为理论最大值的 1/2。通过实验可知:对于 LMA-PCF,在大横向偏移和大端面倾斜时耦合效率理论表达式具有局限性。同时可以看出要实现理论最优耦合必须考虑菲涅

耳反射损耗的影响。因此,本文所得到的耦合效率的解析表达式和耦合效率测量方法完全可以为耦合光学系统的设计提供指导

参考文献:

- [1] POLISHUK A, ARNON S. Optimization of a laser satellite communication system with an optical preamplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, 21: 1307-1315.
- [2] TOYOSHIMA M, JONO T, NAKAGAWA K, *et al.*. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, 19: 567-571.
- [3] CHEN C C, GARDNER C S. Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and incoherent optical intersatellite communication links[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, 37: 252-260.
- [4] ARNON S, ROTMAN S R, KOPEIKA N S. Performance limitations of a free-space optical communication satellite network owing to vibrations: heterodyne detection[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37: 6366-6374.
- [5] MA J, ZHAO F, TAN L Y, *et al.*. Plane wave coupling into single-mode fiber in the presence of random angular jitter[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(27): 5184-5189.
- [6] TOYOSHIMA M. Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(9): 2246-2250.
- [7] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P St J, *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [8] LU S, LI W, GUO H, *et al.*. Analysis of birefringent and dispersive properties of photonic crystal fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(30): 5798-5802.
- [9] XI X M. Mode-field expansion in photonic crystal fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(25): E50-E54.
- [10] RUILIER C, CASSAING F. Coupling of large telescope and single-mode waveguides: application to stellar interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, 18(1): 143-149.
- [11] CORBETT J C W, ALLINGTON-SMITH J R. Coupling starlight into single-mode photonic crystal fiber using a field lens[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(17): 6527-6540.
- [12] CORBETT J, DABIRIAN A, BUTTERLEY T, *et al.*. The coupling performance of photonic crystal fibres in fibre stellar interferometry[J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2006, 368: 203-210.
- [13] CORBETT J C W, MORRIS T J, ALLINGTON-SMITH J R. Tip-tilt requirements for coupling starlight into single-mode photonic crystal fibres using a lenslet: a first analysis[J]. *New Astron. Rev.*, 2006, 49(12): 675-680.
- [14] POPPETT C, ALLINGTON-SMITH J. Coupling efficiency and termination of photonic crystal fibres for astronomy[J]. *SPIE*, 2008, 7018: 7018Y1.
- [15] VERGNOLE S, DELAGE L, REYNAUD F, *et al.* Using photonic crystal fibre in the frame of stellar interferometer[J]. *SPIE*, 2004, 5491: 1416-1424.
- [16] NAHAR N K, ROJAS R G. Coupling loss from free space to large mode area photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(22): 3669-3676.
- [17] HIROOKA T, HORI Y, NAKAZAWA M. Gaussian and Sech approximations of mode field profiles in photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16(4): 1071-1073.
- [18] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics*[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.