

# 光纤弯曲缠绕方式对模式激发的影响

李 晶 王建军 邓 颖 许党朋 林宏奂 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 模式耦合、弯曲畸变、弯曲损耗是大模场光纤激光中重要的考虑因素。为了研究模场畸变对于大模场光纤光束质量的影响,理论研究了阶跃光纤的模式耦合和模场畸变的特性。计算了有效弯曲半径经历渐变和突变情况下,模式功率随传播距离和有效弯曲半径的关系。数值计算结果显示,弯曲半径经历平滑的变化过渡到直光纤,当最小有效弯曲半径大于 3 cm 时,畸变基模激发的高阶模就可以忽略。而弯曲半径经历突然的变化过渡到直光纤,这个最小弯曲半径需大于 20 cm 时,畸变基模激发的高阶模才可以忽略。

**关键词** 光纤光学;大模场;模式耦合;模场畸变

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100204

## Effect of Fiber Coiling Mode on Modes Excitation

Li Jing Wang Jianjun Ding Ying Xu Dangpeng Lin Honghuan Jing Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Mode coupling, bend distortion and bend loss are important considerations in large mode area (LMA) fiber laser. Both mode coupling and mode distortion in the step-index fiber are studied theoretically in order to gain the effect of mode distortion on the beam quality. The dependences of mode power on propagation distance, effective bend radius are calculated with the bend radius experiencing sudden and gradual transition. Numerical simulations show that, if the distorted fundamental mode experiences smooth transition from bend fiber to straight fiber, the excitation of higher order modes could be ignored when the bend radius is larger than 3 cm. But the bend radius must be larger than 20 cm when the mode experiences sudden transition.

**Key words** fiber optics; large-mode-area; mode coupling; mode distortion

**OCIS codes** 060.2310; 140.3510; 350.5500

## 1 引 言

在各种类型的激光器中,光纤激光器以其优异的光束质量、体积小和能够长时间稳定运行得到了人们极大的关注。但由于受到各种非线性效应的影响,其输出功率较小,制约了它在工业、医疗等领域的应用。为提高其输出功率,大模场面积多模光纤应运而生。大模场面积光纤的采用,使得光纤激光器的输出功率大幅上升,同时也带来了光束质量变差的问题。为使大模场面积光纤激光器获得近衍射极限的光束输出,人们采用了各种方法来抑制光纤

中高阶模的振荡,包括优化光纤折射率的分布和掺杂浓度<sup>[1]</sup>、锥形光纤和弯曲选模<sup>[2]</sup>等。其中最简单、最经济的方法是直接采用光纤弯曲选模。

随着弯曲半径的减小,高阶模逐渐的被剥离出纤芯<sup>[3]</sup>,弯曲选模正是利用了这种原理。但是,对于普通阶跃光纤,光纤弯曲会造成模场畸变。已有文献报道了这种弯曲畸变的特性以及研究了这种弯曲畸变对大模场光纤激光器的横模竞争的影响,但是很少有报道这种弯曲畸变对光束质量的影响。本文从模式耦合出发研究了弯曲半径的变化对高阶模激

**收稿日期**: 2010-08-25; **收到修改稿日期**: 2010-11-15

**基金项目**: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(9140C6803010905)资助课题。

**作者简介**: 李 晶(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: lijing090326@126.com

**导师简介**: 景 峰(1968—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: jf\_caep@126.com

发的影响。

## 2 弯曲诱导的模场畸变

经常将光纤缠绕成图 1 这种方式,弯曲半径为  $R$ ,其中 1 和 4 是直光纤,2 和 3 是弯光纤,利用保角映射将弯曲光纤等效成直光纤,等效直光纤的折

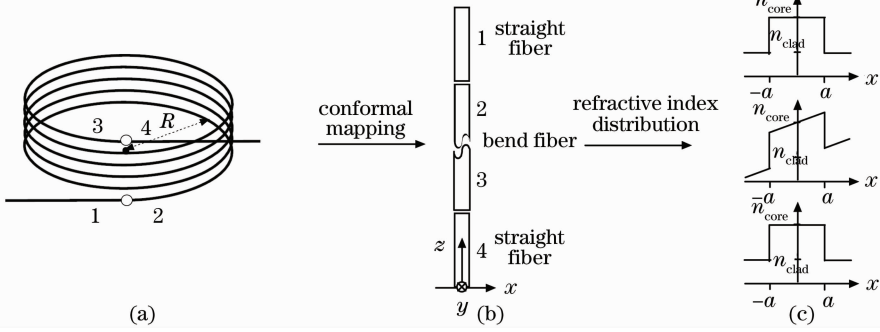


图 1 (a)弯曲光纤示意图,(b)弯曲光纤保角映射,(c)等效直光纤的折射率分布

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the bend fiber, (b) illustration of the conformal mapping of the bend fiber, (c) illustration of the refractive index distribution of the bend and straight fiber

采用有限差分的方法计算光纤弯曲时的模场分布,计算所用的参数如表 1 所示。图 2 给出了不同弯曲半径下的基模模场分布,可以看出当弯曲半径很小时,模场发生了严重的畸变。其中虚线是纤芯与包层的分界线。

表 1 模拟所用的参数

Table 1 Parameters used in simulations

Parameter	Value
Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	1.053
Core diameter $2a / \mu\text{m}$	25
Fiber diameter $d / \mu\text{m}$	120
Numerical aperture NA	0.1
Cladding refractive index $n_{\text{clad}}$	1.52
$z$ -discretization $\Delta z / \mu\text{m}$	0.5
$x$ -discretization $\Delta x / \mu\text{m}$	0.1
Vacuum wavevector $k_0$	$2\pi/\lambda$

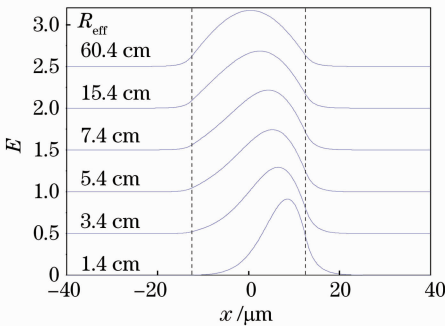


图 2 不同弯曲半径下,基模的模场分布

Fig. 2 Profiles of fundamental modes of a step-index fiber for several bend radius

率分布近似为<sup>[3]</sup>

$$n = n_0 \left( 1 + \frac{x}{R_{\text{eff}}} \right), \quad (1)$$

式中  $n_0$  是无应力弯曲光纤的折射率分布,  $R_{\text{eff}}$  是考虑了弯曲应力后的有效半径,对于硅玻璃,  $R_{\text{eff}} \approx 1.27R$ <sup>[3,4]</sup>。

## 3 弯曲诱导的模式耦合

光场沿弱导光纤传输,其光场  $E$  满足标量亥姆霍兹方程

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E = 0. \quad (2)$$

采用缓变包络近似将场量  $E$  分解为缓变包络振幅函数和快变载波项

$$E(x, y, z) = \psi(x, y, z) \exp(-jk_0 n_{\text{eff}} z), \quad (3)$$

式中  $k_0$  为真空波数,  $n$  为光纤折射率分布,  $n_{\text{eff}}$  为参考折射率,通常选为包层折射率。

场量  $E$  对  $z$  求导,同时假设包络函数  $\psi$  满足傍轴近似,(2)式可以整理为

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = -j \frac{1}{2k_0 n_0} \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) - j \frac{k_0}{2n_0} (n^2 - n_0^2) \psi. \quad (4)$$

为了计算方便,仅考虑光纤内传播的二维标量场  $\psi(x, z)$ ,其传播过程可以由透明边界条件的有限差分光束传播法(BPM)对(4)式进行计算<sup>[5]</sup>。

在光场传播过程中,不同模式的模式功率随传播方向的演变可以通过耦合模方程计算出来<sup>[6]</sup>。设在光纤位置  $z$  处的光场  $\psi(x, z)$  可以分解为一系列模式的叠加

$$\psi(x, z) = \sum_j a_j(z) \phi_j(x, \beta_j) + E_{\text{radiation}}, \quad (5)$$

式中  $a_j$  是在光纤位置  $z$  处的第  $j$  阶模式的振幅,  $\beta_j$  是第  $j$  阶模式的传播常数,  $\phi_j(x, \beta_j)$  是第  $j$  阶模式的归一化模场分布函数。为了简化,(5)式中的后面部

分一般省略。

由于模式的正交性,对(5)式两端同时乘以 $\phi_j(x,\beta_j)$ 的共轭函数,然后积分,可以得到 $a_j(z)$ 的大小

$$a_j(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x,z)\phi_j^*(x,\beta_j)dx, \quad (6)$$

式中 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_k(x,\beta_k)\phi_j^*(x,\beta_j)dx = \delta_{jk}$ 。

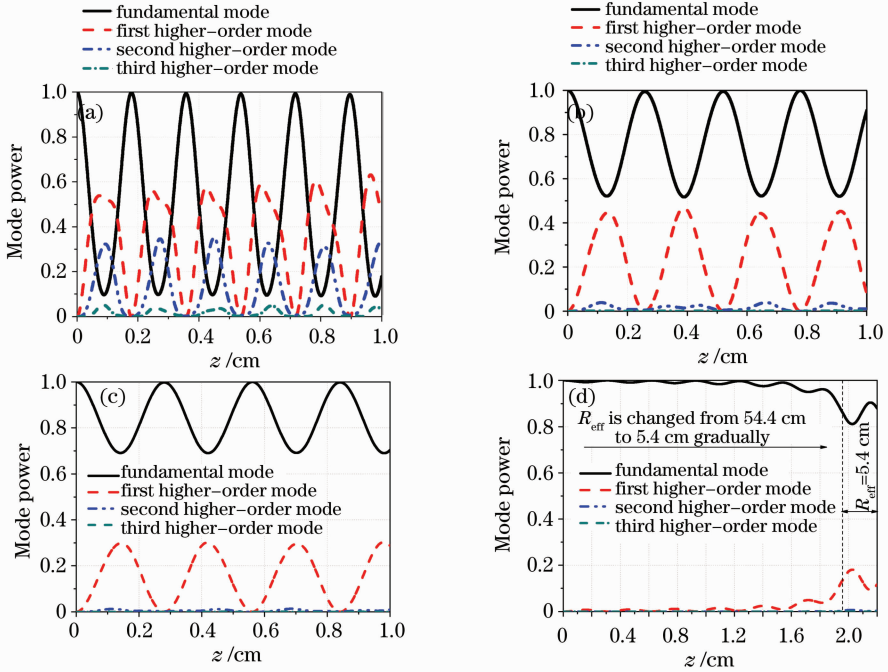


图3 模式的功率分布随光纤传播方向 $z$ 的变化。有效弯曲半径 $R_{\text{eff}}$ 由极大值突然过渡到(a)2.4 cm,(b)5.4 cm,(c)7.4 cm和有效弯曲半径 $R_{\text{eff}}$ 由极大值逐渐过渡到(d)5.4 cm

Fig. 3 Mode power evolution along fiber for several lower order modes when fundamental mode propagates from straight fiber to bend fiber with the effective bend radius  $R_{\text{eff}}$  suddenly changing to (a) 2.4 cm, (b) 5.4 cm, (c) 7.4 cm, and (d) 5.4 cm gradually

由图3可以看出,弯曲半径经历突变时,弯曲半径越小,激发出的高阶模的比例越高,由于在弯曲光纤中传播时,高阶模的弯曲损耗要大于基模<sup>[7]</sup>,所以激发出来的高阶模会逐渐地被剥离出纤芯。而弯曲半径经历渐变时,激发出来的高阶模的比例大大减小。也就是说光场由直光纤传播到弯光纤,弯曲半径经历突变时的损耗要大于渐变时的损耗。

而剩余的畸变基模由弯曲光纤传播到直光纤,当有效弯曲光纤由很小值突然过渡到极大值时,光场在直光纤中激发的基模比例并不高,高阶模的比例却较高,也就是会恶化输出光的光束质量。而当有效弯曲光纤由很小值逐渐过渡到极大值时,光场在直光纤中激发的基模比例很高,可以使其输出光的光束质量接近衍射极限,如图4(a),(b)所示。

可以得到第 $j$ 阶模式的模式功率

$$P_j(z) = a_j(z)a_j^*(z) = |a_j(z)|^2. \quad (7)$$

根据前面的理论分析,计算了基模由直光纤传播到弯曲光纤后其模式的功率分布变化,图3(a)~(c)为有效弯曲半径由极大值突然过渡到2.4,5.4和7.4 cm时,光场沿传播方向的演变情况。图3(d)为弯曲半径由极大值逐渐地过渡到5.4 cm时,光场沿传播方向的演变情况。

图4(c),(d)显示,有效弯曲光纤由很小值经历突变过渡到直光纤的极大值,有效弯曲半径要大于20 cm时,弯曲光纤中的畸变基模在直光纤中激发的高阶模可以忽略,但当有效弯曲光纤由很小值经历渐变过渡到直光纤的极大值时,这个值约为3 cm。这个有效弯曲半径的大小对采用弯曲选模来提高光纤激光器的光束质量是可行的。

根据图3和图4计算结果,可以看出当光纤由直光纤突然过渡到弯曲半径或者弯曲光纤过渡到直光纤,都会激发出高阶模,而光纤由直光纤逐渐过渡到弯光纤或弯光纤过渡到直光纤时,激发的高阶模比例明显降低了。产生这种结果的原因是弯曲光纤内的模场与直光纤内的模场不匹配,根据图2中不同弯曲半径时的模场分布可以看出,当有效弯曲半径为

60.4 cm时,其模场分布基本没有畸变,近似为直光纤的基模模场,而当有效弯曲半径为1.4 cm时,其基模分布已经与直光纤的基模分布大不相同,其分布类似于第一个高阶模的一侧,所以由于模式匹配当光纤经历突变时入射的基模会同时激发出部分高阶模。而当弯曲半径相差很小时,其本征基模分布基本相同,

所以当光纤由直逐渐变化到弯时或由弯光纤逐渐变换到直光纤时,在变换的过程中,由于相邻的光纤其本征基模分布近似相同,最初的基模场绝大部分都耦合到下一段弯曲光纤中的本征基模场中,如此一步步耦合,最后光纤输出的模场基本是此段光纤的本征基模分布,其激发的高阶模的比例很小。

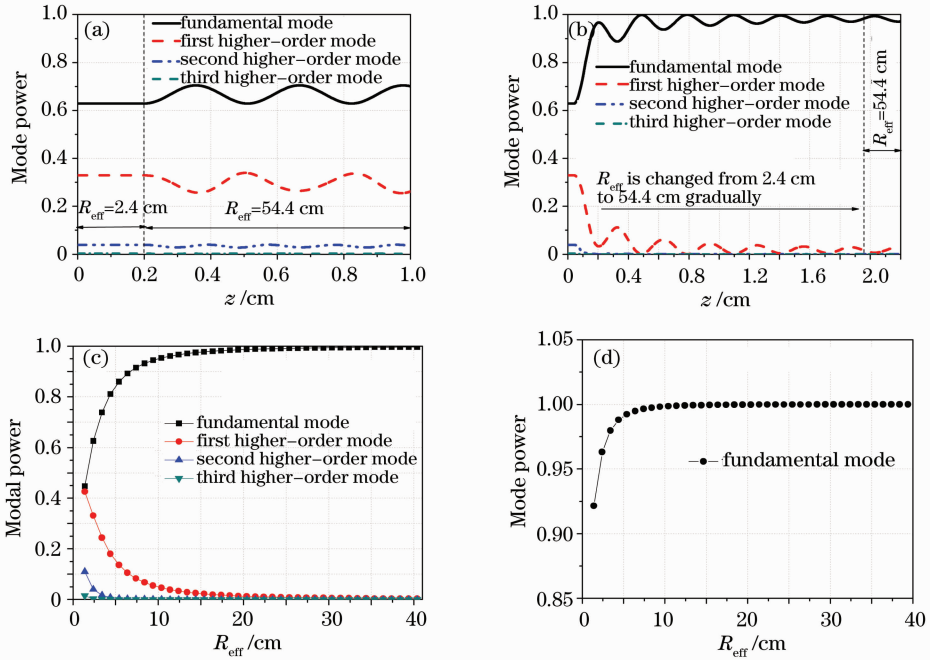


图 4  $R_{eff}$  由 2.4 cm(a)突然过渡到,(b)逐渐过渡到 54.4 cm,模式的功率分布沿光纤传播方向  $z$  的变化,弯曲光纤中的  $R_{eff}$  突然过渡到,(d)逐渐过渡到直光纤的极大值,不同的  $R_{eff}$  情况下所激发出的基模模式功率

Fig. 4 Mode power evolution along fiber for the several lower order modes when distorted fundamental mode propagates from bend fiber to straight fiber with  $R_{eff}$  changing from 2.4 cm to 54.4 cm (a) suddenly, (b) gradually and several modes power after mode coupling as a function of  $R_{eff}$  when distorted fundamental mode propagates from bend fiber to straight fiber with  $R_{eff}$  changing to infinity (c) suddenly, (d) gradually

## 4 结 论

光纤的缠绕方式对模式的激发是有影响的。光纤由直光纤过渡到弯光纤,当有效弯曲半径经历突变的情况下,由于模式不匹配,直光纤的基模在弯曲光纤中激发出的高阶模的比例要大于有效弯曲半径经历渐变的情况。由弯曲光纤过渡到直光纤,当有效弯曲半径经历突变的情况下,弯光纤里的畸变基模同样在直光纤中激发出的基模的比例要小于有效弯曲半径经历渐变的情况。数值计算结果显示,对于有效弯曲半径经历突变的情况,这个最小有效弯曲半径需大于 20 cm 时,畸变基模激发的高阶模才可以忽略。而有效弯曲半径经历渐变的情况,当最小有效弯曲半径大于 3 cm 时,畸变基模所激发出的高阶模就可以忽略,这个有效弯曲半径对于弯曲选模方式是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 Mathieu Devautour, Philippe Roy, Sébastien Février. 3D modeling of modal competition in fiber laser: application to HOM suppression in multi-layered fiber[C]. CLEO, 2009, JWA54
- 2 J. P. Kopolow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 442~444
- 3 Ross T. Schermer. Mode scalability in bent optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24):15674~15701
- 4 A. B. Sharma, A. -H. Al-Ani. Constant-curvature loss in monomode fibers: an experimental investigation[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3297~3301
- 5 R. Scarmozzino, A. Gopinath, R. Pregla *et al.*. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2000, **6**(1): 150~162
- 6 Francois Gonthier, Alain H6nault. Mode coupling in nonuniform fibers: comparison between coupled-mode theory and finite-difference beam-propagation method simulations [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2): 416~421
- 7 Ross T. Schermer, J. H. Cole. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 2007, **43**(10): 899~909