

限制掺杂光纤的模场分析

李泽斌

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 限制掺杂光纤是获得大功率输出同时保持光束质量的有效途径。通过数值模拟的方法对比了限制掺杂光纤与传统阶跃光纤在模场分布及导致的光束质量的差异。模拟了输入光束偏移、倾斜等情况对限制掺杂光纤输出模场分布的影响,并分析了按一定比例混合注入多个模式时限制掺杂光纤的模场分布。

关键词 光纤光学;模式;数值仿真;限制掺杂光纤

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.s105004

Analysis of the Mode-Field of Confined-Doped Fiber

Li Zebin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Confined-doped fiber is an effective way to obtain high power output and maintain the beam quality. Differences about mode distribution and beam quality between confined-doped and conventional fibers are obtained by numerical simulation. Output mode distributions caused by off-axis, slant or mixed-modes launch field are also given, respectively.

Key words fiber optics; mode; numerical simulation; confined-doped fiber

OCIS codes 140.3430; 140.3510; 060.2280

1 引言

高功率光纤激光器以其独特的优势受到了广泛的关注和研究^[1-4]。为了避免由于光纤功率密度过高所带来的不利影响,高功率光纤激光器系统往往采用大模场面积(LMA)光纤,但是模场面积的增大有可能导致光束质量退化。限制掺杂光纤为解决这个矛盾提供了一种有效方案^[5-7]。

限制掺杂是指在大模场面积光纤的纤芯中,以其中心为圆心,某一特定长度(小于纤芯半径)为半径的圆形区域内掺杂稀土粒子(掺杂浓度具有特定分布),而其他部分不掺杂。由于不同模式的空间分布存在差异,限制掺杂相对于传统的均匀掺杂而言,其掺杂区域(以及掺杂浓度的分布)能更好地与基模重叠。因此,基模能获得更大的增益,并在模式竞争

过程中逐渐占据优势,在光束输出时占据主导地位,从而使得光束具有较好的质量。本文通过数值模拟的方法分析限制掺杂光纤的模场特性,并与传统阶跃光纤的模拟结果进行对照分析,在此基础上研究输入光束偏移、倾斜、模式成分不单一等情况对限制掺杂光纤输出模场分布的影响。

2 限制掺杂光纤的模场分析

表 1 给出两种光纤的参数,其中限制掺杂光纤的数值孔径(NA)取自文献[5],数值计算均采用这两种光纤。

输入光束尺寸的差异会造成输出模式结构的不同。为了避免该因素的影响,数值模拟分 3 组进行,输入光束直径分别为 10、20、30 μm 。表 2 给出了限

收稿日期: 2013-06-25; 收到修改稿日期: 2013-08-27

作者简介: 李泽斌(1990—),男,本科生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: 736268841@qq.com

制掺杂光纤的模拟结果,包括输出光场的基模能量权重及包含模式的个数。同样得到了传统阶跃光纤的模拟结果。

表 1 模拟光纤参数
Table 1 Fiber parameters

Fiber	Core $d / \mu\text{m}$	Cladding $D / \mu\text{m}$	NA	Normalized frequency
Confined-doped	41	391	0.073	8.548
Conventional	40	391	0.077	8.793

表 2 限制掺杂光纤输出模场

Table 2 Output field of confined-doped fiber

Launch field diameter / μm	Power weight of fundamental mode / %	Number of mode
10	52.19	3
20	95.05	2
30	97.58	2

对比发现,在入射光束正直(入射光与光纤中轴线重合)注入光纤时,两种光纤输出光束的模场均只包含 LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{03} 模式。输入光束直径过小($10 \mu\text{m}$)时,输出模场的高阶模比重过高,光束直径因素对于输出模场的影响过大,这不利于分析两种光纤间的差异。

表 3 给出了当入射光束直径同为 $20 \mu\text{m}$ 时的输出光束质量情况,限制掺杂光纤的基模比重达到了 95.5%,其光束质量明显好于传统阶跃光纤的模

表 4 输出模场随输入光束偏移变化

Table 4 Output field versus off-axis of launch field

Launch field	Power weight of fundamental		Power weight of all confined	Number of mode
	mode / %			
Off-axis / mm	0	52.19	90.60	3
	5	42.55	84.05	5
	10	19.17	82.08	6
	15	5.04	82.03	8

随着入射光束的偏移量加大,输出光束的模式数目逐渐增加,基模能量权重减小,光束质量明显下降。值得注意的是,在输入光束偏移不太大的时候,束缚模式能量比重的变化较小。但是基模的能量比重下降明显。这说明一定程度的偏移对光束耦合效率的影响不大,但会激发更多的高阶模式,使得光束质量下降。图 2 直观地反映了光束质量随入射场偏移的变化趋势。

图 3 分别给出了不同偏移量下输出光场的模式分布,其中,纵坐标轴为该模式能量占束缚模式的比重。

拟结果。

表 3 输出模场比较

Table 3 Comparison of output field

Fiber	Power weight of fundamental mode / %	Number of mode
Confined-doped	95.05	2
Conventional	84.26	2

3 输入条件对限制掺杂光纤中模场结构的影响

入射场差异会造成输出光束模式成分及其能量分布的不同。本节分析入射场偏移、倾斜以及包含不同模式成分等情况对限制掺杂光纤输出模场的影响。

3.1 入射场偏移

入射场偏移指的是入射场中轴线偏离待注入光纤(限制掺杂光纤)中央位置(如图 1 所示)。入射光均为直径 $10 \mu\text{m}$ 的高斯光束,偏移量分别为 0、5、10、15 μm 时,数值计算结果如表 4 所示。



图 1 入射场偏移示意图

Fig. 1 Scheme of off-axis launch field

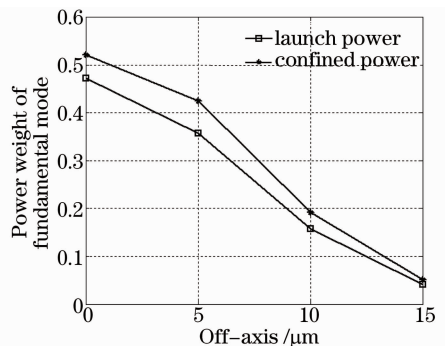


图 2 输出模场随输入光束偏移变化

Fig. 2 Output field versus off-axis of launch field

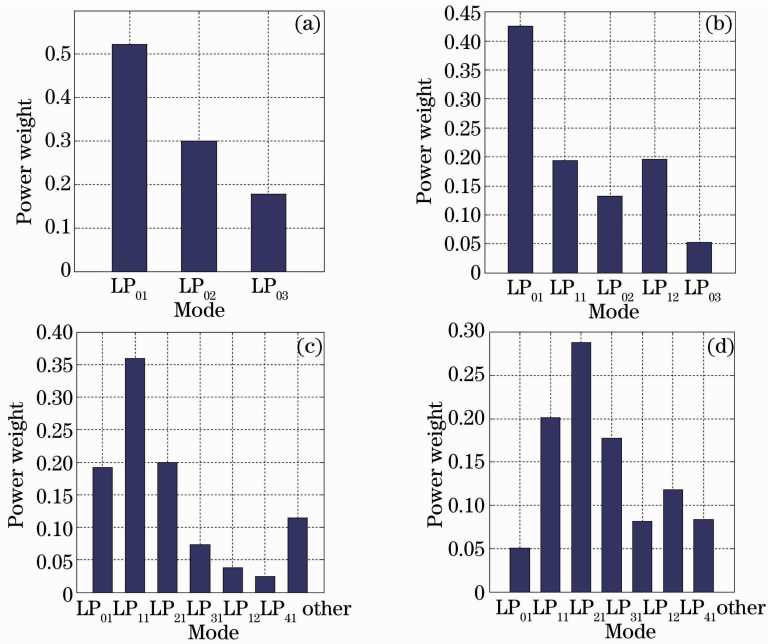


图 3 入射场偏移时输出模场结构。(a) 0; (b) 5 μm ; (c) 10 μm ; (d) 15 μm

Fig. 3 Mode structure output field caused by off-axis launch field. (a) 0; (b) 5 μm ; (c) 10 μm ; (d) 15 μm

当偏移量较小(5 μm)时,基模能量还占据着主导地位。但随着偏移量的继续增大(10 μm),LP₁₁模式的能量权重成为束缚模式中最大的。当偏移量增大到 15 μm 时,阶数更高的 LP₂₁ 模式能量占主要成分,而基模的能量权重很小。

(限制掺杂光纤)轴线存有夹角(如图 4 所示)。入射光均为直径为 10 μm 的高斯光束,入射光束的入射倾斜角为 0°、1°、2°、5°时,数值计算结果如表 5 所示。

3.2 入射场倾斜



图 4 入射场偏移示意图

Fig. 4 Scheme of slant launch field

入射场倾斜指的是入射场轴线与待注入光纤

表 5 输出模场随输入光束倾斜变化

Table 5 Output field versus tile of launch field

Launch field tile / (°)	Power weight of fundamental mode / %	Power weight of all confined modes / %	Number of mode
0	52.19	90.60	3
1	48.51	88.30	5
2	40.08	77.77	5
5	14.03	24.31	6

随着倾斜角度的增大,输出光束的模式数目逐渐增加,基模能量权重减小,光束质量明显下降。与入射光束偏移不同,当入射光倾斜角不断增大时,束缚能量也急剧衰减。图 5 给出了光束质量随入射场倾斜的变化趋势。

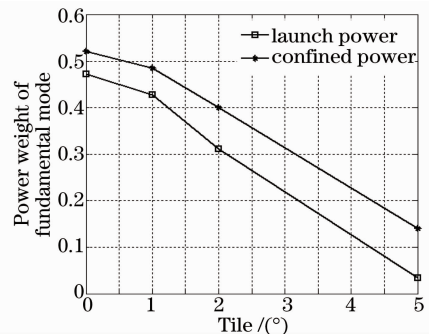


图 5 输出模场随输入光束倾斜变化

Fig. 5 Output field versus tile of launch field

图 6 分别给出了输出光场的模式分布。纵坐标轴为该模式能量占束缚模式的比重。当倾斜角较小(1°、2°)时,基模能量还占据着主导地位。其中包含的模式主要有 LP₀₁、LP₀₂、LP₀₃,且其能量权重比例也基本保持不变,与无倾斜时的相似,差别就在于 LP₀₃模式占有所有束缚模式的能量比重有所增加,且

产生了 LP_{11} 、 LP_{12} 模式。当倾斜角度继续增大(5°)时,基模已不占主导地位,且落后于 LP_{02} 、 LP_{12} 、

LP_{03} 这些高阶模式。此时不但光纤内能稳定传输的能量很少,且光束质量也很差。

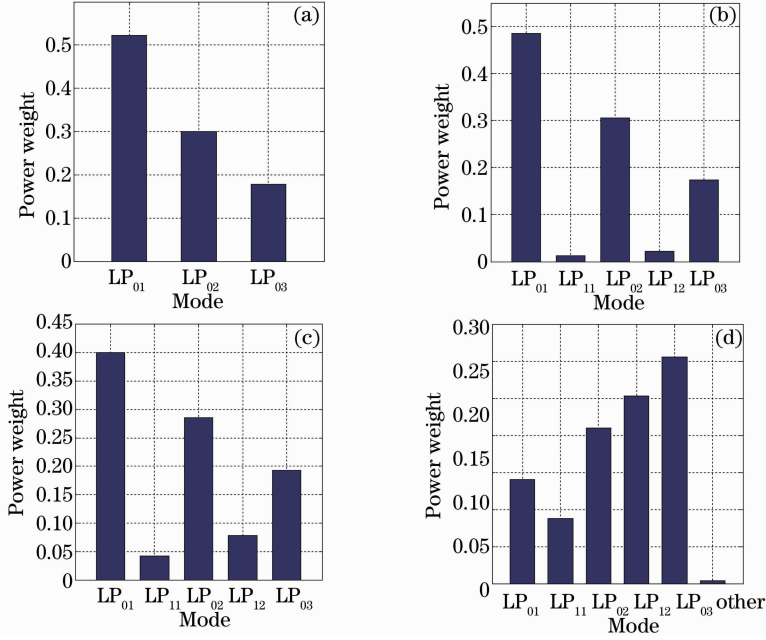


图 6 入射场倾斜时输出模场结构。(a) 0° ; (b) 1° ; (c) 2° ; (d) 5°

Fig. 6 Output field caused by slant launch field. (a) 0° ; (b) 1° ; (c) 2° ; (d) 5°

3.3 入射场含有高阶模

实际入射光场不可能是单一的基模,本节研究入射光场含高阶模时限制掺杂光纤输出光模场结构的变化。由于 LP_{11} 模是注入光束高阶模中能量最大的,因此在研究中可认为高阶模即是 LP_{11} 模。首先分别模拟注入单一的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式时输出光束的模场结构,之后通过理论计算的方式得到

LP_{01} 、 LP_{11} 模式按特定能量比例混合输入时输出的模场结构。

数值模拟的输入场是由另一段光纤(阶跃)提供的,其纤芯直径为 $20 \mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.08。分别将单一的 LP_{01} 、 LP_{11} 模式注入到限制掺杂光纤中去,相应的输出模场成分如表 6 所示。

表 6 输出模场随输入模场变化

Table 6 Output field versus launch mode field

Launch mode	Power weight of output mode / %					
	LP_{01}	LP_{02}	LP_{03}	LP_{11}	LP_{12}	LP_{13}
LP_{01}	60.15	28.54	7.87	0	0	0
LP_{11}	0	0	0	24.60	40.26	2.95

从表 6 可以看到,输入模式为 LP_{01} 模时,输出模场包含 LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{03} 3 个模式。而单一 LP_{11} 模输入时,输出模场包含的模式有 LP_{11} 、 LP_{12} 、 LP_{13} , 而不含基模成分。

$$P_2 a_i = \frac{n}{2Z_0} |C_{1,i}|^2 \quad \text{or} \quad P_2 b_i = \frac{n}{2Z_0} |C_{2,i}|^2, \quad (1)$$

式中 n 为折射率, $C_{1,i}$ 、 $C_{2,i}$ 分别为输入场 LP_{01} 、 LP_{11} 的模式系数,并由此计算出

下面通过理论计算的方法分析 LP_{01} 、 LP_{11} 模式以特定能量比例混合注入限制掺杂光纤所产生的输出模场。

$$|C_{1,i}|^2 = \frac{2(P_2 a_i) Z_0}{n} \quad \text{or} \quad |C_{2,i}|^2 = \frac{2(P_2 b_i) Z_0}{n}. \quad (2)$$

设输入场中 LP_{01} 、 LP_{11} 模式的功率分别为 P_1 、 P_2 (为方便起见,设 P_1 、 P_2 之和为 1。 a_i (b_i) 为单独注入功率为 P_1 (P_2) 的 LP_{01} (LP_{11}) 模式时输出第 i 个模式的功率权重。其功率可分别表示为

LP_{01} 模、 LP_{11} 模混合注入时,输出光场为

$$E_{\text{out}} = E_{LP_{01}} + \rho E_{LP_{11}} = \sum_{i=1}^n C_{1,i} \Psi_i + \rho \left(\sum_{i=1}^n C_{2,i} \Psi_i \right), \quad (3)$$

式中 $E_{LP_{01}}$ ($E_{LP_{11}}$) 为单独注入功率为 P_1 (P_2) 的 LP_{01} (LP_{11}) 模式时的输出光场, ρ 表征两输入模式的相位差, Ψ_i 为归一化的模场分布。

输出光功率为

$$P_{out} = \frac{n}{2Z_0} |E_{out}|^2 = \frac{n}{2Z_0} \left| \sum_{i=1}^n C_{1,i} \Psi_i + \rho \left(\sum_{i=1}^n C_{2,i} \Psi_i \right) \right|^2. \quad (4)$$

由于各个模式之间是正交的, 即

$$\langle \Psi_i, \Psi_j \rangle = \delta_{ij}, \quad (5)$$

且两输入模式同相, 即 $r=1$ 时,

$$P_{out} = \frac{n}{2Z_0} \sum_{i=1}^n |C_{1,i} + C_{2,i}|^2. \quad (6)$$

输出光束第 i 模式的功率为

$$P_i = \frac{n}{2Z_0} |C_{1,i} + C_{2,i}|^2. \quad (7)$$

计算 P_1 、 P_2 分别为 0.8、0.2 的情况, 并与单独注入 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的进行对比, 如表 7 所示。

表 7 LP_{01} 、 LP_{11} 混合输入

Table 7 Mixed launch field of LP_{01} 、 LP_{11}

Launch mode	Power weight of fundamental mode / %	Number of mode
LP_{01} 、 LP_{11}	48.12	6
LP_{01}	60.15	3
LP_{11}	0	3

从表 7 可以看到, LP_{01} 、 LP_{11} 模式混合注入时, 输出模场包含的模式种类是之前两种情况的总和 (即 LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{03} 、 LP_{11} 、 LP_{12} 、 LP_{13})。这说明, 注入光束中 LP_{11} 模式恶化了光束质量, 注入的 LP_{11} 模式能量都是以高阶模或非束缚模式的状态存在的。

3 结 论

通过数值模拟的方法对比分析了限制掺杂光纤与传统阶跃光纤的模场特性, 结果显示限制掺杂光纤的基模比重明显高于传统阶跃光纤。研究了入射场对限制掺杂光纤中模场分布的影响, 结果表明: 随着入射光束的偏移量或倾斜角增大, 输出光束的模式数目逐渐增加, 基模能量权重减小, 光束质量下降; 当入射场中含有高阶模式时, 注入的 LP_{11} 模式能量都是以高阶模或非束缚模式的状态存在的, 也就是说, 入射场中的高阶模 (LP_{11}) 无益于限制掺杂光纤中光束质量的提高。

参 考 文 献

- 1 Xiaolin Dong, Hu Xiao, Shanhui Xu, *et al.*. 122-W high-power single-frequency MOPA fiber laser in all-fiber format[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(11): 111404.
- 2 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou, *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(7): 412-414.
- 3 A Liem, J Limpert, H Zellmer, *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(17): 1537-1539.
- 4 Yoonchan Jeong, Johan Nilsson, Jayanta K Sahu, *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *J Sel Top Quant Electron*, 2007, 13(3): 546-551.
- 5 Changgeng Ye, Joona Koponen, Teemu Kokki, *et al.*. Confined-doped ytterbium fibers for beam quality improvement: fabrication and performance[C]. *SPIE*, 2012, 8237: 823737.
- 6 Simo Tammela, Mikko Soderlund, Joona Koponen, *et al.*. The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[C]. *SPIE*, 2006, 6116: 94-102.
- 7 Teemu Kokki, Joona Koponen, Marko Laurila, *et al.*. Fiber amplifier utilizing an Yb-doped large-mode-area fiber with confined doping and tailored refractive index profile[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 758016.

栏目编辑: 王晓琰