

光纤参数对弱导阶跃光纤线偏振模式特性的影响

李松柏¹ 杨敏¹ 陈建国² 傅玉青²

(¹ 长江师范学院物理学与电子工程学院, 重庆 408100; ² 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 利用标量解法, 导出了弱导阶跃光纤线偏振模(LP_m)的场分布和 LP_m 混合模式的光强表达式。结果表明, 低阶 LP_m 模的模场范围均随纤芯半径的增加而增大, 随纤芯折射率的增加而缩小, 随包层折射率的增加而扩大; 随传输距离和模式混合份额的增加, LP_m 混合模式的光强减少; 非相干混合模的 M^2 因子随高阶模式光强所占份额的增加而逐渐变大, M^2 并非一直随纤芯半径的增加而增大, 存在着一个临界值 $a=30 \mu\text{m}$ 。

关键词 导波光学; 标量法; 线偏振模; 模式特性; 阶跃光纤

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.110604

Influences of Optical Fiber Parameter on Mode Characteristic of Linear Polarization in Step-Index of Weakly Guiding

Li Songbai¹ Yang Min¹ Chen Jianguo² Fu Yuqing²

(¹ School of Physics and Electronics Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China
² College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Using the scalar method, the field distribution of the linear polarization in a step-index of weakly guiding and the hegeneral expression of the mixed modes are derived. The results show that, the mode field ranges of the lowed LP_m increases with the fiber core radius and the coating layer index. The mode field ranges of the lowest order LP_m modes reduces with the increase of the fiber core index. The optical strength of the mixed modes reduces with the increase of the transmission distance and the proportion of mixed modes. The M^2 factor of the uncoherent mixed modes increases gradually with the increase of the proportion of the highest order LP_m modes. Howerer, the increase of M^2 factor approaches a critical value when the fiber core radius is $a=30 \mu\text{m}$.

Key words guided optics; scalar method; linear polarization; mode characteristic; step-index fiber

OCIS codes 060.2310; 140.3570; 140.3510

1 引言

近几年, 光纤激光器的发展非常迅速, 输出功率达到千瓦量级^[1,2], 其与传统固体激光器相比具有效率高、光束质量好和散热结构简单等独特优势^[3~6], 而阶跃折射率光纤(SIF)的模式及光束质量更是受到人们的广泛关注^[7~10]。从1961年 Snitzer^[8]开创性地提出光纤波导模式的精确描述, 到1971年 Gloge^[10]在弱导条件下简化光纤模式的描述, 已形成比较完整的理论体系^[11~17]。光纤模式场分为矢量法描述的横电(TE)模、横磁(TM)模和混合(HE和EH)模和标量法描述的线偏振(LP)模, 其标量法描述下的模式场本征函数表示为整数阶贝塞尔(Bessel)函数和虚宗量汉克尔(Hankel)函数形式。但是, 光纤激光器是一种波导谐振腔, 使得光纤激光器和传统的固体激光器相比, 在激光模式的分布和传输特性上具有明显的差异。本文利用标量解法, 导出了 LP_m 的场分布和 LP_m 混合模式的光强表达式, 讨论了光纤参数对弱导阶跃光纤中线偏振模的模式分布特性及传输特性的影响。

2 理论分析

阶跃折射率光纤由介质芯子和折射率稍低的介质包层构成。图1为此光纤的折射率分布^[16]。图1中, 光

收稿日期: 2011-03-30; **收到修改稿日期:** 2011-07-08; **网络出版日期:** 2011-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60578013)和重庆市教委科技项目(KJ091307)资助课题。

作者简介: 李松柏(1964—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事半导体激光器与光通信等方面的研究。E-mail: lsbftc@163.com

纤的纤芯半径为 a , 包层半径为 b , 涂敷层半径为 c , 纤芯的折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 , 涂敷层的折射率为 n_3 , 纤芯和包层的折射率是均匀分布的。当 $n_1 > n_2$ 时, 在两介质分界面上满足全反射条件, 就可将光束绝大部分能量限制在光纤纤芯中传播。

在弱导条件下, 光纤的模式特征采用标量法^[10]描述为线偏振模(Linear Polarization mode), 简称 LP 模, 纤芯层场分布由贝塞尔函数 $J_m(x)$ 描述, 包层场分布由虚宗量汉克尔函数 $K_m(x)$ 描述。根据标量法^[16,17], 对于弱导阶跃光纤的 LP_{mn} 模, 其电磁场分量满足标准贝塞尔方程

$$\begin{cases} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + (k^2 n_1^2 - \beta_{mn}^2 - \frac{1}{r^2} m^2) R(r) = 0, & r \leq a \\ \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + (\beta_{mn}^2 - k^2 n_2^2 - \frac{1}{r^2} m^2) R(r) = 0, & r \geq a \end{cases} \quad (1)$$

式中 R 为电磁场分量, r 为径向坐标, k 为自由空间中的波数, β_{mn} 为与阶数 mn 有关的传播常量。

考虑 y 方向偏振的电磁波, 由(1)式结合边界条件可求得导波模式在纤芯内以及包层的场分布, 其中在纤芯中的电磁场分量为

$$E_y = \frac{A}{J_m(U_{mn})} J_m(U_{mn} \frac{r}{a}) \cos(m\theta) \exp(-j\beta_{mn} z), \quad (2)$$

$$H_x = \frac{\omega\mu_0}{\beta_{mn}} \frac{A}{J_m(U_{mn})} J_m(U_{mn} \frac{r}{a}) \cos(m\theta) \exp(-j\beta_{mn} z). \quad (3)$$

在包层中的电磁场分量为

$$E_y = \frac{A}{K_m(W_{mn})} K_m(W_{mn} \frac{r}{a}) \cos(m\theta) \exp(-j\beta_{mn} z), \quad (4)$$

$$H_y = \frac{\omega\mu_0}{\beta_{mn}} \frac{A}{K_m(W_{mn})} K_m(W_{mn} \frac{r}{a}) \cos(m\theta) \exp(-j\beta_{mn} z). \quad (5)$$

(2)~(4)式中 J_m 为第一类 m 阶贝塞尔函数, K_m 为第二类修正的 m 阶贝塞尔函数, n 表示相应的贝塞尔函数 J_m, K_m 的第 n 个零点; ω 表示角频率, μ_0 为真空中的导磁率; $U_{mn} = (k_1^2 - \beta_{mn}^2)^{1/2} a$ 为纤芯区域中归一化横向传播常量, $k_1 = n_1 k$ 为纤芯区域中的波数; $W_{mn} = (\beta_{mn}^2 - k_2^2)^{1/2} a$ 为包层区域中归一化横向传播常量, $k_2 = n_2 k$ 为包层区域中的波数。

在光纤激光器中, LP_{mn} 模的叠加方式有两种, 一种是相干叠加, 另一种是非相干叠加。当相干激光注入多模光纤并传输时, 在光纤中可以激发出多个较低阶模; 它们在光纤中传输时, 各模式是相干叠加的, 并在自由空间中传输。叠加后的相干混合模的场分布可以表示为

$$E(r) = \sqrt{1-\alpha} E_{01}(r) + \sqrt{\alpha} \exp(i\varphi) E_{nm}(r), \quad (6)$$

式中 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 为较高阶模所占的份额, φ 表示两模式相干叠加时两者间的相位差。相干混合模的光强分布可以表示为

$$I = E * E^* = (1-\alpha) I_{01} + \alpha I_{nm} + 2\sqrt{\alpha(1-\alpha)} I_{01} I_{nm} \cos\varphi, \quad (7)$$

式中 E^* 为 E 的共轭。对于非相干叠加, (7) 式中的 $\varphi = (2k+1)\pi/2 (k=0, 1, 2, 3, \dots)$, 则非相干混合模的光强分布可以表示为

$$I = (1-\alpha) I_{01} + \alpha I_{nm}. \quad (8)$$

3 结果与分析

采用标量模解析方法对弱导阶跃光纤的低阶模式进行了计算仿真分析。基本数据为: 阶跃光纤外包层半径 $a=20 \mu\text{m}$, 光纤内包层半径 $b=200 \mu\text{m}$, 信号光波长 $\lambda=1 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1=1.454$, 包层折射率 $n_2=1.453$ 。

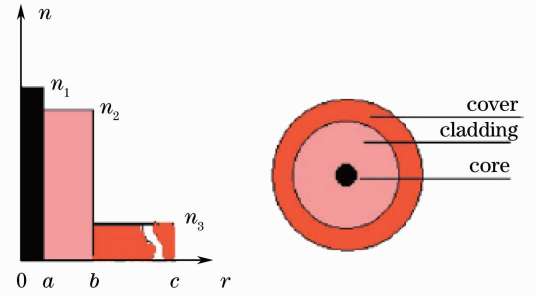


图1 阶跃折射率光纤的折射率分布

Fig. 1 Refractive index distribution of the step-index fiber

3.1 单一模式的特性

3.1.1 单一低阶模式的光强分布

不同纤芯半径 a 、纤层折射率 n_1 和包层折射率 n_2 条件下 LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} 模的分布、光束质量因子如图 2~4 所示。

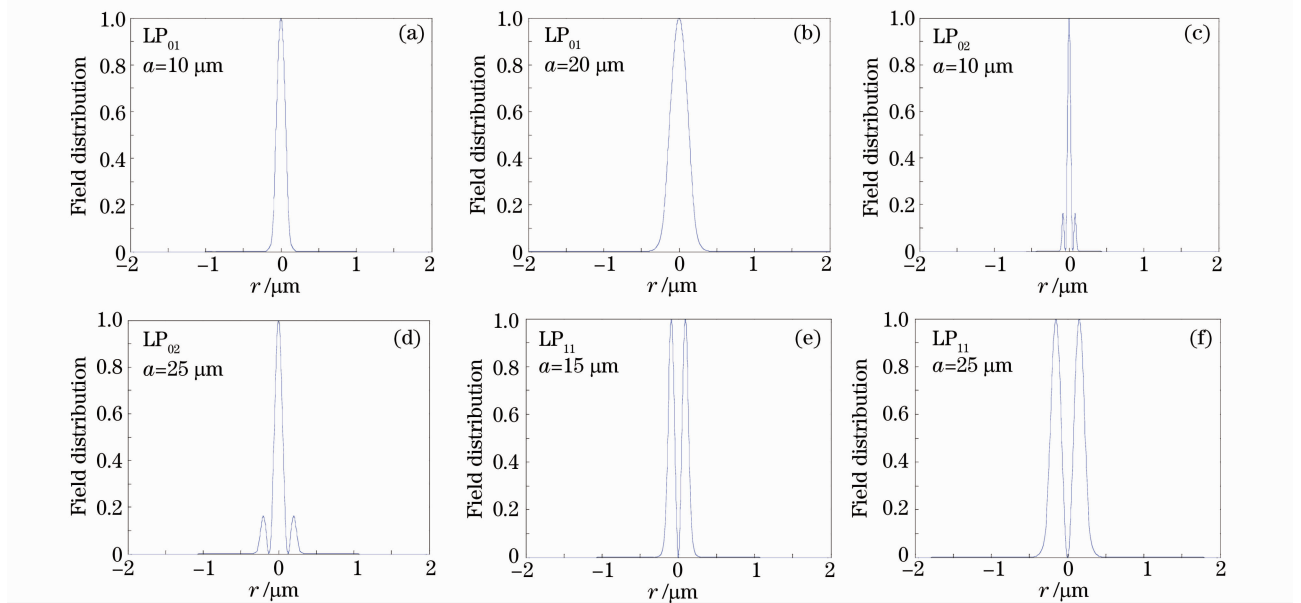


图 2 不同纤芯半径下单一模式的归一化光强分布

Fig. 2 Field distribution of the sole modes with varied fiber core radiuses

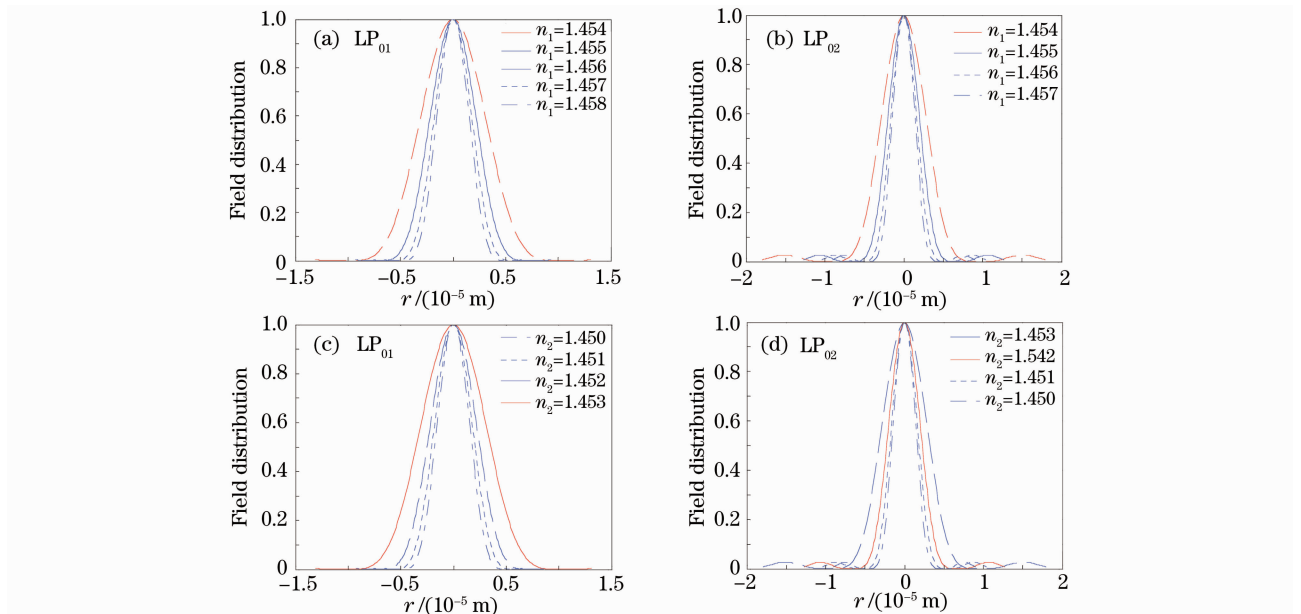


图 3 不同折射率单一模式的归一化光强分布

Fig. 3 Field distribution of the sole modes with varied fiber core and cladding index

图 2 给出了低阶模式的归一化光强随纤芯半径变化的曲线。从图 2 中可以看出,当纤芯半径逐渐增加时, LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} 模的模场范围均随纤芯半径的增加而增大。从图中还可以看出,基模 LP_{01} 的光强分布为单峰结构,无边模现象,正是光通信中需要传输的模式; LP_{02} 的光强分布存在边模现象, LP_{01} 、 LP_{02} 的光强最大值出现在传输距离为 0 处; LP_{11} 模的光强分布出现了两个峰值,并且光强最小值出现在传输距离为 0 处,说明在光纤传输中 LP_{01} 、 LP_{02} 为同相模, LP_{11} 模为异相模。在相同条件下, LP_{01} 比 LP_{02} 和 LP_{11} 模的模场范围宽,也没有模式色散,这说明基模在光纤中传输时能量衰减较慢,适用于长距离大容量的通信系统。

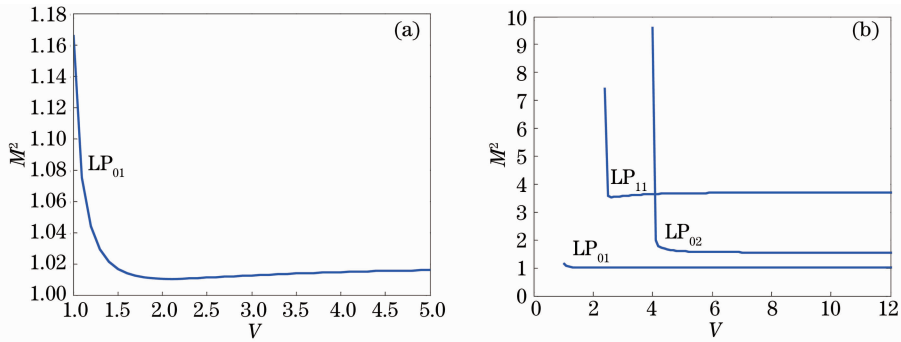
图4 低阶 LP_m 模的 M^2 随 V 的变化曲线Fig. 4 M^2 versus V for lower-order LP_m modes

图3给出了低阶模式的归一化光强随纤芯及包层折射率变化的曲线。从图3中可以看出,当纤芯折射率逐渐增加时, LP_{01} 、 LP_{02} 模的模场范围均随纤芯折射率的增加而缩小。当包层折射率逐渐增加时, LP_{01} 、 LP_{02} 模的模场范围均随包层折射率的增加而扩大。

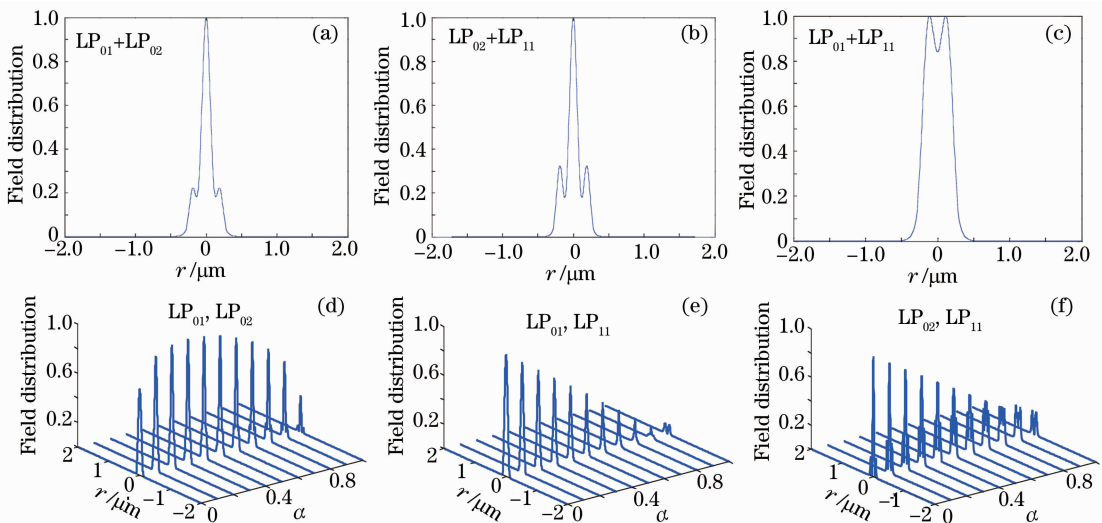
3.1.2 单一低阶模式的 M^2 因子

纤芯半径由公式 $a = V / (2\pi/\lambda \sqrt{n_1^2 - n_2^2})$ 求得,它随归一化频率 V 的不同而不同。低阶 LP_m 模的 M^2 因子随归一化频率 V 的变化曲线如图4所示。由图4可以看出,对于低阶 LP_m 模,在 V 接近于各个模的截止频率时,模式的 M^2 因子有一个峰值;且 M^2 因子随着 V 的增大而趋近于一定值,基模 LP_{01} 的 M^2 因子接近1.02, LP_{02} 的 M^2 因子接近1.5, LP_{11} 的 M^2 因子接近3.8,这说明基模 LP_{01} 的光束质量较好。

3.2 混合模式的特性

3.2.1 相干混合模式的光强分布

图5(a)~(c)给出了相干混合模式的光强随传输距离的变化曲线,图5(d)~(e)给出了相干混合模式的光强随传输距离和 LP_{11} 模与 LP_{01} 、 LP_{02} 混合份额的变化曲线。从图(a)~(c)中可以看出,当 LP_{01} 与 LP_{02} 、 LP_{11} 相干混合后,光强分布发生了畸变,出现了边模和烧孔现象;从图(d)~(e)中可以看出,随着传输距离和模式混合的份额的增加,混合模式的光强减少;当混合模式在光纤中传输一定距离后,光强迅速降低到0。

图5 相干混合模式的归一化光强分布($\varphi=\pi$)Fig. 5 Field distribution of the coherent mixed modes ($\varphi=\pi$)

3.2.2 非相干混合模式的光强分布

图6给出了非相干混合模式的光强随传输距离和 LP_{11} 模与 LP_{01} 、 LP_{02} 混合份额的变化曲线。从图中可以看出,随着传输距离和模式混合份额的增加,混合模式的光强减少,其中 LP_{01} 与 LP_{11} 混合时光强下降得最快;当混合模式在光纤中传输一定距离后,光强迅速降低到0。

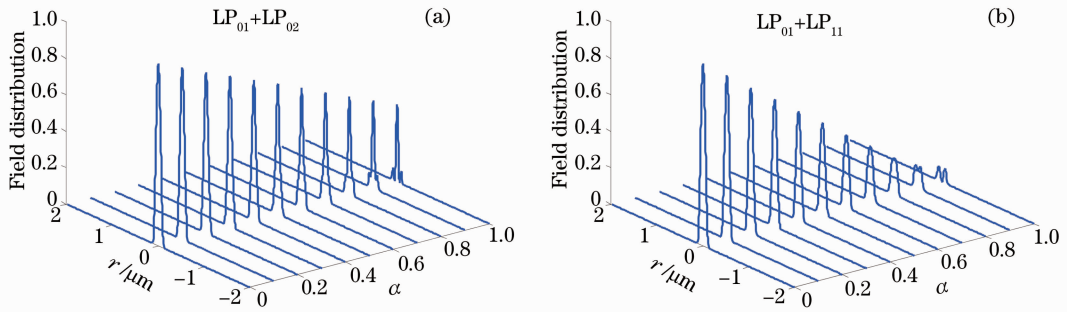
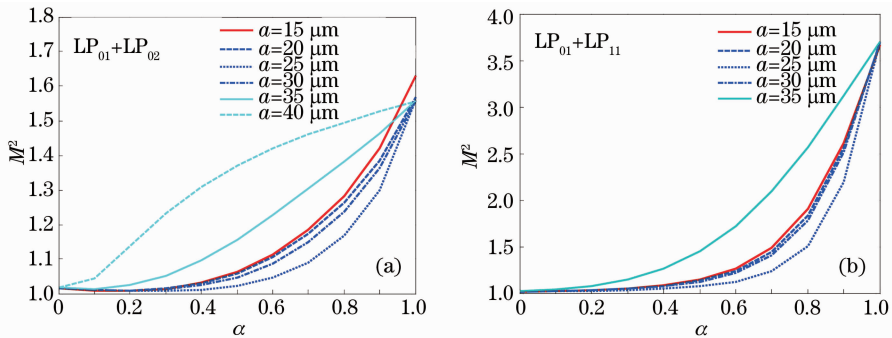


图6 非相干混合模式的归一化光强分布

Fig. 6 Field distribution of the uncoherent mixed modes

3.2.3 混合模式的 M^2 因子

图7给出了不同纤芯半径下非相干混合模式的 M^2 随 α 的变化曲线。由图中可以看出,对于 LP_{01} 与 LP_{11} 模叠加的情况, M^2 因子随高阶模式光强所占分量的增加而逐渐变大,说明非相干混合模的光束质量变差了。而对于 LP_{01} 模与 LP_{02} 模叠加的情况,在 α 取值为 $0 \sim 1$ 的范围内, M^2 因子均小于 LP_{01} 模与 LP_{11} 模叠加的情况,这说明参与叠加的 LP_{mm} 模的光束质量越好,叠加后的光束质量也会越好。从图中还可以看出,当 a 为 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模与 LP_{02} 、 LP_{11} 模叠加的 M^2 随纤芯半径的增加而减少;当 $a > 30 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模与 LP_{02} 、 LP_{11} 模叠加的 M^2 随纤芯半径的增加而增大;这说明纤芯半径不能做得太小,否则会影响激光在光纤中传输的光束质量。

图7 非相干混合模式的 M^2 因子随 α 的变化Fig. 7 Beam quality factor M^2 of the uncoherent mixed modes with versus α

4 结 论

从阶跃光纤波动理论的标量法解的场方程出发,导出了线偏振模 LP_{mm} 的电磁场分布和 LP_{mm} 混合模式的光强表达式。通过数值模拟分析,得出以下结论:1) LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} 模的模场范围均随纤芯半径的增加而增大;2) LP_{01} 、 LP_{02} 模的模场范围均随纤芯折射率的增加而缩小;3) LP_{01} 、 LP_{02} 模的模场范围均随包层折射率的增加而扩大;4) 随着传输距离和模式混合份额的增加, LP_{mm} 混合模式的光强减少;5) 当 V 接近模式的截止频率时,相应的 M^2 因子有一个峰值,随着 V 的逐渐增大, M^2 因子随着 V 的增大而趋近于一定值;6) 非相干混合模的 M^2 因子随着高阶模式光强所占份额的增加而逐渐变大,说明非相干混合模的光束质量变差了;同时, M^2 并非随纤芯半径的增加而增大,存在着一个临界值,这说明纤芯半径不能做得太小,否则会影响激光在光纤中传输的光束质量。

参 考 文 献

- 1 J. Nilsson, Y. Jeong, C. Alegria *et al.*. Beyond 1 kW with fiber lasers and amplifiers [C]. Optical Fiber Communications Conference, 2003, **2**: 685~686
- 2 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo *et al.*. Recent progress of large core fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9):

2235~2241

楼祺洪, 周 军, 张海波 等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2235~22413 Hhiko Yoda, Pavel Polynkin, Masud Mansuripur. Beam quality factor of higher order modes in a step index fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1350~13554 Fu Yuqing, Duan Zhichun, Chen Jianguo. Analysis of signal in multimode fiber amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(7): 1453~1456傅玉青, 段志春, 陈建国. 多模光纤放大器输出光分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(7): 1453~14565 Wang Wei, He Bing, Zhou Jun *et al.*. Study on far-field intensity distribution of fiber laser used in coherent beam combination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2248~2255王 炜, 何 兵, 周 军 等. 光纤激光相干阵列远场光强分布的影响分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2248~22556 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280周 朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 276~2807 Jia Weiguo, Zhou Yanyong, Ying Chun *et al.*. Modulation instability of near frequency propagation regime in step-wise decreasing fibers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(3): 276~280贾维国, 周彦勇, 迎 春 等. 阶跃光纤中相近频率传输区域的调制不稳定性[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(3): 276~2808 E. Snitzer. Cylindrical dielectric waveguide modes[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(5): 491~4989 Pierre André Bélanger. Beam quality factor of the LP₀₁ mode of the step index fiber[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(9): 2107~210910 D. Gloge. Weakly guiding fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2252~225811 Zhang Jinzhong. A ray model for the propagation of light in a step fiber[J]. *College Physics*, 2009, **28**(3): 22~23张金钟. 阶跃光纤导光的一种射线模型[J]. 大学物理, 2009, **28**(3): 22~2312 Yu Tian, Chen Chuan. Cut-off frequencies and the permittivity ratio of propagation modes in parabolic weakly-graded optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1302~1306余 恬, 陈 川. 弱渐变抛物型光纤传导模式的截止频率与介电比[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1302~130613 Liao Suying, Gong Mali, Zhang Haitao. Selection of doping radius for part-doped fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2836~2841廖素英, 巩马理, 张海涛. 部分掺杂光纤掺杂半径的选择[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2836~284114 Liao Suying. Analysis of mode scalability in large mode area fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 120602廖素英. 大模场光纤模场大小提升能力分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(12): 120602

15 Wu Chongqing. Optical Waveguide Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 40~46

吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 40~46

16 Li Ling, Huang Yongqing. Fiber Communication Foundation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 43~62

李 玲, 黄永清. 光纤通信基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 43~62

17 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 20~33

廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 20~33