

大模场光纤直弯过渡中的模场演变分析

廖素英¹ 巩马理²

(¹空军空降兵学院, 广西 桂林 541003
²清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心, 北京 100084)

摘要 为了进一步探讨大模场光纤激光的模式控制方法,需要研究大模场光纤的弯曲特性。从亥姆霍兹方程出发,通过对比直光纤和弯曲光纤的模场分布,确定大模场光纤直弯过渡中的模场演变方式。应用模场的叠加和激发电理论,推导得到光纤直弯过渡中的模场耦合效率公式。应用耦合公式和有限元方法,计算了阶跃折射率分布的大模场光纤在直弯过渡中的模场耦合效率。结果表明:在光纤的直弯过渡中,存在模式的自耦合和互耦合过程,耦合程度随着弯曲程度和模场阶次的变化而变化,其中基模的耦合效率始终最大,高阶模的耦合损耗大于低阶模。光纤的直弯过渡以总能量的损耗为代价换取对高阶模的有效抑制。

关键词 光纤光学;大模场光纤;直弯过渡;模场演变;耦合效率

中图分类号 TN248.1;TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0305006

Analysis of Mode Evolution between Straight and Curved Fiber Transition in Large Mode Area Fibers

Liao Suying¹ Gong Mali²

(¹Air Force Airborne Academy, Guilin, Guangxi 541003, China
²Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract For further investigating the fiber laser mode control, the bending properties of large mode area fibers need to be studied. Beginning with the Helmholtz equation, by comparing the field distributions of straight fiber and bent fiber modes, the mode evolution ways between straight and curved large mode area fibers transition are determined. Based on mode superposition and excitation theory, the mode coupling efficiency formula about straight and bent fiber transition is derived. With the help of coupling formula and finite element method, the mode coupling efficiencies of a step-index large mode area fiber in straight and curved state transition are calculated. The results show that self-coupling and cross-coupling processes exist when fiber transits between straight and curved states, and the coupling degree varies with the degree of bending and mode order, in which the coupling efficiency of the fundamental mode is always higher than that of other modes and the coupling loss of higher order mode is larger than that of lower order mode. The fiber transition between straight and curved states costs the total power to exchange for the effective inhibition of higher order mode.

Key words fiber optics; large mode area fibers; transition between straight and curved states; mode field evolution; coupling efficiency

OCIS codes 060.2270; 060.2310; 060.3510; 140.3510

1 引言

光纤激光器和放大器通常采用大模场光纤来抑制非线性效应和减少光纤损伤,以进一步增大光纤激光器和放大器的输出功率^[1~6]。实际应用时,大

模场光纤往往需要弯曲起来使用。当光纤芯径不大时,这种弯曲有利于改善光纤激光的输出光束质量;但对芯径较大的大模场光纤而言,弯曲除了造成高、低阶模不同的弯曲损耗外,还同时引起高、低阶模不

收稿日期: 2012-08-10; 收到修改稿日期: 2012-11-19

基金项目: 广西自然科学基金(2011GXNSFA018148)资助课题。

作者简介: 廖素英(1972—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: liaosuying@gmail.com

同程度的模场畸变以及模式之间的耦合^[7~9],这些现象的存在,将改变大模场光纤的激光输出特性^[10],模场的弯曲特性因此成为大模场光纤设计中首先要考虑的问题,是大模场光纤走向实用的关键。

当光纤弯曲使用时,光纤中传导的光波不可避免地经历从直光纤段到弯曲光纤段,再到直光纤段传播的过程。在这一过程中,由于各光纤段的光波模场不匹配,会导致光纤导模之间耦合以及光纤导模与辐射模之间耦合,使得光纤各模式的功率比例发生变化,使原本较弱的模式可能因为光纤弯曲变化而功率比例增加。在大模场光纤中,相邻模式之间的等效折射率差一般较小,光纤直弯过渡引起的模式耦合很可能改变模场传播的特性,对于大模场光纤激光输出的光束质量控制极为不利,因此从模式激发和耦合的角度,研究大模场光纤直弯过渡过程中的模式演变特点,以便进一步探讨大模场光纤激光的模式特性控制方法。

2 光纤直弯过渡中的模场演变

当光纤弯曲或缠绕使用时,光纤沿传播轴向(设为 z 方向)通常可以分为3段:直光纤段 S_1 、弯曲光纤段 S_b 和直光纤段 S_2 ,如图1所示。假设各段光纤都足够长,为了简化只画出其中的一部分。考虑图中所示的光波传播过程,直光纤 S_1 中的光场 E_{s1} 当

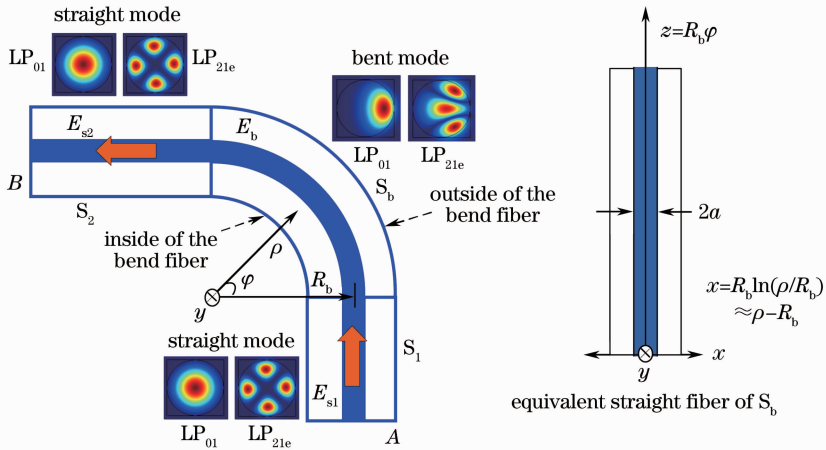


图1 光纤直弯过渡中的模式演变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mode evolution between straight and curved fiber transition

在弯曲段光纤 S_b 中,光纤弯曲引起的等效光程变化和弹光效应使得光纤横截面的折射率分布发生了变化,应用保角变换,可将弯曲光纤 S_b 变换成坐标系 (x, y, z) 中的等效直光纤(如图1右侧直光纤所示),则其等效折射率分布近似为^[7]

$$n_b = n(r, \theta) \left(1 + \frac{x}{R_{\text{eff}}} \right), \quad (3)$$

光纤弯曲时耦合进入弯曲光纤 S_b ,变成 E_b ,传导一段长度后再耦合进入直光纤 S_2 ,这时的光场分布用 E_{s2} 表示。假设光纤 S_1 、 S_2 的结构完全相同,即折射率分布和芯径大小完全相同,包层直径为 $2b$,纤芯直径为 $2a$,光纤弯曲平面所在的柱坐标系为 (ρ, φ, y) ,折射率分布为阶跃分布,包层和纤芯的折射率分别为 n_0, n_1 ,且 $n_1 > n_0, n_1 \sim n_0$,满足弱导近似条件。选取光纤轴向的柱坐标系 (r, θ, z) 时, S_1, S_2 中的线偏振模模场分布满足标量亥姆霍兹方程^[11]:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + [k_0^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] \right\} \cdot E(r, \theta) = 0, \quad (1)$$

式中 $E(r, \theta)$ 表示模场分布; β 表示导模沿轴向的传播常数; k_0 表示真空中的波数; $n(r, \theta)$ 表示光纤横截面上用极坐标 (r, θ) 表示的折射率分布,对于阶跃光纤的表达式为

$$n(r, \theta) = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_0, & r > a \end{cases}. \quad (2)$$

求解(1)式,可以得到直光纤 S_1 或 S_2 中各阶线偏振模的模场分布,图1中给出了两个模式 LP_{01} 和 LP_{21e} 模的一个简并模 LP_{21e} 的模场分布。文中用字母“o”、“e”下标区别高阶模不同旋向的简并模,“o”表示奇数模,“e”表示偶数模,如无特殊说明,下文相同。

式中 n_b 表示光纤弯曲后的等效折射率分布, x 与光纤横截面上的极坐标变量的关系是 $x = r \cos \theta, R_{\text{eff}}$ 为考虑弹光效应后的等效弯曲半径,它与实际弯曲半径之间有一定的倍数关系,倍数的大小由光纤材料的应力特性决定。对于熔石英光纤,等效弯曲半径与实际弯曲半径 R_b 的关系是 $R_{\text{eff}} \approx 1.28R_b$ ^[7]。将(3)式代入(1)式,应用数值方法求解亥姆霍兹方程,

可以得到弯曲光纤的各阶模场分布,图 1 中的弯曲光纤旁也给出了两个弯曲模式 LP₀₁ 和 LP_{21c} 模的模场分布。

对比直光纤和弯曲光纤的模场分布,可以发现,弯曲光纤的模场分布出现了中心偏离、形变、面积压缩等畸变现象,这种模场畸变程度^[12~15]随着光纤结构的不同而不同,也随着光纤弯曲半径的减小而变得更加严重,影响光纤中传导光波的特性。正是由于直光纤与弯曲光纤中的模场分布不相同、不匹配,所以光波在不同光纤段中传播时,将以不同的导模形式存在;在不同光纤段的交界处,将从一种光纤模式耦合过渡为另一种光纤模式,即 S₁ 光纤段的直光纤模式在直/弯光纤交界处将耦合转换为 S_b 中的弯曲模场分布,然后以弯曲模场分布稳定地向前传播,到达 S_b 与 S₂ 的弯/直连接交界处,各阶次弯曲模场反过来向直光纤的模场耦合过渡,最终形成直光纤的模场分布,稳定向前传播。

3 光纤直弯过渡中的模场耦合效率

光波在直/弯或者弯/直光纤的过渡耦合过程中,模式演变和转换的基础是模场的激发和叠加原理,即光纤中传导的场分布 $E(r, \theta, z)$ 总是可以表示为相应光纤的本征模场 $E_i(r, \theta)$ 按一定权重因子的线性叠加^[16]:

$$E(r, \theta, z) = E_i(r, \theta) \exp(j\beta z) = \sum_{i=1}^N c_i e_i(r, \theta) \exp(j\beta_i z), \quad (4)$$

式中 j 为虚数单位, $E_i(r, \theta)$ 为传播光场在光纤横截面上的分布, $e_i(r, \theta)$ 和 β_i 分别表示第 i 个模式的功率归一化场分布及相位传播常数, c_i 为相应模式的叠加权重因子。按照(4)式, S₁ 段光纤中的模场耦合进入弯曲光纤段 S_b 时,可以分解成 S_b 中的各阶次模式之和。假设直光纤 S₁ 的第 i 个模式的模场分布可表示为 $e_{si}(r, \theta) \exp(j\beta_{si} z)$, S_b 光纤的各阶次模式为 $e_{bv}(r, \theta) \exp(j\beta_{bv} z)$, 其中符号 s, b 用于区别直光纤和弯曲光纤的参数,不表示光纤模式的阶次。注意它可为导模和辐射模,当它为辐射模时, β_{bv} 为复数,则直光纤模式入射激发弯曲光纤模式,有

$$e_{si}(r, \theta) \exp(j\beta_{si} z) = \sum_{\mu} c_{bv} e_{bv}(r, \theta) \exp(j\beta_{bv} z), \quad (5)$$

为简单起见,忽略光波在光纤直/弯界面上的反射,只考虑光波向前传播的情况。将(5)式两端乘以 $e_{bv}^*(r, \theta) \exp(-j\beta_{bv} z)$, 并利用正交性,在横截面 S 上

积分,可得

$$c_{bv} = \frac{\iint_S e_{si} e_{bv}^* dS}{\iint_S e_{bv}^2 dS} \exp[j(\beta_{si} - \beta_{bv})z], \quad (6)$$

$$|c_{bv}|^2 = \left| \iint_S e_{si} e_{bv}^* dS \right|^2, \quad (7)$$

式中 S 表示整个光纤横截面积。(6)式、(7)式表明,被激发模式的权重因子由入射直光纤模场分布 e_{si} 和被激发的弯曲光纤模场分布 e_{bv} 的重叠积分确定,如果该项积分为零,说明相应的弯曲模式不被激发。权重因子模的平方决定了相应被激发模式的功率比例,反映了两个模式之间的耦合程度,称为耦合效率,习惯用符号 $\kappa_{si, bv}$ 表示,用非归一化的模场分布表示为

$$\kappa_{si, bv} = \frac{\left| \int_S E_{si} E_{bv}^* dS \right|^2}{\int_S E_{si} E_{si}^* dS \int_S E_{bv} E_{bv}^* dS}, \quad (8)$$

式中 E_{si} 、 E_{bv} 分别为直光纤的第 i 个模式和弯曲光纤的第 v 个模式的非归一化模场分布, $\kappa_{si, bv}$ 表示从直到弯过渡中,这两个模式之间的耦合效率。

按照这种思路,可以得到光波从弯曲光纤 S_b 耦合进入直光纤 S₂ 时,弯曲模式与直光纤模式之间的耦合效率,其表达式与(8)式基本相同,只需把(8)式中 $\kappa_{si, bv}$ 的“ si, bv ”及 E_{si} 、 E_{bv} 的位置交换即可得到从弯到直的耦合效率,此时弯曲光纤模式为入射模式,直光纤模式为被激发的模式。

根据(6)~(8)式,光波在从直光纤进入弯曲光纤(或从弯曲光纤进入直光纤)的过渡耦合过程中,同一阶次的直(弯曲)光纤模式场除了向同一阶次的弯曲(直)光纤模式场耦合外,还向其他阶次的弯曲(直)光纤模场耦合,前者称为自耦合,后者称为互耦合。耦合程度的大小由耦合效率描述,它是两个模场分布的归一化重叠积分,实质上反映了光纤中模式之间的能量转移,所以通过计算耦合效率,可以获得光纤过渡过程中从一个模式演变到另一个模式的功率比例以及能量的损耗。

4 计算结果分析

按照第 2 节和第 3 节对光纤直弯过渡中的模场演变和耦合效率的分析,以阶跃折射率分布的大模场光纤为例,计算了它在弯曲使用时的模场耦合效率,以便了解大模场光纤在直弯过渡中的模场演变

特点。计算步骤如下:1) 采用有限元方法,计算直光纤、弯曲光纤的模场分布;2) 以直光纤的模场为入射光场,计算直/弯过渡中的模场耦合效率;3) 以弯曲模场为入射光场,计算弯/直过渡中的模场耦合效率;4) 计算直光纤模场经历直/弯过渡而后弯/直过渡整个过程中的模场耦合效率以及总能量的传播(忽略光波在弯曲段光纤中传播的损耗)。计算选择的光纤参数为: $n_1 = 1.459, n_0 = 1.458, a = 50 \mu\text{m}, b = 300 \mu\text{m}, R_b = 15 \sim 50 \text{cm}$ 。

图2为光纤从直到弯过渡时的模式耦合效率随弯曲半径的变化曲线,图2(a)为直光纤的各模式与弯曲光纤的对应模式之间的自耦合变化曲线,比如直光纤的 LP_{01}^s 模和弯曲光纤的 LP_{01}^b 模的自耦合;图2(b)为直光纤的 LP_{01}^s 模与弯曲光纤的多个模式之间的互耦合变化曲线。结果显示:随着弯曲半径减小,自耦合程度下降,这是由于直光纤模场与弯曲

光纤的同一阶次模场之间的差别增大,耦合程度下降;与其他高阶模相比,基模的自耦合在所有弯曲半径下都有最大值,这是由于高阶模的模场分布有旋向变化(0阶模除外)并且模场畸变一般较低阶模严重,所以高阶模的自耦合要小;在直光纤的 LP_{01}^s 模与弯曲光纤各模式的耦合中,互耦合均小于直光纤 LP_{01}^s 模与弯曲光纤 LP_{01}^b 模之间的自耦合,并且互耦合主要发生在模式与其同阶次或临近阶次模式之间,比如弯曲半径大于40 cm时, LP_{01}^s 模主要与 LP_{11e}^b, LP_{02}^b 模发生互耦合,与 LP_{11o}^b 模因为偏振方向不同而不发生耦合;弯曲半径减小到40 cm时, LP_{01}^s 模与 LP_{31e}^b 模开始互耦合;弯曲半径继续减少, LP_{01}^s 模与 LP_{21e}^b 模也开始出现耦合。这说明随着弯曲半径减小,模场畸变增加,高阶模的奇数模与偶数模分离,模式的自耦合程度下降,互耦合增强。

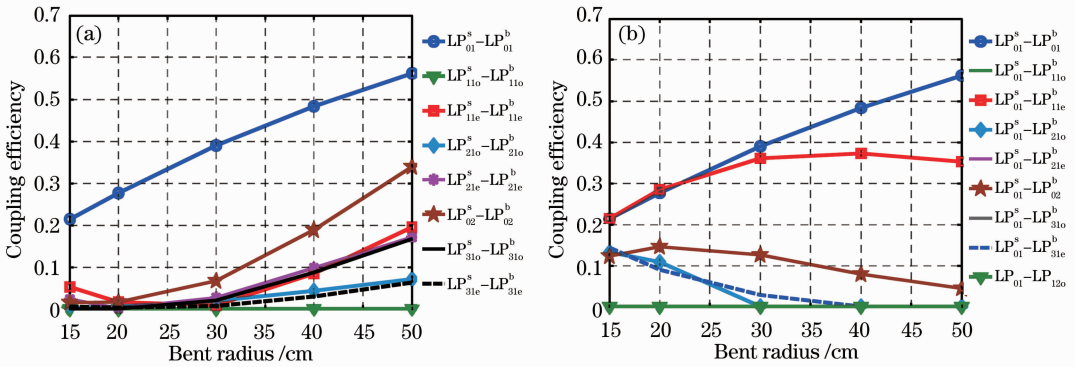


图2 光纤从直到弯过渡中的模式耦合效率随弯曲半径的变化。(a)自耦合;(b)互耦合

Fig.2 Mode coupling efficiencies in fiber transition from straight to curved states vary with bent radius.

(a) Self-coupling; (b) cross-coupling

反过来,在从弯到直的过渡中,也出现类似的变化,如图3所示。由于自耦合的相互对象不变,所以从弯到直的自耦合与从直到弯的自耦合相同,但从弯曲基模 LP_{01}^b 向直光纤各阶模式的互耦合与直光纤基模 LP_{01}^s 向弯曲各阶模式的互耦合相比,有些不同。具体表现在:弯曲较严重时,基模向高阶模的互耦合能量超出了其自耦合的能量,这主要因为模场畸变增加后,弯曲基模与直光纤基模模场重叠的程度下降,反之与高阶模模场重叠的可能性上升,所以能量传递增加。这种现象说明基模的能量可以部分转移向高阶模,而不是耦合向辐射模损耗掉,这对于减少模场能量的损耗是有利的。

光纤直弯和弯直总能量耦合效率随弯曲半径的变化如图4所示。从图4(a)中的模场总能量过渡来看,总的能量耦合效率较低,在弯曲半径为20 cm

时,只有不到50%的能量能够过渡到新状态的光纤中。在多数情况下,能量耦合效率从直到弯的耦合过渡稍微高出从弯到直的过渡,只在弯曲半径较小时,从弯到直的耦合效率超过从直到弯的耦合,这可以从两方面解释:1) 弯曲光纤的等效折射率比相应直光纤的等效折射率高,弯曲模式一般多出直光纤的模式数量;2) 在弯曲半径较大时,直弯(或弯直)过渡时的模式演变以自耦合为主,当弯曲严重后,互耦合程度增强,模式转换到其他高阶模中的能量增加,总能量损耗的机会下降。因而,在弯曲半径较大时,从直到弯过渡的自耦合与从弯到直的自耦合相当的情况下,互耦合转到多出模式的能量使其获得高一些的总耦合效率,而在弯曲半径较小时,从弯到直的互耦合较强,能量损耗减少,其总能量耦合效率上升。

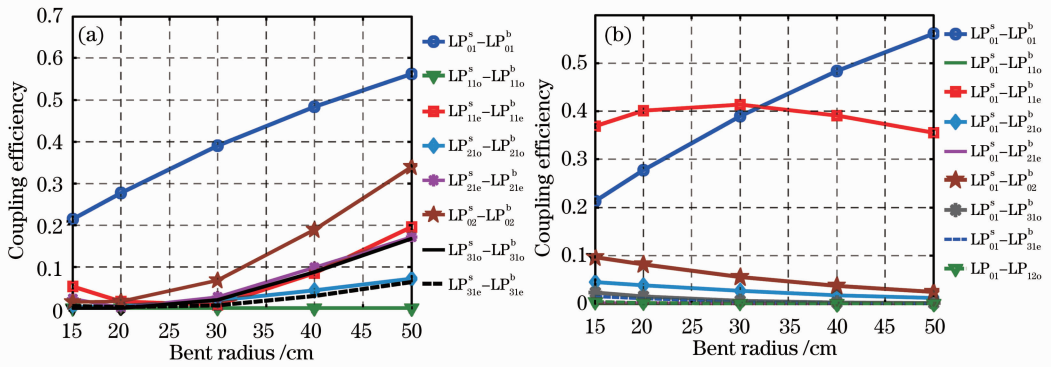


图 3 光纤从弯到直过渡中的模式耦合效率随弯曲半径的变化。(a)自耦合;(b)互耦合

Fig. 3 Mode coupling efficiencies in fiber transition from curved to straight states vary with bent radius.

(a) Self-coupling; (b) cross-coupling

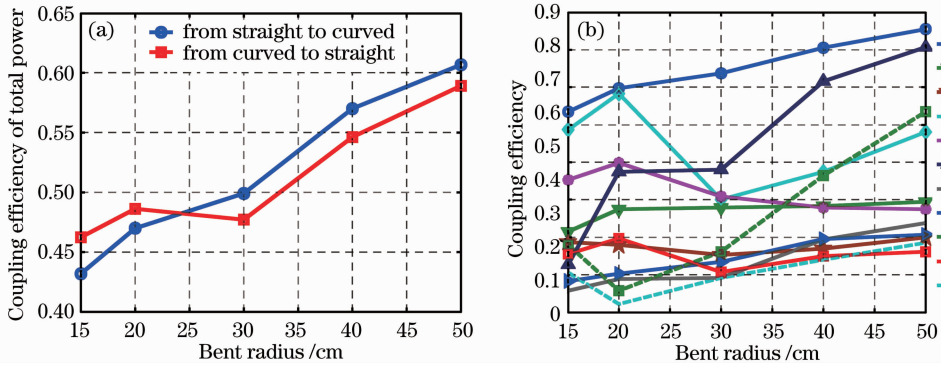


图 4 光纤直弯过渡中的耦合效率随弯曲半径的变化。(a)总能量耦合效率;(b)直到弯再到直

Fig. 4 Mode coupling efficiencies in fiber transition between curved and straight states vary with bent radius.

(a) Coupling efficiency of total power; (b) fiber transitions from straight to curved and then straight state

图 4 为光纤从直到弯再到直的过渡中耦合效率随弯曲半径的变化。从图 4(b)中的几个模式的总耦合效率(从直光纤到弯曲光纤最后再回到直光纤整个过渡过程中的总耦合效率)变化曲线也可以看出类似的特点,弯曲半径大于 30 cm 时,模式能量的耦合效率主要随其自耦合程度的下降而下降,弯曲半径小于 30 cm 后,互耦合方式转到高阶模的能量增加,多数高阶模的耦合效率随弯曲半径下降而可能上升,但总的来说,LP₀₁ 模的耦合效率始终最高,这表明在光纤的整个过渡过程中,高阶模的损耗一般大于低阶模的损耗。

5 结 论

综上所述,在光纤从直到弯过渡或从弯到直过渡的模式演变中,都存在模式的自耦合和互耦合过程。当弯曲不严重时,模式以自耦合为主过渡,随着弯曲程度增加,模式的互耦合加深,转向高阶模的能量增加,但不管光场是从直到弯还是从弯到直或从直到弯再回到直的传播过渡,基模的耦合效率始终

最大,高阶模的损耗通常大于低阶模的损耗,并始终伴随有总能量的损耗。这表明在光纤模场的状态过渡中,可以一定程度上抑制高阶模的传播而突出基模的优势,以总能量的损耗换得对高阶模一定程度的抑制作用,改善光束质量。这对于大模场光纤的设计和弯曲使用具有积极的作用。

参 考 文 献

- 1 J. R. Marcianite, R. G. Roides. Mode control in large-mode-area fiber lasers via gain filtering[C]. OSA/CLEO/IQEC 2009, 2009. CWD2
- 2 Feng Suya, Wang Meng, Yu Chunlei *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber with 260 μm core diameter achieved quasi-single-mode transmission[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205004
冯素雅,王孟,于春雷等. 260 μm 芯径超大模场光子晶体光纤实现准单模传输[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205004
- 3 Liao Suying, Gong Mali. New progress of large mode area fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 455~462
廖素英,巩马理. 大模场光纤研究的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 455~462
- 4 Shuang Chen, Ying Feng, Ling Wang. Design of large-mode-area rare earth doped fiber for high power coiled fiber amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 671~674

- 5 Wang Dan, Zheng Yi. Design and numerical investigation of a novel microstructured optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806003
王 丹, 郑 义. 一种新型微结构光纤的设计与数值研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806003
- 6 Lin Honghuan, Wang Jianjun, Deng Ying *et al.*. All fiber high-peak-power pulsed laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202002
林宏奂, 王建军, 邓 颖 等. 全光纤高峰值功率脉冲激光系统[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1202002
- 7 R. T. Schermer, J. H. Cole. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(10): 899~909
- 8 M. J. Fini. Bend-induced distortion in microstructure and solid fibers with very large mode area [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference; Optical Society of America, 2006. OFK5
- 9 Liu Gang, Yang Fei, Ye Qing *et al.*. Study of mode characteristics for large-mode-area double-clad fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605002
刘 刚, 杨 飞, 叶 青 等. 大模场面积双包层光纤光栅模式特性研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0605002
- 10 S. Liao, M. Gong, H. Zhang. Influence of mode distortion on the transverse mode competition in large-mode-area amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(3): 406~412
- 11 Okamoto Katsunari. *Fundamentals of Optical Waveguides*[M]. San Diego, U. S. A; Academic Press, 2000. 47~48
- 12 J. M. Fini. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 69~81
- 13 J. M. Fini. Intuitive modeling of bend distortion in large-mode-area fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1632~1634
- 14 J. M. Fini. Large mode area fibers with asymmetric bend compensation[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(22): 21866~21873
- 15 Li Jing, Jing Feng, Deng Ying *et al.*. The effect of fiber coiling mode on modes excitation[C]. Optical Conference Proceedings of Chinese Optical Society, 2010. 169
李 晶, 景 峰, 邓 颖 等. 光纤弯曲缠绕方式对模式激发的影响[C]. *中国光学学会光学大会论文集*, 2010. 169
- 16 D. Beom Soo Soh, J. Nilsson, S. Baek *et al.*. Modal power decomposition of beam intensity profiles into linearly polarized modes of multimode optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(7): 1241~1250

栏目编辑:王晓球