

激光与光电子学进展

阶跃光纤混合模的聚焦特性分析

韩越^{1,2}, 王挺峰^{1*}, 巩盾¹, 车东博^{1,2}, 王铭^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在激光加工等领域常利用光纤激光的聚焦以获得高功率密度的光斑。为了分析阶跃光纤混合模的聚焦特性, 基于广义惠更斯-菲涅耳衍射公式, 数值计算了阶跃光纤中基模(LP₀₁)与高阶线偏振模在非相干叠加和相干叠加两种情况下的聚焦光强分布。仿真分析了混合模相对于单一 LP₀₁ 模式的聚焦特性, 研究了其聚焦光斑的平均功率密度、焦点偏移随模式占比、模式间相位差的变化规律。研究表明: 当混合模非相干叠加时, 随着基模占比的增加, 聚焦光斑功率密度随之增加且焦点偏移减小; 当混合模相干叠加时, 基模占比及模间相位差都会影响聚焦效果, 可以通过合理控制基模占比和模间相位差, 达到聚焦光斑功率密度高于基模的聚焦光斑功率密度、减小混合模焦点偏移的目的。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 混合模; 平均功率密度; 焦点偏移

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1706002

Analyzing the Focusing Properties of Mixed Modes in a Step-Index Fiber

Han Yue^{1,2}, Wang Tingfeng^{1*}, Gong Dun¹, Che Dongbo^{1,2}, Wang Ming^{1,2}¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In laser processing and other fields, the focus of a fiber laser is often used to obtain a high-power-density spot. To analyze the focusing properties of mixed modes in a step-index fiber, based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction formula, this study numerically calculates the focusing intensity distribution of the incoherent and coherent superpositions of the fundamental (LP₀₁) and high-order linear polarization modes in a step-index fiber. The focusing properties of the mixed modes relative to the single LP₀₁ mode are simulated and analyzed, and the change law of the average power density of the focused spot and focus shift is studied with the changing mode ratio and intermode phase difference. When the mixed modes are incoherently superimposed, with the increase in the fundamental mode ratio, the power density of the focused spot increases and the focus shift decreases. Moreover, when the mixed modes are coherently superimposed, the fundamental mode ratio and intermode phase difference affect the focusing effect. Therefore, we can achieve the purpose of focusing the spot power density higher than that of the fundamental mode and reducing the focus shift of the mixed modes by reasonably controlling the fundamental mode ratio and intermode phase difference.

Key words fiber optics; fiber laser; mixed modes; average power density; focus shift

1 引言

高功率光纤激光器已被广泛应用于激光打标、激光切割及军事国防安全等领域, 但是功率的进一步提升受限于光纤中的非线性效应, 如受激拉曼散射和受激布里渊散射^[1-2]。研究工作者通常采用增大纤芯半径的方法来减小非线性效应的影响, 但这种方法会导

致多种高阶模式的产生^[3-6]。2006年, Yoda等^[1]研究了阶跃光纤中线偏振模的 M^2 因子随光纤归一化频率的变化, 并且分析了两种典型的模式相干叠加情况。结果表明, 当阶跃光纤的归一化频率接近截止频率时, 其对应的 M^2 因子有一个最大值。在相干叠加的情况下, 高阶模的存在导致光束质量变差。2015年, 国防科技大学的Tao等^[7]研究了光纤激光中LP₀₁模和LP₁₁模叠

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61805234)

通信作者: *wtfeng@sina.com

加的传播。其分析结果表明,传播距离为 5 km 时高阶模(HOM)占比小于 50%,对应的桶中功率超过 80%。与没有 HOM 的激光束相比,具有 HOM 的激光束受到湍流的影响较小,并且可以减少平均强度波动。上述学者研究了两种模式叠加的 M^2 因子及远距离传播的桶中功率。但是光纤中存在多种模式,对两种模式叠加的研究不能代表混合模所具有的一般性质,并且模式之间的叠加也存在不同形式^[8-9]。通常使用的多横模振荡的光纤激光器中的模式是非相干叠加的,而相干光入射到光纤放大器后输出激光中的模式是相干叠加的。在激光加工中,光束的聚焦特性如平均功率密度及焦点偏移是影响加工效率的主要因素^[10-11]。因此,本文以两种模式和三种模式在非相干叠加和相干叠加情况下的混合模为例,将平均功率密度和焦点偏移作为评价标准,研究模式占比及模间相位差对混合模聚焦特性的影响。

2 理论分析

对于阶跃光纤,在弱导近似下,英国学者 Gloge 提

出了线偏振模简化解,即由贝塞尔函数和余弦函数表示 LP_{mn} 模式。 LP_{mn} 模光场分布的解析表达式^[12]为

$$E_{mn} = A \exp(i\beta z) \cos(m\theta) \begin{cases} \frac{J_m\left(\frac{U_{mn}}{a}r\right)}{J_m(U_{mn})}, 0 \leq r \leq a \\ \frac{K_m\left(\frac{W_{mn}}{a}r\right)}{K_m(W_{mn})}, r \geq a \end{cases}, \quad (1)$$

式中:在以圆柱形光纤中心轴为 z 轴的圆柱坐标系下, A 为入射光场的振幅, β 为传播矢量 \mathbf{k} 在 z 方向上的分量; m 和 n 为模式的阶数; r 为径向坐标; U_{mn} 为纤芯区域的归一化横向传播常数; W_{mn} 为包层区域的归一化衰减传播常数; a 为纤芯半径。

利用菲涅耳衍射公式求出入瞳面的光场分布,使孔径函数和系统像差调制入瞳光场,利用广义惠更斯-菲涅耳衍射公式求得出射光场,从而得到激光经过实际光学系统的聚焦光场分布,简化后的系统模型如图 1 所示。光纤激光的聚焦光场分布的表达式^[13-14]为

$$E_{out}(r, \theta, z) = -\frac{i \exp(ikL)}{\lambda B'} \iint_{S_1} P(r_i, \theta_i) \times E_{in}(r_i, \theta_i, 0) \times \exp\left[2iW\left(\frac{r_i}{\Gamma_i}, \theta_i\right)\right] \times \exp\left\{\frac{ik}{2B'}[A'r_i^2 + D'r^2 - 2r_i r \cos(\theta_i - \theta)]\right\} r_i dr_i d\theta_i, \quad (2)$$

式中: r_i 和 θ_i 是入瞳面的坐标; r 和 θ 是观察面的坐标; A' 、 B' 、 D' 为入瞳面到观察面的矩阵元; E_{in} 为入瞳面的光场分布; E_{out} 为聚焦光场分布; L 为沿轴上的光程;

$P(r_i, \theta_i)$ 为孔径函数; $W\left(\frac{r_i}{\Gamma_i}, \theta_i\right)$ 为系统波像差, $\frac{r_i}{\Gamma_i}$ 为坐标的归一化。

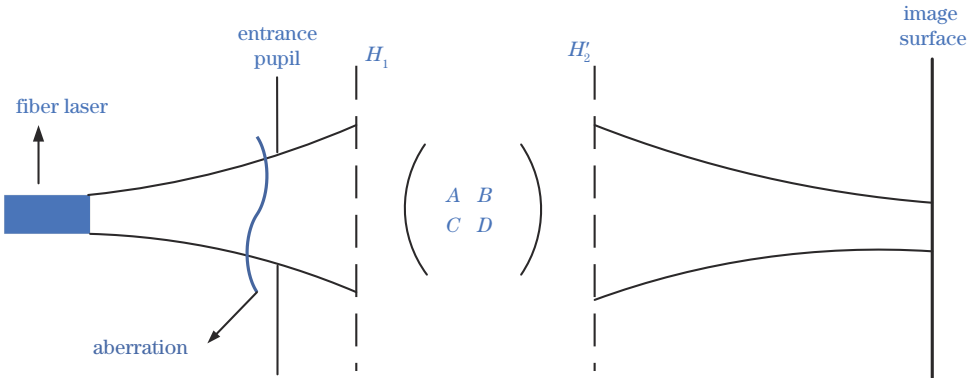


图 1 光纤激光经过聚焦系统的简化模型

Fig. 1 Simplified model of fiber laser passing through focusing system

利用二阶矩法研究光纤激光的聚集特性^[15]。将光束宽度最小值对应的位置作为实际焦点,计算得到混合模聚焦后的平均功率密度和焦点偏移。二阶强度矩的表达式为

$$w_x^2 = \frac{4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dx dy}, \quad (3)$$

式中: I 为光强分布; \bar{x} 为一阶强度矩; w_x 为 x 方向光束半宽度。

在光纤激光器中,如果多个 LP_{mn} 模同时振荡,则这些模式通常不相干。 LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式非相干叠加的光强分布表达式^[12]为

$$I = \alpha I_{01} + (1 - \alpha) I_{11}, \quad (4)$$

式中: α 为基模的功率占比; I_{01} 为 LP_{01} 模的光强; I_{11} 为

高阶模的光强。

当一束相干光入射到多模光纤或光纤放大器中时,入射光会激发出几种高阶模式。此外,光纤受外界条件扰动,如弯曲、应力等,模式之间可能会发生能量传递。输出光的形式为不同模式的相干叠加^[16-18]。此时,光场的表达式为

$$E = \sqrt{\alpha} E_{01} + \sqrt{1 - \alpha} \exp(i\psi) E_{mn}, \quad (5)$$

式中: ψ 为两种模式之间的相位差; E_{01} 为LP₀₁模光场分布; E_{mn} 为高阶模的光场分布。

3 数值计算与分析

数值计算中使用的参数如下:光纤纤芯半径为15 μm,数值孔径为0.055,波长为1.08 μm。激光聚焦系统的孔径光阑与入瞳重合,入瞳直径为150 mm,根据系统中透镜的曲率半径和间隔,可以得到聚焦系统的ABCD矩阵表达式:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9963 & -18.07 \\ -0.0008 & 1.0176 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

从ZEMAX中得到Zernike系数后,将激光聚焦系统ABCD矩阵和Zernike系数代入式(2)中,得到聚焦光场分布。以高斯光束作为光源,经过本文建立的模型,计算得到聚焦后光强分布。利用二阶矩法计算聚

焦光斑尺寸,与ZEMAX的物理光学传播中获得的光斑尺寸相比,误差为0.37%。验证了本文模型的准确性。

3.1 混合模式的非相干叠加

为了分析混合模非相干叠加的基模占比对聚焦效果的影响,利用聚焦光斑的平均功率密度作为评价聚焦时能量集中度的标准。当基模占比在0~1之间取值时,分别计算了LP₀₁模、LP₁₁模两种模式,以及LP₀₁模、LP₁₁模和LP₀₂模三种模式非相干叠加情况下,功率密度和焦点偏移随基模占比的变化,如图2(a)、(b)所示。从图2可以看出,对于两种模式叠加的情况,功率密度随基模占比的增加而增大,焦点偏移随基模占比的增加而减小。三种模式叠加时功率密度和焦点偏移随基模占比变化的关系与两种模式时的变化规律一致,其区别在于三种模式叠加时的功率密度小于两种模式时的功率密度,焦点偏移大于两种模式时的焦点偏移。为了分析功率密度增加的原因,分别研究了两种模式非相干叠加情况下,基模占比为0.3、0.6、0.9时的聚焦光强分布,如图3(a)~(c)所示。随着基模占比的增加,聚焦光强分布由两峰分布逐渐演化为只有一个中间峰分布的高斯分布,聚焦光斑能量更集中,因此功率密度更高。

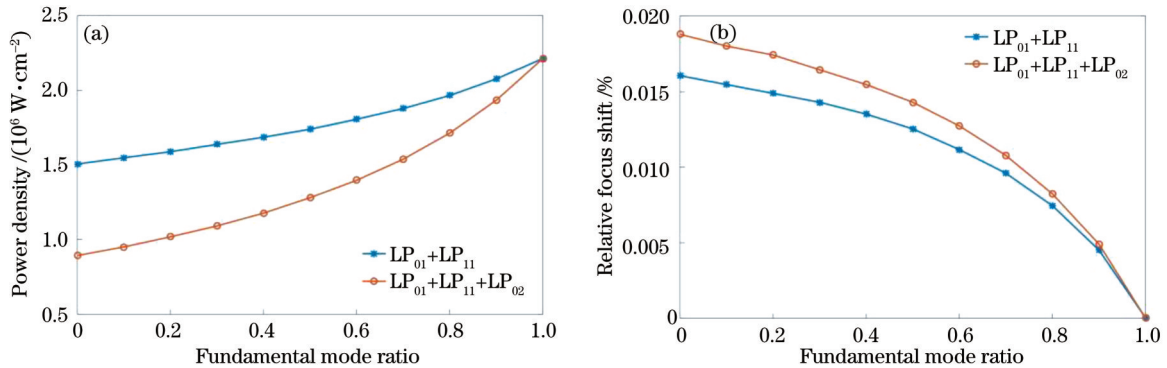


图2 混合模式非相干叠加时聚焦特性随基模占比的变化。(a)平均功率密度;(b)焦点偏移

Fig. 2 Focusing properties varying with fundamental mode ratio when mixed modes are superimposed incoherently.

(a) Average power density; (b) focus shift

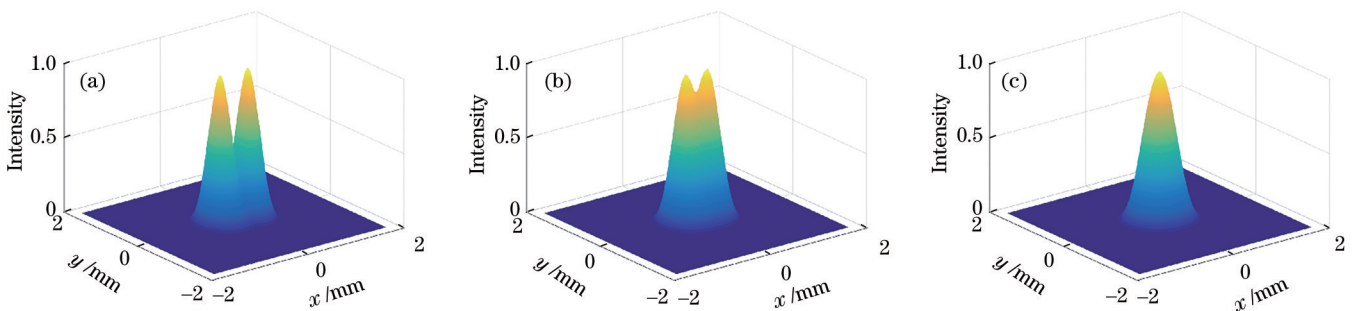


图3 不同基模占比时两种模式非相干叠加的聚焦光强分布。(a) $\alpha=0.3$; (b) $\alpha=0.6$; (c) $\alpha=0.9$

Fig. 3 Focusing intensity distributions of incoherent superposition of two modes under different fundamental mode ratios.

(a) $\alpha=0.3$; (b) $\alpha=0.6$; (c) $\alpha=0.9$

3.2 混合模式的相干叠加

当模间相位差在 $0 \sim \pi$ 之间取值时, 计算得出 LP_{01} 模和 LP_{11} 模相干叠加聚焦后的功率密度随基模占比的变化曲线, 如图 4(a) 所示。当相位差为 $\pi/6$ 和 $5\pi/6$ 时, 曲线仿真趋势相同结果近似, 因此可以只考虑相位差在 $[0, \pi/2]$ 时功率密度随基模占比的变化规律。当相位差在 $[\pi/3, \pi/2]$ 范围内时, 功率密度随基模占比增加而增大, 且仅有基模时, 功率密度最大。然而当相位差在 $[0, \pi/6]$ 范围内时, 功率密度在基模占比为 0.7 时出现了峰值。功率密

度随模间相位差变化曲线, 如图 4(b) 所示。功率密度随 LP_{01} 、 LP_{11} 模间相位差以 π 为周期变化。为了得到混合模的一般规律, 本文分析了三种模式叠加的聚焦特性, 如图 5(a)、(b) 所示。三种模式叠加时功率密度随基模占比变化的关系与两种模式时的变化规律一致, 区别在于当相位差在 $[0, \pi/2]$ 范围内时, 功率密度随基模占比的增加而增大, 且仅有基模时, 功率密度最大。当相位差在 $[2\pi/3, \pi]$ 范围内时, 功率密度出现了峰值。功率密度随 LP_{01} 、 LP_{11} 及 LP_{02} 模间相位差以 2π 为周期变化。

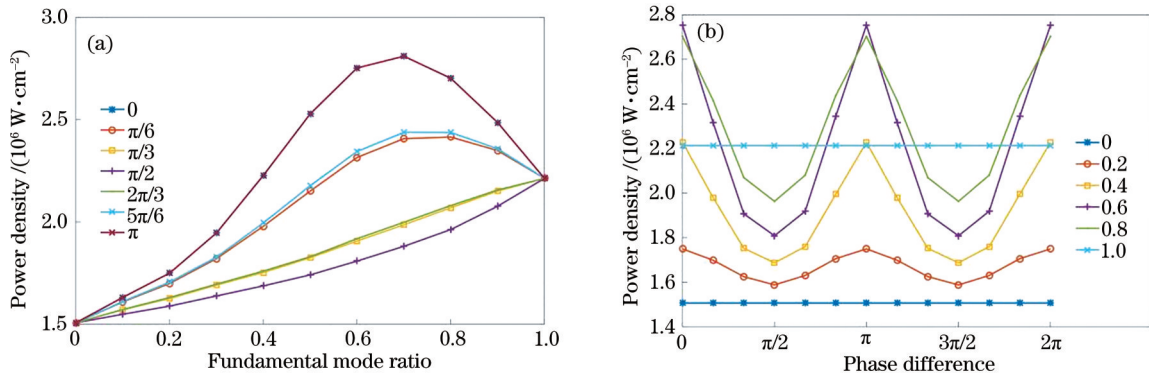


图 4 两种模式相干叠加时功率密度随基模占比及模间相位差的变化。(a) 基模占比; (b) 相位差

Fig. 4 Power density of coherent superposition of two modes varying with fundamental mode ratio and phase difference. (a) Fundamental mode ratio; (b) phase difference

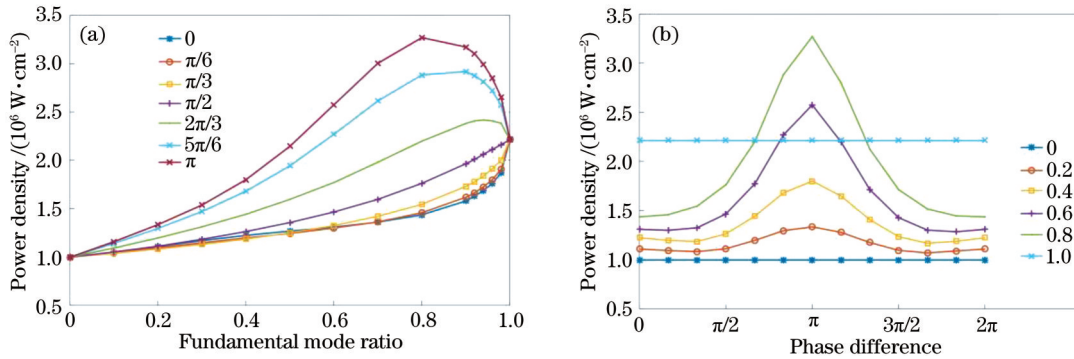


图 5 三种模式相干叠加时功率密度随基模占比及模间相位差的变化。(a) 基模占比; (b) 相位差

Fig. 5 Power density of coherent superposition of three modes varying with fundamental mode ratio and phase difference. (a) Fundamental mode ratio; (b) phase difference

为了分析功率密度出现峰值的原因, 以相位差等于 π 时的仿真结果为例, 分别研究基模占比为 0.1、0.3、0.7、1.0 时的聚焦光斑图像, 如图 6(a)~(d) 所示。两种模式叠加情况下: 当基模占比在 $0 \sim 0.4$ 范围内时, 聚焦光斑出现旁瓣, 光斑能量分散, 功率密度比基模的功率密度小; 当基模占比在 $0.5 \sim 0.9$ 范围内时, 混合模的聚焦光斑尺寸比基模的小, 光斑能量更集中, 因此混合模聚焦后的功率密度大于基模的功率密度。

当模间相位差在 $0 \sim \pi$ 之间取值时, 计算了 LP_{01} 模和 LP_{11} 模相干叠加的焦点在 x 方向和 y 方向的偏移随基模占比的变化, 如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出: 当相位差小于 $\pi/2$ 时, 焦点向 x 轴负方向移动; 当相位差

大于 $\pi/2$ 时, 焦点向 x 轴正方向移动; 当相位差等于 $\pi/2$ 时, 焦点偏移最小。经过计算, 焦点在 y 方向偏移的数量级为 10^{-5} , 数值很小可以忽略。我们又计算了 LP_{01} 模、 LP_{11} 模和 LP_{02} 模相干叠加时基模占比对焦点在 x 方向偏移的影响, 如图 7(b) 所示。当相位差小于等于 $\pi/2$ 时, 焦点向 x 轴负方向移动。合理控制模间相位差, 可以使得焦点偏移最小。

混合模的焦点除了存在 x 、 y 方向的横向偏移外, 还存在轴向偏移。当基模占比取 $0 \sim 1$ 时, LP_{01} 模和 LP_{11} 模相干叠加时模间不同相位差对轴向焦点偏移的影响, 如图 8(a) 所示。可以看出, 两种模式叠加的焦点位置随相位差变化以基模焦点为中心左右移动, 变

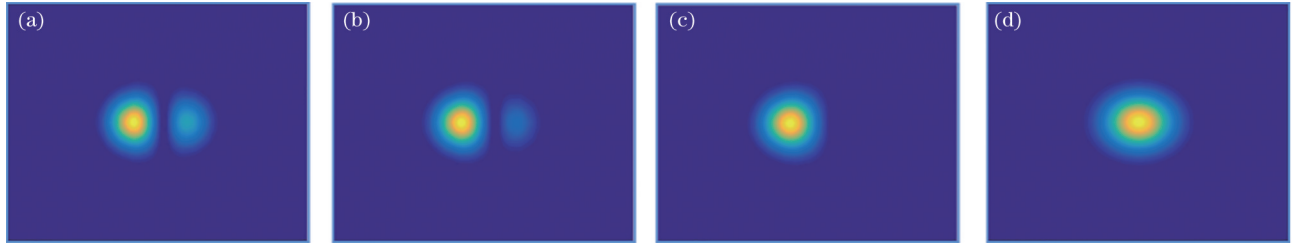


图 6 当相位差为 π 时以不同基模占比相干叠加的两种模式的聚焦光斑。(a) $\alpha=0.1$; (b) $\alpha=0.3$; (c) $\alpha=0.7$; (d) $\alpha=1.0$

Fig. 6 When the phase difference is π , the focused spot of two modes of coherent superposition with different fundamental mode ratios. (a) $\alpha=0.1$; (b) $\alpha=0.3$; (c) $\alpha=0.7$; (d) $\alpha=1.0$

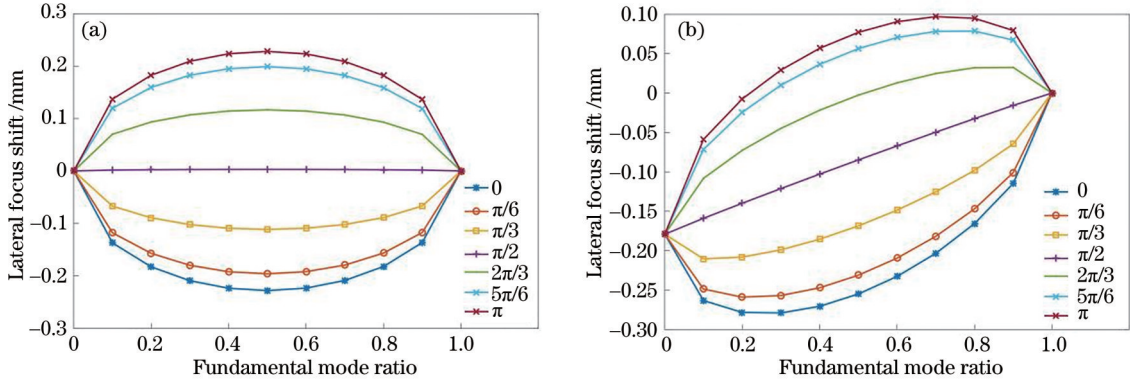


图 7 当相位差取不同值时, x 方向焦点偏移随基模占比的变化。(a) 两种模式叠加; (b) 三种模式叠加

Fig. 7 When the phase difference is different, the focus shift in x direction varying with the fundamental mode ratio. (a) Superposition of two modes; (b) superposition of three modes

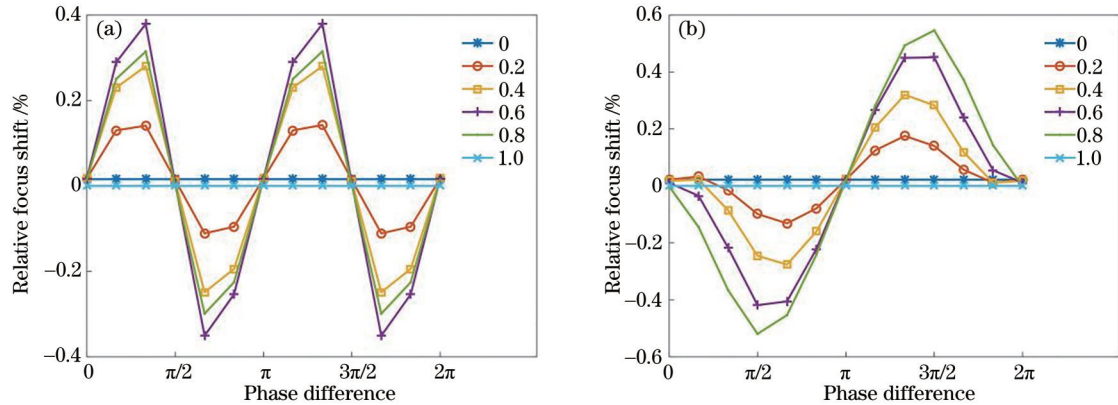


图 8 不同基模占比时, 混合模的轴向焦点偏移随相位差的变化。(a) LP_{01} 模和 LP_{11} 模; (b) LP_{01} 模、 LP_{11} 模及 LP_{02} 模

Fig. 8 When the fundamental mode ratio is different, the axial focus shift of the mixed modes varying with the phase difference. (a) LP_{01} mode and LP_{11} mode; (b) LP_{01} mode, LP_{11} mode, and LP_{02} mode

化周期为 π 。当控制相位差在 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 时, 焦点偏移最小。接下来, 计算了 LP_{01} 模、 LP_{11} 模及 LP_{02} 模三种模式相干叠加时不同相位差对焦点偏移的影响, 如图 8(b) 所示。可以看出, 三种模式叠加的焦点位置随相位差变化以基模焦点为中心左右移动, 变化周期为 2π 。控制相位差在 0 和 π 时, 焦点偏移最小。

4 结 论

根据上述仿真分析, 得出以下结论: 当混合模非相干叠加时, 聚焦光斑功率密度随着基模占比的增加而

增大, 焦点偏移随着基模占比的增加而减小; 当混合模相干叠加时, 模间相位差取不同值, 其功率密度随着基模占比的变化规律不同, 存在混合模的功率密度高于基模功率密度的情况, 并且功率密度呈周期性变化。随着模间相位差的变化, 混合模的焦点在 x 或 y 方向和 z 方向上以基模焦点为中心往两侧偏移, 并且呈周期性变化, 对于 x 或 y 方向, 当相位差小于 $\pi/2$ 时, 混合模的焦点向 x 或 y 轴反方向偏移, 对于 z 方向, 当相位差为周期一半整数倍时, 焦点偏移最小。因此, 采用相干叠加的混合模作为光源时, 合理控制基模占比及模间

相位差,可以增大聚焦光斑的功率密度,减小焦点偏移,从而提高工作效率。本文的研究结果可以为激光加工等应用领域中光源模式的选择提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Yoda H, Polynkin P, Mansuripur M. Beam quality factor of higher order modes in a step-index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(3): 1350-1355.
- [2] Limpert J, Liem A, Zellmer H, et al. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(8): 645-647.
- [3] 楼祺洪, 周军, 张海波, 等. 大芯径光纤激光器的新进展(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2235-2241.
Lou Q H, Zhou J, Zhang H B, et al. Recent progress of large core fiber lasers (invited paper)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2235-2241.
- [4] 张玉莹. 基于本征模叠加相关滤光原理的光纤激光模式分解技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
Zhang Y Y. Modal decomposition technology based on correlation filter of eigenmode superposition for optical fiber laser beam[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [5] 张念. 环形介质中激光的模式特性及传输特性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
Zhang N. Study on mode and propacteristics of laser in annular medium[D]. Suzhou: Soochow University, 2020.
- [6] Fu Y Q, Feng G Y, Zhang D Y, et al. Beam quality factor of mixed modes emerging from a multimode step-index fiber[J]. *Optik*, 2010, 121(5): 452-456.
- [7] Tao R M, Huang L, Zhou P, et al. Propagation of high-power fiber laser with high-order-mode content[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 192-199.
- [8] 付广伟, 刘畅, 王梦梅, 等. 基于表面石墨烯修饰的锥形多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906002.
Fu G W, Liu C, Wang M M, et al. Tapered multimode fiber temperature sensor based on surface graphene modification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906002.
- [9] 陆瑶, 姜宗福, 刘文广, 等. 3×1 光子灯笼实现 $30 \mu\text{m}$ 纤芯光纤激光模式控制[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1736001.
Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Laser mode control in fiber with core diameter of $30 \mu\text{m}$ based on 3×1 photonic lantern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1736001.
- [10] 刘金钊, 颜廷艳, 康绪枫, 等. 激光功率对双激光束双侧同步焊接 TC4 钛合金 T 型接头断裂性能的影响机理[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 1802007.
Liu J Z, Yan T Y, Kang X F, et al. Influence of laser power on fracture properties of TC4 titanium alloy T-joint manufactured using dual-laser-beam bilateral synchronous welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 1802007.
- [11] 朱帅杰, 张朝阳, 储松林, 等. 海量微孔水辅助法皮秒激光加工技术的研究及应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302002.
Zhu S J, Zhang Z Y, Chu S L, et al. Research and application of massive micropores water-assisted picosecond laser processing technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302002.
- [12] 冯国英, 周涛桓, 高春清. 激光模场及光束质量表征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
Feng G Y, Zhou T H, Gao C Q. Laser mode field and beam quality characterization[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [13] Collins S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1970, 60(9): 1168-1177.
- [14] 李远洋, 刘立生, 王挺峰, 等. 应用 Collins 公式和像差的 Zernike 展开分析激光光束在实际光学系统传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 857-862.
Li Y Y, Liu L S, Wang T F, et al. Analysis of laser beam propagation through optical system using Collins formula and Zernike polynomials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 857-862.
- [15] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Lü B D. Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [16] Nicholson J W, Yablon A D, Ramachandran S, et al. Spatially and spectrally resolved imaging of modal content in large-mode-area fibers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7233-7243.
- [17] Nguyen D M, Blin S, Nguyen T N, et al. Modal decomposition technique for multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): 450-456.
- [18] Sévigny B, le Cocq G, Carrero C C C, et al. Advanced S^2 imaging: application of multivariate statistical analysis to spatially and spectrally resolved datasets[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(23): 4606-4612.