

# 基于渐变折射率透镜的低损耗 $1 \times N$ 微结构 光纤耦合方法

代 文<sup>1</sup> 杨远洪<sup>1,2</sup> 宋奎岩<sup>2</sup> 杨明伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

<sup>2</sup>北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

**摘要** 提出了一种新型的、基于单个径向渐变折射率(GRIN)透镜的  $1 \times N$  光纤耦合方法,并基于水平入射以及垂直斜面入射光线的传播方程建立了用于求解点光源发出的光束在 GRIN 透镜斜面入射后的成像点的计算方法。通过将透镜前端面加工成多斜面棱镜,将输入光分为多束,光束聚焦位置可以通过系统参数来调整;被分割开的光束经会聚、优化像差后,实现  $1 \times N$  低损耗耦合,并进行了仿真研究;通过优化斜面倾角、物距等关键参数实现了光纤低损耗耦合。该设计方案结构简单,易于装配,为各类光子晶体光纤、多芯光纤、光纤组束和光纤合光提供了实用的耦合方法。

**关键词** 光纤光学;光纤耦合;径向渐变折射率透镜;多芯光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0406004

## Low-Loss $1 \times N$ Microstructured Fiber Coupling Method with a Single Gradient Index Lens

Dai Wen<sup>1</sup> Yang Yuanhong<sup>1,2</sup> Song Kuiyan<sup>2</sup> Yang Mingwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education,  
Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup>National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** A novel method with a single gradient index (GRIN) lens for  $1 \times N$  fiber coupling is proposed. A calculation and design method is founded to calculate beam focus position when a point source is illuminating an angular surface of a GRIN lens. In coupling module, the GRIN lens has one polyhedral end which is taken as the input port to split input light into several beams, and split beams get focused through GRIN lens. Beam focus position can be adjusted by some system parameters. These beams get focused through the GRIN lens, and couple into output fibers and fiber cores separately, meanwhile aberration is corrected. The simulation results show that the coupling models in different applying situations have high coupling efficiency by optimizing some key parameters, e.g. tilt angle of surfaces and object distance. It can be proved that the coupling method is simple in structure and easy to assemble. It provides a practical coupling method for variety of photonic crystal fibers, multi-core fibers, fiber bundle and fiber combining.

**Key words** fiber optics; fiber coupling; gradient index lens; multi-core fiber

**OCIS codes** 060.1810; 110.2760; 060.4005

## 1 引 言

微结构光纤泛指一类具有特殊包层和纤芯结构

的光纤,如光子晶体光纤(PCF)和多芯光纤(MCF)等。与传统光纤相比,微结构光纤具有独特的特性,

**收稿日期**: 2013-10-11; **收到修改稿日期**: 2013-12-03

**基金项目**: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040815)、创新团队发展计划(IRT1203)

**作者简介**: 代 文(1988—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤耦合技术方面的研究。

E-mail: mailfordwen@aliyun.com

**导师简介**: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号:S040420656S)

在光通信、传感以及大功率光纤激光器等领域具有广泛用途<sup>[1-7]</sup>。但微结构光纤的结构复杂性使其在诸如能量耦合、多纤芯激励及激光合束等耦合技术领域受到很大限制。目前,光子晶体光纤耦合器的制作方法主要有抛磨法和熔锥法,但这些方法容易破坏光纤的二维光子晶体包层结构,从而引入大量损耗。对全固态 PCF 耦合器的制作研究表明,这两种方法的附加损耗均大于 3 dB<sup>[8]</sup> 和 10 dB<sup>[9-10]</sup>;而对空芯 PCF,还没有有效的办法。MCF 在光纤包层中有多根相互平行的纤芯排布,难与常规单芯光纤(SCF)耦合。目前报道的方法主要有熔接拉锥法<sup>[11]</sup> 和寻芯对接法<sup>[12]</sup> 等,前者通过将 SCF 与 MCF 熔接并拉锥实现耦合;后者根据 SCF 的纤芯与 MCF 的对接损耗情况找到纤芯位置以修正熔接参数。基于多透镜也可实现多芯耦合,通过多个准直镜将光束耦合进不同的纤芯,该方法插入损耗可达到 0.6 dB<sup>[13]</sup>,但透镜系统对器件加工和对轴精度要求极高,体积大、工艺复杂。

本文提出一种基于单个径向渐变折射率(GRIN)透镜的  $1 \times N$  光纤耦合方法,可实现低损耗光分多束耦合,并建立了相关的计算和设计方法。该方法结构紧凑,容易加工和装配,避免了对光纤的直接加工,为各类光子晶体光纤、多芯光纤、光纤组束和光纤合光提供了实用的耦合方法。

## 2 耦合模型及工作原理

基于 GRIN 透镜的微结构光纤  $1 \times N$  耦合的基本原理是通过将 GRIN 透镜的输入端加工形成屋脊或多棱锥面型以实现分光,斜面数量和角度根据待耦合光纤/纤芯的数量、相对位置以及 GRIN 透

镜参数确定。

设所用 GRIN 透镜的折射率分布为抛物线型<sup>[14]</sup>:

$$n(r) = n_1 [1 - (r/a)^2 \Delta_n], \quad (1)$$

式中  $n_1$  为透镜的轴线折射率,  $a$  为透镜的半径,  $\Delta_n$  为透镜的相对折射率差。在傍轴近似下,可得到 GRIN 透镜内光线的传输矩阵为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}z) & \sin(\sqrt{A}z)/\sqrt{A} \\ -\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}z) & \cos(\sqrt{A}z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $A = 2\Delta_n/a^2$  为 GRIN 透镜的聚焦常数,因此光线在 GRIN 透镜内的传播轨迹方程可表示为

$$r(z) = r_0 \cos(\sqrt{A}z) + \frac{1}{\sqrt{A}} r'_0 \sin(\sqrt{A}z), \quad (3)$$

式中  $r_0$  是光线的径向初始位置,  $r'_0 = \tan \theta$  为光线的初始斜率。 $r(z)$  为周期函数,其节距为  $2\pi/\sqrt{A}$ ,当  $\sin(\sqrt{A}z) = 0$  时,具有相同初始位置的光束将周期性地聚焦到一点,其径向位置为  $r_0$  或  $-r_0$ 。

为分析输入光在输入端为斜面的 GRIN 透镜内的传播行为,建立了如图 1 所示的计算模型。根据理想成像原理,发光点发出的光束在经过透镜系统后都会在同一点会聚,因此理想情况下轴上点光源  $P$  发出的光束也会在像平面  $F$  上径向位置为  $r_0$  的点  $P'$  聚焦,且  $P$  和  $P'$  的轴向距离略大于 GRIN 透镜的半节距,其中,  $P$  到 GRIN 镜的距离,即物距,  $d_1$  为毫米量级、 $d_2$  为微米量级。为便于计算,近似认为光束在  $d_2$  区间内的传输轨迹与在 GRIN 镜中的轨迹相同,设斜面倾斜角为  $\varphi$ 、物距为  $d_1$ ,根据 GRIN 透镜的成像公式可以计算出  $r_0$  值。

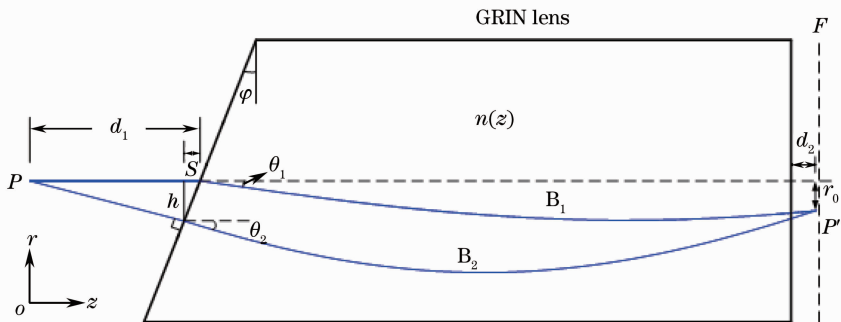


图 1 光束聚焦位置计算模型

Fig. 1 Calculation model for beam focus position

为了简化点光源发出的光束在 GRIN 透镜斜面入射后的成像点的求解过程,选取水平入射以及垂直斜面入射的光线  $B_1$ 、 $B_2$  进行计算,如图 1 所示。光纤数值孔径较小,满足傍轴条件,成像过程符合理

想成像原理。光线  $B_1$  的径向初始位置  $r_{01} = 0$ ,根据折射定律得到初始斜率:

$$r'_{01} = -\tan[\varphi - \arcsin(\sin \varphi/n_1)], \quad (4)$$

$B_1$  的轨迹方程可以表示为

$$r_1(z) = -\frac{\tan[\varphi - \arcsin(\sin \varphi/n_1)]}{\sqrt{A}} \sin(\sqrt{A}z). \quad (5)$$

根据直角三角变换和折射定律可以得出光线  $B_2$  的初始位置：

$$r_{02} = -\frac{1}{2}d_1 \sin(2\varphi), \quad (6)$$

初始斜率  $r'_{02} = -\tan \varphi$ 。则  $B_2$  的轨迹方程为

$$r_2(z) = -\frac{1}{2}d_1 \sin(2\varphi) \cos(\sqrt{A}z) - \frac{\tan \varphi}{\sqrt{A}} \sin(\sqrt{A}z), \quad (7)$$

光线  $B_1$ 、 $B_2$  的交点即为光束聚焦点，需要注意，两束光线起始位置不同，轴向传播长度相差  $\Delta_1$

$$\Delta_1 = d_1 \sin^2 \varphi, \quad (8)$$

因而对于光束聚焦点其需满足

$$r_1(z) = r_2(z + \Delta_1). \quad (9)$$

求解方程(8)式可以得到像点的轴向位置  $z(\varphi, d_1)$ ，由图 1 可知  $z(\varphi, d_1)$  略小于 GRIN 透镜节距的一半，将其代入(4)式或(6)式即可得到  $r_0$ 。

若 GRIN 透镜前端面为多斜面构成的棱镜，单芯光纤输出的光束传播至透镜的各个斜面时，落在不同斜面上的光分别发生折射，根据  $\varphi$  和  $d_1$  的取值可确定待耦合纤芯的位置。若各斜面倾角  $\varphi_i$  相同，则通过每个斜面折射的光束在传播了相同的长度后会同时聚焦到聚焦平面  $F$  上，且均匀分布，当待耦合光纤束或多芯光纤端面位于焦平面且其纤芯位于会聚点时，便可实现分束耦合。

采用这种方法，耦合分光比主要取决于入射光束与透镜前端棱镜的相对位置。考虑到光纤的辐射光场为高斯光，设其光强分布为

$$I(x, y, z) = A_0^2 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp[-2(x^2 + y^2)/\omega^2(z)], \quad (10)$$

式中  $\omega_0$  为束腰半径， $A_0$  为高斯光束的振幅常量， $\omega(z)$  为光束传输  $z$  长度后的束宽。设  $\Gamma|_{z=z_0}$  为过棱镜顶点的垂轴平面，光束在平面  $\Gamma$  上的强度分布为  $I(x, y)$ ，棱镜在  $\Gamma$  上的投影将光斑分割为  $N$  个区域，其分别为  $S_1, S_2, \dots, S_N$ ，分光比等于每个区域上光强积分的比值，即

$$s_1 : s_2 : \dots : s_N = \left[ \iint_{S_1} I(x, y) dx dy \right] : \left[ \iint_{S_2} I(x, y) dx dy \right] : \dots : \left[ \iint_{S_N} I(x, y) dx dy \right]. \quad (11)$$

若光轴经过棱镜顶点，由高斯光的对称性可知，耦合分光比等于各棱锥面在平面  $\Gamma$  上投影角度比，由于投影角度分配的任意性，理论上可以得到任意分光比输出。

以图 2 所示的三芯光纤耦合模型为例，设  $a, b, c$  分别是棱锥面  $A, B, C$  在平面  $\Gamma$  上的投影角度。若三棱镜顶点在光轴上则其分光比为  $a : b : c$ ；若棱镜发生  $(\Delta x, \Delta y)$  的位移，如图 3 所示，棱镜投影移向图中实线位置并将光束分割为  $S_1, S_2, S_3$  三个区域，此时棱镜分光比为

$$s_1 : s_2 : s_3 = \left[ \iint_{S_1} I(x, y) dx dy \right] : \left[ \iint_{S_2} I(x, y) dx dy \right] : \left[ \iint_{S_3} I(x, y) dx dy \right]. \quad (12)$$

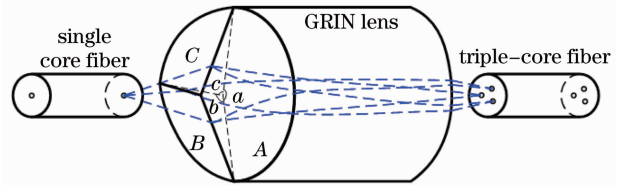


图 2 三芯光纤耦合单芯光纤示意图

Fig. 2 Principle diagram of triple-core fiber coupling SCF

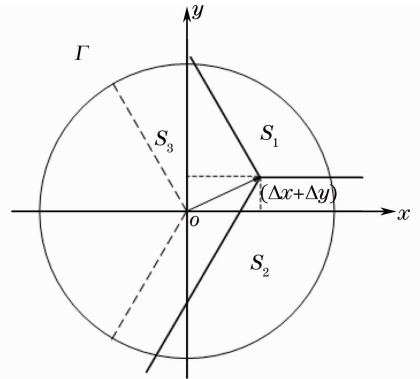


图 3 三棱锥镜面分光比计算示意图

Fig. 3 Calculating scheme of a triangular pyramid coupling ratio

不难发现，该耦合方法的关键在于透镜和系统的设计，其避免了对光纤的直接加工，因而对 PCF、MCF 等难以应用常规方法耦合的光纤或光纤组束具有很强的适用性。

### 3 仿真研究

为了验证上述设计思想和指导参数设计，采用 Zemax 软件进行了仿真和分析。选取透镜材料为美国 NSG 公司的 SLS-1.0 型径向梯度折射率透

镜,该透镜可进行所需端面的加工,对 1550 nm 波段光的折射率分布为

$$n(r) = 1.57 - 0.2023r^2, |r| < 1.68. \quad (13)$$

### 3.1 光束聚焦位置仿真验证

根据提出的光束聚焦位置的计算方法,光束在 GRIN 透镜内的聚焦位置  $r_0$  只与斜面倾角  $\varphi$ 、物距  $d_1$  有关。为验证该算法的正确性,对图 1 所示的模型进行了仿真,图 4(a)为仿真计算得到的  $r_0$  与  $\varphi$ 、 $d_1$  的关系曲面,可以看出  $r_0$  由  $\varphi$ 、 $d_1$  共同确定。典型情况下,当锥面加工完成后, $\varphi$  值固定,装配时,可

以通过轴向调节  $d_1$  值补偿斜角  $\varphi$  偏差和待耦合光纤(或纤芯)偏差,保证模场准确对准,获得最低损耗。图 4(b)为  $d_1 = 1.2$  mm 时,  $r_0$  随  $\varphi$  变化的仿真值以及理论计算值。可以看出当  $\varphi$  较小时,仿真结果与理论计算值吻合得较好;当  $\varphi$  逐渐增大,光束傍轴性变差,光束传播方程中高阶项影响增大,使二者差距逐渐拉大。由于光束经 GRIN 透镜聚焦后的径向位置为耦合光纤/纤芯的径向位置,因此通过该方法可以初步解算出  $\varphi$ 、 $d_1$  的取值范围,并在耦合模型的优化中筛选最优解。

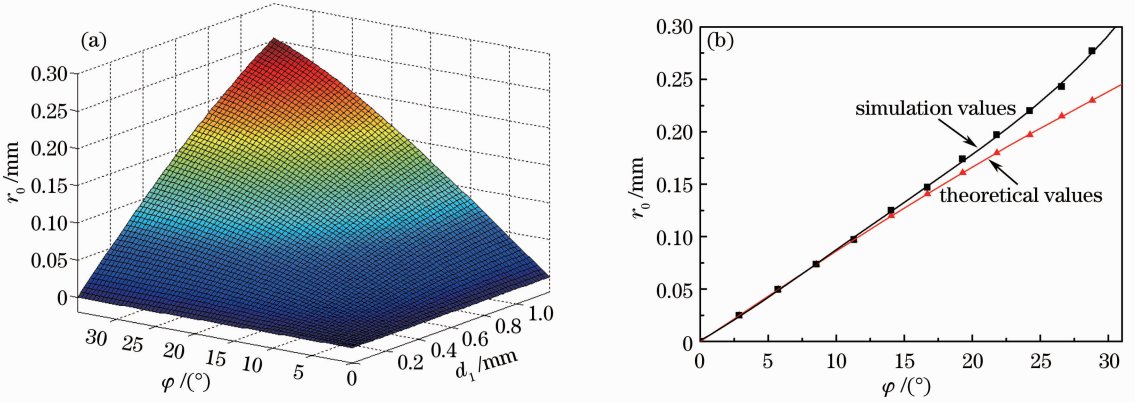


图 4 (a)斜面倾角  $\varphi$  与聚焦位置  $r_0$ 、物距  $d_1$  的关系曲面; (b)物距  $d_1 = 1.2$  mm 时,斜面倾角  $\varphi$  与聚焦位置  $r_0$  的关系曲线

Fig. 4 (a) Influences of bevel angle  $\varphi$  on focusing position  $r_0$  and object distance  $d_1$  in theory; (b) influences of bevel angle  $\varphi$  on focusing position  $r_0$  when object distance  $d_1 = 1.2$  mm

当输入光纤与透镜轴存在偏差,设为  $(\Delta x, \Delta y)$ ,则径向偏移为  $\Delta_r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$  和  $r_0$  会发生变化。图 5 为  $\varphi = 11.31^\circ$ 、 $d_1 = 1.0$  mm 时,仿真得到的  $r_0$  与  $\Delta_r$  的关系曲线,从图中可以发现当  $\Delta_r$  取值较小时,二者有较好的线性关系,斜率约为  $-1$ 。另外,

当输入光纤偏移时,多光束的光斑在像平面上会反方向移动,且相对位置基本保持不变,这对系统调节和损耗补偿有重要意义。

### 3.2 耦合效率分析

在 Zemax 软件中,能够仿真光束成像时光束的强度分布,进而获得近似模场半径,待耦合光纤的模场直径是确定的,采用模场匹配耦合理论,可以计算光纤耦合效率。这样,利用 Zemax 的参数优化功能得到在满足光束聚焦位置下的最大耦合效率  $\eta_{max}$ 。取输入/输出单模光纤均为 SMF-28,其数值孔径  $NA = 0.13$ 、模场直径为  $10.5 \mu\text{m}$ (在 1550 nm 波长处),进行了耦合效率计算。图 6 为在不同  $\varphi$  与  $d_1$  取值下  $\eta_{max}$  的变化曲线,从图中可以看出  $\varphi$  或  $d_1$  增大都会降低耦合效率,并且其衰减速度也逐渐加快。其原因是当  $\varphi$  与  $d_1$  较小时,光束傍轴性良好;当  $\varphi$  与  $d_1$  逐渐增大,光束离轴量大,像差成为影响  $\eta_{max}$  的主要因素,因此在耦合参数设计时,应尽量满足傍轴条件。

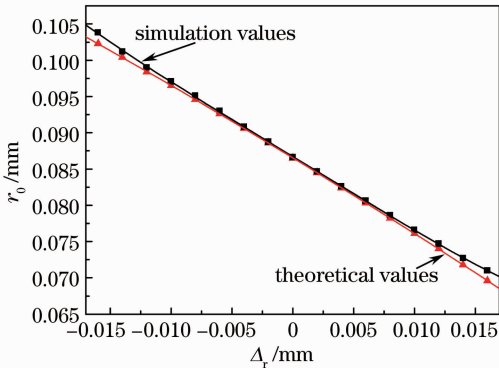


图 5 物距  $d_1 = 1.0$  mm, 斜面倾角  $\varphi = 11.31^\circ$  时,聚焦位置  $r_0$  与  $\Delta_r$  的关系曲线

Fig. 5 Influences of radial deflection  $\Delta_r$  on focusing position  $r_0$  when object distance  $d_1 = 1.0$  mm, bevel angle  $\varphi = 11.31^\circ$

图 7 为用 Zemax 仿真得到的经透镜后光束个数分别为 2、3、4 时的聚焦光斑图,这些光斑对称分布,光束能量集中,能实现多束分光和低损耗耦合,图 7

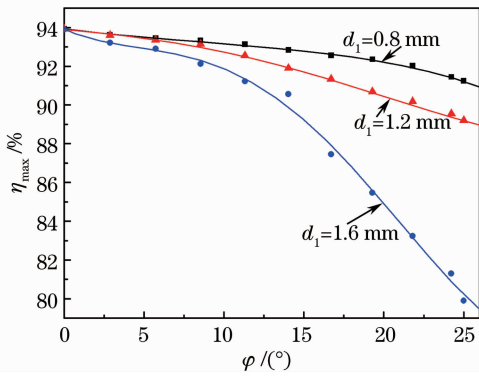


图 6 斜面倾角  $\varphi$  与物距  $d_1$  对最大耦合效率  $\eta_{\max}$  的影响曲线

Fig. 6 Influences of bevel angle  $\varphi$  and object distance  $d_1$  on the maximum efficiency  $\eta_{\max}$

中  $K$  为光束个数。

### 3.3 实例仿真

以  $1 \times 3$  耦合器为例进一步仿真了实际耦合损

耗效率。基于图 2 所示的光路结构，仿真了两种耦合情况：

1) 一到三根光纤的耦合情况，光纤为 SMF-28 单模光纤，三纤呈正三角形分布，工作波长为 1550 nm，SMF-28 的模场直径为  $10.5 \mu\text{m}$ ，数值孔径  $NA = 0.13$ 。仿真设计时， $\varphi = 12.4^\circ$ ， $d_1 = 0.675 \text{ mm}$ ，透镜长度为 5.23 mm，此时光纤间距为 0.125 mm，每个输出光纤的耦合效率相同，仿真得到的最大耦合效率为  $\eta_{\max} = 91.3\%$ ；

2) 一到三芯光纤的耦合情况，三芯光纤选取文献[16]中控制的光纤，三芯呈正三角形分布，工作波长为 1550 nm，纤芯模场直径为  $8 \mu\text{m}$ ，数值孔径  $NA = 0.12$ ，芯间距为  $62.5 \mu\text{m}$ 。三芯 PCF 的耦合模型中纤芯间距很小，系统傍轴性质好。仿真时，取  $\varphi = 6.62^\circ$ ， $d_1 = 0.621 \text{ mm}$ ，光束聚焦点间距为  $62.5 \mu\text{m}$ ，透镜长度为 5.25 mm，每个纤芯的耦合效率为  $\eta = 93.48\%$ 。

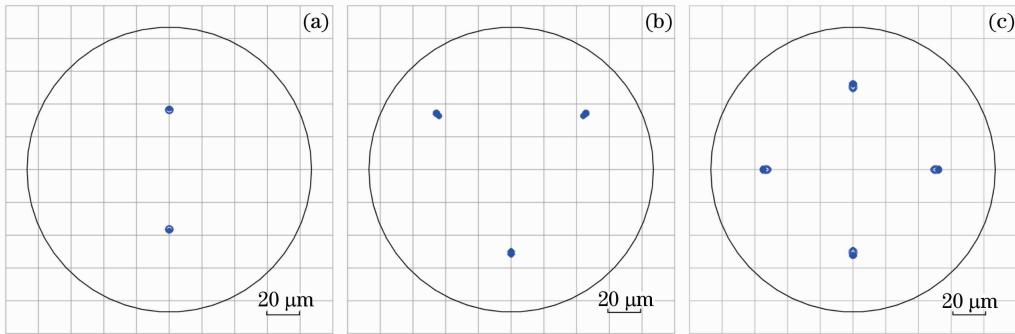


图 7 聚焦光斑点列图。(a)  $K=2$ ；(b)  $K=3$ ；(c)  $K=4$

Fig. 7 Spot diagrams for beams faculae. (a)  $K=2$ ；(b)  $K=3$ ；(c)  $K=4$

## 4 结 论

提出了一种基于单个 GRIN 透镜的  $1 \times N$  的光纤耦合实现方法，建立了其分束及耦合过程的理论分析方法。在 Zemax 环境下对耦合模型和相关参数进行了仿真研究，验证了提出的耦合方法的可行性。采用此方法可以有效实现低损耗、多光纤(或多芯)耦合，避免了对光纤的加工和处理，为各类微结构光子晶体光纤、多芯光纤、光纤组束和光纤合光提供了实用的技术。

### 参 考 文 献

- 1 P Russell. Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299 (5605): 358–362.
- 2 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0101001.
- 柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究

进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.

- 3 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205001.
- 张银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205001.
- 4 M Koshiba, K Saitoh, K Takenaga, *et al.*. Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory [J]. Opt Express, 2011, 19(26): 102–111.
- 5 Sun Bing, Chen Mingyang, Qian Chunlin, *et al.*. Design of a broadband directional coupler based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706010.
- 孙兵, 陈明阳, 钱春霖, 等. 基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706010.
- 6 P K Choe, A Liu, G G King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2001, 13(5): 439–441.
- 7 Chen Ming, Li Jianfeng, Wang Yishan, *et al.*. Progress of high-order mode-suppression technology in high-power large mode field fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080002.

- 陈 明, 李剑锋, 王屹山, 等. 高功率大模场光纤激光器高阶模抑制技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080002.
- 8 H Kim, J Kim, U C Paek, *et al.*. Tunable photonic crystal fiber coupler based on a side-polishing technique [J]. Opt Lett, 2004, 29(11): 1194–1196.
- 9 B H Lee, J B Eom, J Kim, *et al.*. Photonic crystal fiber coupler [J]. Opt Lett, 2002, 27(10): 812–814.
- 10 L R Jaroszewicz, A K Stasiewicz, P Marć, *et al.*. Broadband photonic crystal fiber coupler with polarization selection of coupling ratio [C]. SPIE, 2010, 7653: 76533W.
- 11 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai, *et al.*. Coupling approach and mechanism of single-core and twin-core fiber [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 913–917.  
朱晓亮, 苑立波, 刘志海, 等. 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 913–917.
- 12 Zheng Jingjing, Zheng Kai, Peng Jian, *et al.*. Analysis of splicing and splicing fusion coupling efficiency between single-core fiber and dual-core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2529–2535.  
郑晶晶, 郑 凯, 彭 键, 等. 单芯光纤与双芯光纤的对接和熔接耦合效率分析[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2529–2535.
- 13 Y Tottori, T Kobayashi, M Watanabe. Low loss optical connection module for 7-core multi-core fiber and seven single mode fibers [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2012, (24): 1926–1928.
- 14 J Palais. Fiber Optic Communications [M]. Wang Jiangping, Liu Jie, Wen Chuanhua, Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.  
帕勒里斯. 光纤通信[M]. 王江平, 刘 杰, 闻传花, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- 15 Zhang Bingyuan, Wang Guoju, He Jingliang, *et al.*. Passively mode lock of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GRIN lens as optical coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714001.  
张丙元, 王国菊, 何京良, 等. 自聚焦透镜耦合激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 锁模激光器的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714001.
- 16 L Yuan, Z Liu, J Yang, *et al.*. Bitapered fiber coupling characteristics between single-mode single-core fiber and single-mode multicore fiber [J]. Appl Opt, 2008, 47(18): 3307–3312.

栏目编辑: 王晓琰