

文章编号: 1001-4322(2011)08-2074-05

多芯双包层光纤激光器相干合束纤芯最优化排布*

张晓路^{1,2}, 娄淑琴^{1,2}, 王立文^{1,2}

(1. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要: 基于衍射理论推导出多芯双包层光纤激光器的远场相干光光强理论模型,并在此基础上,系统地分析比较了纤芯不同排布方式的合束效果,重点研究了纤芯的单层圆环排布、多层圆环排布、方形排布、正六边形堆积排布 4 种方案的合束效果,及在一定纤芯排布下纤芯直径、纤芯轴间距、出射平面与衍射平面间距离、波长对合束效果的影响。研究发现:在纤芯数目一定的情况下,单层圆环排布的合束效果最优,其次是方阵排布;纤芯数目越多,截面利用率越高,可获得更大合束最大光强;方阵排布方式及正六边形堆积排布方式可有效提高截面利用率;增大纤芯直径,减小纤芯轴间距、减小出射平面与衍射平面间的距离、减小波长可以获得更好的合束效果。

关键词: 相干合成; 光纤激光器; 多芯双包层光纤; 衍射模型; 纤芯排布

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi:10.3788/HPLPB20112308.2074

同常规的体积庞大的化学激光器和气体激光器相比,光纤激光器以其转换效率高、激光阈值低、可调谐范围宽、光束质量好、散热面积大等显著优势,成为高能激光武器领域的研究热点。近年来,随着双包层光纤及半导体激光器泵浦技术的发展,单根光纤的输出功率可达到 kW 量级^[1-2]。受双包层掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机制的限制,单根光纤激光输出功率的提高受到了限制。光纤激光器阵列的相干合成是产生高功率、高质量光束的一条有效的途径^[3-4]。利用多芯掺杂双包层光纤实现相干合束是一种非常有前途的相干合束方案,通过控制多芯掺杂双包层光纤纤芯间距,使纤芯中各路激光实现自动锁相,有效地实现多路激光相干叠加,以获得高功率激光输出^[5-6]。本文针对多芯双包层光纤实现相干合束方案,重点研究了纤芯阵列的不同排布方式对出射激光相干合束效果的影响,分析了在单层圆环排布^[7]、多层圆环排布、方形排布、正六边形堆积排布的情况下各个参量对合束效果的影响。

1 理论模型

以衍射理论为基础^[8],分别研究纤芯阵列分别为单层圆环排布、多层圆环排布、方形排布、正六边形排布时出射激光的特性,图 1 为 4 种纤芯排布的截面图(图中圆圈或点表示纤芯,矩形区域为内包层,矩形区域外为外包层)。

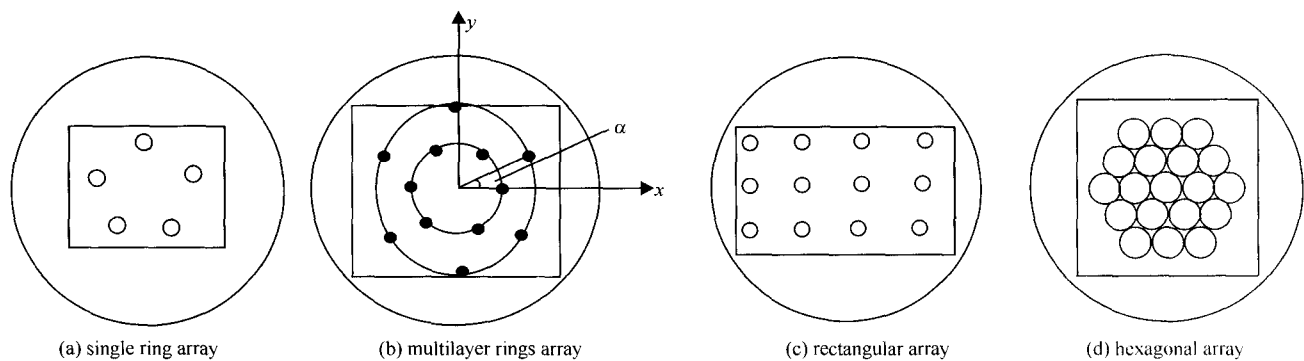


Fig. 1 Cross sections of four core arrays

图 1 不同纤芯排布截面图

设纤芯单位横截面积出射单位光强,出射光为单色光,衍射平面即多芯光纤的出射面为 $x'o'y'$,观察平面为

* 收稿日期:2010-08-10; 修订日期:2011-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(60977033)

作者简介:张晓路(1987—),女,硕士,主要从事晶体光纤、光纤通信的研究;09120124@bjtu.edu.cn。

通信作者:娄淑琴(1965—),女,教授,主要从事特种光纤、光纤通信、光纤传感、光纤激光器等方面的研究;shqlou@bjtu.edu.cn。

xoy , 两平面平行, 如图 2 所示, z 轴垂直于两平面, 两平面的距离为 z_0 , 纤芯数目为 N , 单个纤芯面积为 S_c , 给纤芯依次编号, 纤芯 i 的中心坐标为 $(x'_i, y'_i, 0)$, 观察平面上存在一点 $Q(x, y, z_0)$ 。根据惠更斯-菲涅耳原理, 纤芯 i 在 Q 点产生的光场 $U_i(x, y)$ 为纤芯 i 横截面积上的积分, 即

$$U_i(x, y) = \iint_{S_c} h(x'_i, y'_i; x, y) U(x'_i, y'_i) dS_c \quad (1)$$

式中: $U_i(x, y)$ 表示纤芯 i 经过衍射后在衍射平面 xoy 的光场分布; $U(x'_i, y'_i)$ 表示在出射平面 $x'o'y'$ 上纤芯 i 的光场分布; h 为一个与纤芯 i 光场分布有关的函数。由于

$$z_0 \gg \text{Max}[(x'_i)^2 + (y'_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

经过近似、二项展开、傅里叶展开等运算后, 式(1)为

$$h(x'_i, y'_i; x, y) = \frac{1}{j\lambda z_0} \exp(jkz_0) \exp\left[j \frac{k}{2z_0} [(x - x'_i)^2 + (y - y'_i)^2]\right] \quad (3)$$

式中: λ 表示出射光的波长, 结合式(1), (2)可求出各个纤芯的出射光经过衍射后在衍射面上 Q 点产生的光场值, 而 Q 点实际光场为各纤芯经过衍射后在 Q 点产生光场的叠加^[9], 即

$$U(x, y) = \sum_{i=1}^N U_i(x, y) \quad (4)$$

式中: $U(x, y)$ 代表光场分布。于是可得 Q 点的衍射光强为

$$I(x, y) = |U(x, y) \overline{U(x, y)}| = |U(x, y)|^2 \quad (5)$$

由于 Q 点坐标的随意性, 改变 Q 点坐标数值, 可以求出衍射平面上各点的光强分布。

2 最优化纤芯排布

为研究各种纤芯排布方式的合束效果, 定义如下共有参数: 纤芯直径为 d , 波长为 λ , 纤芯轴间距离为 s , 长度参量的单位均为 m , 纤芯数目为 N 。

对于单层圆环排布, 还需定义纤芯所组成的圆环半径 r , 圆环半径越小, 合束效果越好^[10]。对于多层圆环排布, 设圆环数为 n , 从内向外依次记这些环为 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$, 每一个环对应与 x 正半轴夹角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, 为了方便起见, 通常设置 $\alpha_1 = 0$; 参量还有 R_g, N_g , 其中 $g = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 R_g 表示第 g 个圆环的半径, N_g 表示第 g 个圆环上纤芯数目。对于方形排布, 纤芯排成一个 $u \times v$ 的矩形阵列, 其中: u, v 为纤芯阵列行数和列数, 纤芯间距 s 越小合束效果越好^[8]。对于正六边形排布, 在纤芯紧密排布的情况下, 定义除中心纤芯以外的纤芯环数为 w , 则总的纤芯数 $N = 3w(w + 1)$ 。

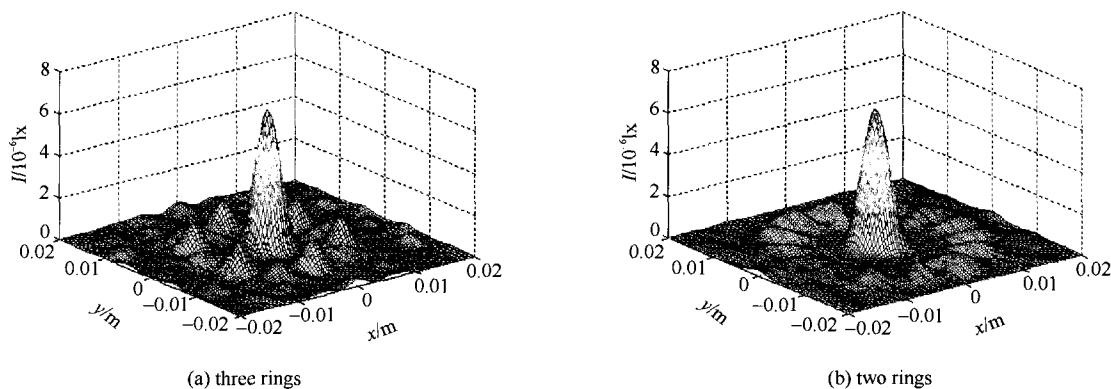


Fig. 3 Light intensity of multilayer rings arrays with three rings and two rings

图 3 多层圆环排布圆环数目对合束效果的影响

在纤芯数目一定的情况下, 对多层圆环排布圆环数 n 进行优化, 设 $N = 12$ 时, 采用两层和三层圆环排列的

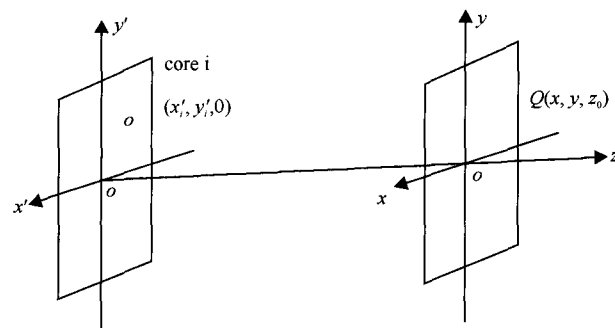


Fig. 2 Schematic diagram of diffraction
图 2 衍射示意图

合束效果的数值分析,结果如图 3 所示,图 3(a)为三层环 $[N_1, N_2, N_3]=[3, 3, 6]$, $[R_1, R_2, R_3]=[5.0 \times 10^{-6}, 12.5 \times 10^{-6}, 20.5 \times 10^{-6}]$, 图 3(b)为两层环 $[N_1, N_2]=[5, 7]$, $[R_1, R_2]=[7 \times 10^{-6}, 18 \times 10^{-6}]$ 。从图中可以看出,在纤芯数目一定时,环数越少,合束后旁瓣光强相对弱,合束效果越好,即环数越少合束效果越好,由此得出纤芯数目一定,单层圆环比多层圆环合束效果好,因此后续研究中多层圆环排布将不参与比较。

令 $d=7 \mu\text{m}$, $\lambda=1.8 \mu\text{m}$, $z_0=0.1 \text{ m}$, 纤芯均为紧密排列,即 $s=d=7 \mu\text{m}$ 。单层圆环排布和正六边形排布,最大光强与纤芯数目关系如图 4 所示。矩形排布最大光强和纤芯数目的关系如表 1 所示,表中给出了不同矩形排布的最大光强。由图 4 和表 1,比较单层圆环、六边形排布和方阵排布发现:在每根纤芯出射光强一定的情况下,最大光强随着纤芯数目增加而增加,纤芯数目越多所得合束光光强越大,不同排布影响合束效率;纤芯数目一定时,单层圆环排列比多层圆环排列、正六边形堆积排列、方阵排列合束效率高,输出最大光功率大,略次于单层圆环排布的是方阵排布,但方形排布可以在有限的截面积上分布更多的纤芯数目,从另一个角度看,截面积的利用率得到了提高。

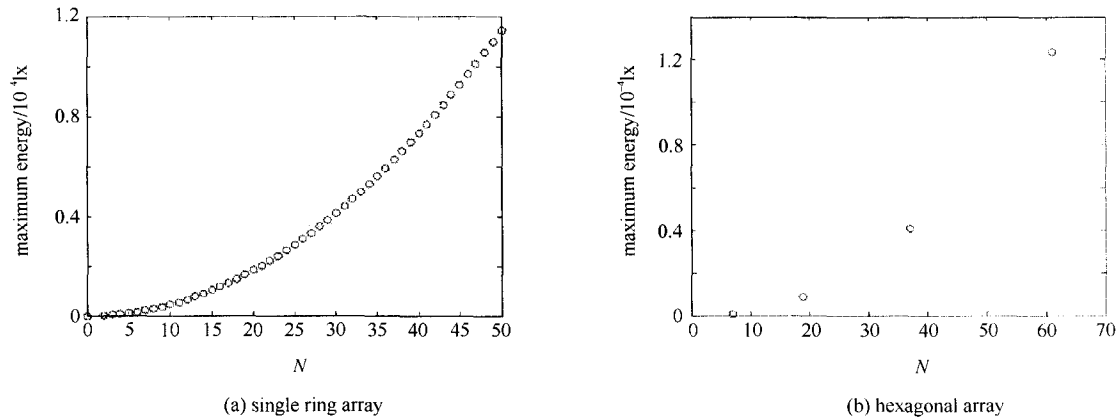


Fig. 4 Relationship between maximum light intensity and core number for single ring array and hexagonal array

图 4 最大光强与纤芯数目的关系

表 1 方阵排列最大光强和纤芯数目的关系

Table 1 Relationship between maximum and light intensity core number of rectangular array

v	maximum light intensity/lx						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4.5657×10^{-2}	1.8285×10^{-7}	4.0830×10^{-7}	7.3139×10^{-7}	1.1198×10^{-6}	1.6456×10^{-6}	2.1530×10^{-6}
2	1.8285×10^{-1}	7.3139×10^{-7}	1.6456×10^{-6}	2.9255×10^{-6}	4.5712×10^{-6}	6.5824×10^{-6}	8.9594×10^{-6}
3	4.0830×10^{-7}	1.6456×10^{-6}	3.6514×10^{-6}	6.5825×10^{-6}	1.0014×10^{-5}	1.4810×10^{-5}	1.9254×10^{-5}
4	7.3139×10^{-7}	2.9255×10^{-6}	6.5825×10^{-6}	1.1702×10^{-5}	1.8285×10^{-5}	2.6330×10^{-5}	3.5838×10^{-5}
5	1.1198×10^{-6}	4.5712×10^{-6}	1.0014×10^{-5}	1.8285×10^{-5}	2.7464×10^{-5}	4.1140×10^{-5}	5.2804×10^{-5}
6	1.6456×10^{-6}	6.5824×10^{-6}	1.4810×10^{-5}	2.6330×10^{-5}	4.1140×10^{-5}	5.9242×10^{-5}	8.0634×10^{-5}
7	2.1530×10^{-6}	8.9594×10^{-6}	1.9254×10^{-5}	3.5838×10^{-5}	5.2804×10^{-5}	8.0634×10^{-5}	1.0152×10^{-4}
8	2.9255×10^{-6}	1.1702×10^{-5}	2.6329×10^{-5}	4.6808×10^{-5}	7.3137×10^{-5}	1.0532×10^{-4}	2.5152×10^{-4}

通过对以上 4 种排布方案的分析研究,发现单层圆环为最优排布的原因在于:位于一个圆上的纤芯可以在圆心处得到最大相干,而单层圆环排列所有的纤芯都位于一个相干圆上,得到了最优的合束效率;而多层圆环各个圆环上的纤芯分别为一组最佳合束组,他们分别在圆心得到最大光强,若各个圆环为同心圆,则各个相干组分别在圆心处得到最大光强,各个最大光强点重合于一点,但是光强只是简单的叠加,各组合束组之间并没有得到最佳的相干加强,而若纤芯没有在同一个圆上,则合束效率更低。

3 最优化排布参数的优化

在确定纤芯的排布之后,需要对该种排布的参数进行优化。除了降低各组相干圆环半径 r 外,还需要考虑纤芯直径 d 、出射平面和衍射平面之间距离 z_0 及工作波长 λ 对合束效果的影响。

令 $z_0=0.1 \text{ m}$, $\lambda=1.8 \mu\text{m}$, $N=9$, $r=15 \mu\text{m}$, 单环阵列的合束效果受纤芯直径的影响如图 5 所示。从图中可以看出,随着纤芯直径的增加,合束后的中心极大点的光强越大,合束效果越好。

令 $d=6\ \mu\text{m}$, $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$, $N=9$, $r=15\ \mu\text{m}$, 单层圆环排布最大光强与出射平面和观察平面之间距离 z_0 的关系如图 6 所示。由图可知出射距离与最大光强成反比, 最大光强从出射端射出后快速衰减。

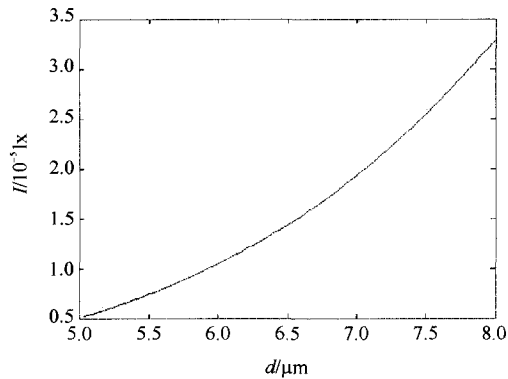


Fig. 5 Relationship between maximum light intensity and core diameter

图 5 最大光强与纤芯直径关系

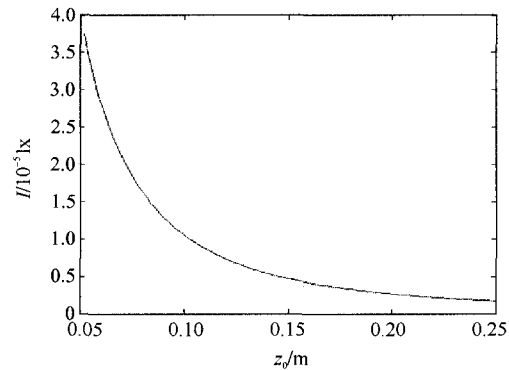


Fig. 6 Relationship between maximum light intensity and distance between output plane and observation plane

图 6 最大光强与出射平面和观察平面之间距离关系

令 $z_0=0.1\ \text{m}$, $d=7\ \mu\text{m}$, $N=6$, $r=7\ \mu\text{m}$, 2×3 阵列的方形排布最大光强与波长的关系如图 7 所示。由图可知最大光强与波长成反比。

由图 5~7 可知: 纤芯直径越大, 波长越短, 衍射平面和出射平面间距越短, 可使出射光越强。由于在研究中假设出射纤芯单位面积上的光功率一定, 所以虽然纤芯直径越大出射的光强越大, 但是纤芯直径增大会导致模式数目增多, 不利于相干合束。合束波长减小虽然可以获得好的合束效果, 但是在实际通信系统中要考虑通信系统的需要和截止波长的限制。而减小出射平面和衍射平面之间的距离可以避免光的损耗和发散角引起的光束扩展。

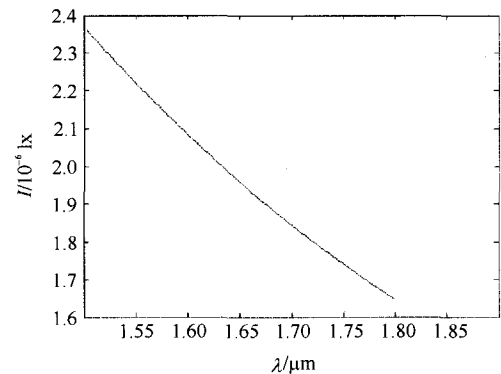


Fig. 7 Relationship between maximum light intensity and wavelength

图 7 最大光强与波长关系

4 结 论

本文基于衍射理论推导出多芯双包层光纤激光器的远场相干光光强理论模型, 研究了纤芯不同排布方案。在纤芯单位横截面上出射的光功率一定的情况下, 不考虑光纤的内部特性则纤芯之间距离越小合束效果越好, 纤芯数目越多合束得到的最大光强越大。一定数目纤芯排列成单层圆环可以获得最大的合束光功率。若想要充分利用光纤横截面积, 可设计为多层同心圆环排布, 虽然合束效率略低于单层圆环排列, 但是通过增加纤芯数目可以弥补, 这样需要设计各个相干圆上纤芯分布的数目以及圆环数目。出射平面和观察平面的距离应尽量小, 这样既可避免损耗, 又可避免发散角引起的光束发散。激光波长需要根据实际应用进行选择。纤芯直径和纤芯间距离两个参数的设定除了参照本文所得结论进行优化, 还要考虑多芯光纤的内部特性, 以免出现纤芯间光信号的串扰。利用多芯光子晶体光纤进行相干合束获得更好特性的激光^[11], 是后续主要研究的课题。

参考文献:

- [1] Wadsworth W J, Rerciva R M, Bouwmans G, et al. High power air-clad photonic crystal fiber laser[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(1): 48-53.
- [2] Kozlov V A, Hernandez-Cordero J, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(24): 1814-1816.
- [3] 刘泽金, 周朴, 侯静, 等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 519-524. (Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing, et al. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(3): 519-524)
- [4] Bochove E J, Cheo P K, King G G. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(14): 1200-1202.
- [5] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(5): 474-476.
- [6] Chen Shengping, Li Yigang, Lu Kecheng. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(20): 7878-7883.
- [7] 何兵, 楼祺洪, 周军, 等. 光纤激光器相干组束技术[J]. *激光与光电子进展*, 2006, **43**(9): 47-54. (He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun, et al.

Coherent beam combination of fiber lasers. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9):47-54)

- [8] 朱伟利, 盛嘉茂. 信息光学基础[M]. 北京: 中央民族学院出版社, 1997: 52-61. (Zhu Weili, Sheng Jiamao. The basis of information optics. Beijing: Central University for Nationalities Press, 1997: 52-61)
- [9] Cheo P K, Liu A, King G G. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(5): 439-441.
- [10] 张晓路, 娄淑琴, 刘永伟. 圆环阵列多芯双包层激光相干合束的研究[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(2): 266-269. (Zhang Xiaolu, Lou Shuqin, Liu Yongwei. Coherent laser beam combination by use of dual-cladding multi-core optical fiber ring array. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 266-269)
- [11] 王海云, 侯蓝田, 周桂耀, 等. 双芯光子晶体光纤相干合成的研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(6): 516-518. (Wang Haiyun, Hou Lantian, Zhou Guiyao, et al. Two-core photonic crystal fiber coherent synthesis research. *Laser and Infrared*, 2008, **38**(6): 516-518)

Optimizing cores array for coherent beam combining with multi-core double-clad fiber laser

Zhang Xiaolu^{1,2}, Lou Shuqin^{1,2}, Wang Liwen^{1,2}

- (1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on diffraction theory, this paper deduces the equation of coherent beam intensity in far-field of with multi-core double-clad fiber. The effects of different fiber core arrays, especially single ring array, multilayer rings array, rectangular array and hexagon array, on the final quality of beam combination are investigated. The effects of different parameters including core diameter, core space, the distance between output plane and diffraction plane and wavelength are also studied. Numerical results demonstrate that, for given core number, single ring array is the best scheme among the above four core array in order to realize high quality beam combination, and the next one is rectangular array. Increasing core number can increase cross section utilization ratio, thus producing higher maximum laser intensity. Both rectangular array and hexagonal array can improve using efficiency of the fiber cross section. Moreover, higher laser intensity can be obtained through increasing core diameter, decreasing core space, decreasing the distance between output plane and diffraction plane and decreasing wavelength.

Key words: coherent beam combination; fiber laser; multi-core double-clad fiber; diffraction model; core array