

文章编号: 1001-3806(2009)05-0529-03

新型多芯光纤的模场特性分析

李娟, 杨琳, 赵楚军, 文双春*, 范滇元

(湖南大学 计算机与通信学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 为了实现高功率、高亮度的光纤激光输出,研究了新型多芯光纤组束技术,基于大模场倏逝波,采用时域有限差分数值模拟方法,对多芯光纤(包含多根微纳纤芯或包含多根微纳芯和大芯径纤芯)的模场特性进行了数值仿真和理论分析。结果表明,以一定方式排列的微纳光纤束阵列中多根微纳纤芯可以很好耦合;当多根微纳芯和大芯径纤芯组束时,微纳纤芯能够有效地平坦模场。这一结果对于高功率光纤激光器和放大器的进一步发展很有帮助。

关键词: 光电子学;相干组束;时域有限差分法;倏逝波耦合

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.024

Modal characteristics of a novel multicore optical fiber

LI Juan, YANG Lin, ZHAO Chu-jun, WEN Shuang-chun, FAN Dian-yuan

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to achieve high-power and high-brightness fiber laser beams, based on the strong coupling mechanism of evanescent field, the modal field characteristics of multicore fibers, including a bundle of multiple micro/nano fibers or a bundle of multiple micro/nano fibers and large core fibers, were numerically simulated and theoretically analyzed with finite difference time domain (FDTD) method. The result shows that good coupling among the fibers can be obtained in a micro/nano fiber array and that the modal field is flattened by the micro/nano fibers in the bundle of multiple micro/nano fibers and large core fibers. The result is useful to further development of high-power lasers and amplifiers.

Key words: optoelectronic; coherent combing; finite difference time domain method; evanescent field coupling

引言

光纤激光器由于具有转换效率高、激光阈值低、光束质量好等优点越来越受到重视,已经广泛应用于激光武器、材料加工、空间光通信、遥感、光电对抗等领域^[1-2]。近年来,随着半导体抽运激光器功率的提高和抽运方式的改进^[3],单根光纤激光器的输出功率可达到千瓦量级^[4]。但是,由于受到非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机制的限制,要大幅度地提高单个激光器的功率相当困难。相干组束技术是高功率高光束质量输出的有效途径。国内外已有主振荡放大、全光纤组束、外腔相干组束、多芯光纤自组装等多种相干组束技术^[5-9]。多芯光纤自组装技术不需要外腔,它利用嵌埋于内包层中的多根掺杂单模纤芯之间的倏逝波耦合,可以实现锁相。但是由于普通单模纤芯倏逝波较弱,所以不易耦合。作者提出一种新型多芯光纤

自组装方法,即将多根微纳纤芯或包含多根微纳芯和大芯径纤芯进行组束,利用微纳光纤的大模场倏逝波进行耦合,实现传输过程中光束间的倏逝波强耦合,实现被动锁相。

1 理论模型

1.1 单根微纳光纤

假定微纳光纤非损耗、无源,由 Maxwell 方程转化成 Helmholtz 方程,并结合边界条件,得出本征方程^[10]:

$$\left[\frac{J_v'(U)}{U J_v'(U)} + \frac{K_v'(W)}{W K_v'(W)} \right] \left[\frac{J_v'(U)}{U J_v'(U)} + \frac{n_2^2 K_v'(W)}{n_1^2 W K_v'(W)} \right] = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{V}{UW} \right)^4 \quad (1)$$

式中, J_v' 是第 1 类贝塞尔函数, K_v' 是第 2 类修正的贝塞尔函数, v 表示贝塞尔函数的阶数,上标“'”表示 1 阶导数, k 为自由空间的波数, β 是传播常数, n_1, n_2 分别表示纤芯和包层的折射率, $U = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$, $W = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$, $V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ 。其中, a 是纤芯半径, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长。

作者简介: 李娟(1984-),女,硕士研究生,现主要从事光纤激光器和放大器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: scwen@hnu.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-15

对于基模,其本征方程可以简化为:

$$\left[\frac{J_1'(U)}{UJ_1'(U)} + \frac{K_1'(W)}{WK_1(W)} \right] \left[\frac{J_1'(U)}{UJ_1'(U)} + \frac{n_2^2 K_1'(W)}{n_1^2 WK_1(W)} \right] = \left(\frac{\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{V}{UW} \right)^4 \quad (2)$$

光纤的单模条件由归一化传播常数 V 来决定:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} (n^2 - n_2^2)^{1/2} \approx 2.405 \quad (3)$$

式中, λ_0 是传输波长。这里考虑的光纤沿径向 r 和方位角 ϕ 方向的平均功率都是 0, 所以只需研究沿 z 方向的功率。在纤芯和光纤包层中的 Poynting 矢量 S 的 z 分量分别是^[11]:

$$\begin{aligned} \text{纤芯内}(0 < r < a): S_{z1} = & \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{kn_1^2}{\beta J_1^2(U)} \times \\ & \{ a_1 a_3 J_0^2(UR) + a_2 a_4 J_2^2(UR) + \\ & [(1 - F_1 F_2)/2] J_0(UR) J_2(UR) \cos(2\phi) \} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{包层}(a \leq r < \infty): S_{z2} = & \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{kn_2^2}{\beta K_1^2(W)} \times \\ & \{ a_5 a_6 K_0^2(WR) + a_2 a_6 K_2^2(WR) + \\ & [(1 - 2\Delta - F_1 F_2)/2] K_0(WR) K_2(WR) \cos(2\phi) \} \quad (5) \end{aligned}$$

式中, $R = r/a$, ϵ_0 是真空中介电常数, μ_0 是真空中磁导率, $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, $a_1 = \frac{F_2 - 1}{2}$; $a_2 =$

$$\begin{aligned} \frac{F_2 + 1}{2}; a_3 = \frac{F_1 - 1}{2}; a_4 = \frac{F_1 + 1}{2}; a_5 = \frac{F_1 - 1 + 2\Delta}{2}; a_6 = \\ \frac{F_1 + 1 - 2\Delta}{2}。 F_1 = \left(\frac{UW}{V} \right)^2 [b_1 + (1 - 2\Delta)b_2]; F_2 = \\ \left(\frac{V}{UW} \right)^2 \frac{1}{b_1 + b_2}; b_1 = \frac{1}{2U} \left[\frac{J_0(U)}{J_1(U)} - \frac{J_2(U)}{J_1(U)} \right]; b_2 = \\ - \frac{1}{2W} \left[\frac{K_0(W)}{K_1(W)} + \frac{K_2(W)}{K_1(W)} \right]。 \end{aligned}$$

1.2 时域有限差分法

时域有限差分法作为一种主要的电磁场计算方法,是通过将麦克斯韦旋度方程转化为有限差分式而直接在时域进行迭代求解的。通过建立时间离散的差分方程,在相互交织的网格空间中交替计算电场和磁场^[12]。时域有限差分法精度较高,能直接得到电磁波的时域解,对复杂结构有很强的模拟功能等特点。因为假设多光纤阵列在纵向是不变的,所以这里使用了2维紧凑的时域有限差分法,这种方法相对于3维的时域有限差分法,速度快,而且结果准确。计算中,使用了完美匹配层消除边界引入的误差,以电场在光纤中心进行激发。

2 数值模拟结果

在常规光纤中,波导模场集中在纤芯内,包层中只存在极小部分的倏逝场。而对于微纳光纤,其包层中倏逝波模场会很大。多根微纳纤芯组束就是利用这种倏逝波强耦合进行相位锁定。通过时域有限差分法,数值模拟了多根微纳光纤束和多根微纳光纤与大芯径光纤的模场特性,从而说明了这种耦合的有效性。

2.1 单根微纳光纤的模场特性

若取纤芯材料为石英,纤芯折射率是 1.45,包层折射率 1.3,计算波长为 600nm,计算得到当纤芯直径小于 700nm 的情况下,光纤保持单模。光纤芯径分别为 200nm 和 400nm 情况下 z 方向能流密度如图 1 所示。

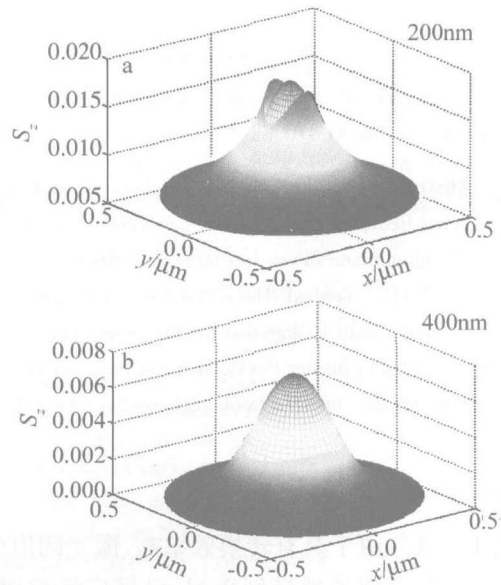


Fig. 1 z -direction Poynting vectors of silica wires at 600nm wavelength, mesh-field inside the core, gradient-field outside the core

为了更深入地了解这两个区域内场的相关性质,通常定义一个参量 η 来表征芯内能量与总能量的比值^[11],即 $\eta = \int_0^a S_{z1} dA / \left(\int_0^a S_{z1} dA + \int_a^\infty S_{z2} dA \right)$ 。其中, $dA = a^2 R dR d\phi = r dr d\phi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ 。 η 与光纤芯径的关系如图 2 所示。

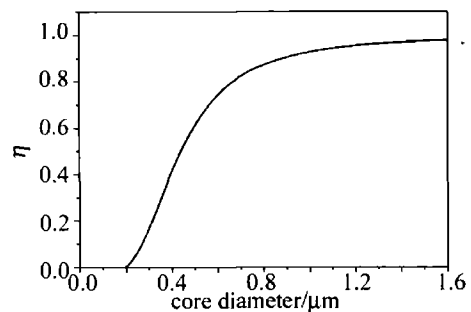


Fig. 2 Fractional power of the fundamental modes inside the core of silica wire at 600nm wavelength

从图2可以看出,直径为200nm的光纤波导,绝大部分电场能量弥散于光纤外部大面积区域,束缚光的能力很弱;直径为800nm时,大部分能量则收缩于波导芯内。随着光纤直径的增大,波导芯内的能量逐渐增大,纤芯外部的能量则快速下降。当纤芯减小到百纳米量级时,模场90%以上的能量分散到包层百微米以上的范围中,形成了大模场倏逝波。

2.2 包含多根微纳纤芯多芯光纤的模场特性

在包含多根微纳纤芯的多芯光纤中,纤芯的排列方式可以多种多样,纤芯数量也可以不等。作者以包含4根长度、掺杂浓度都相同的微纳纤芯的多芯光纤为例,对这种多芯光纤的耦合特性进行分析。计算中,4根微纳光纤呈正方形规则排列,纤芯折射率取1.45,包层折射率取1.3,模拟波长取600nm。

在光纤间距一定(5 μm)的情况下,芯径大小不同对多芯光纤模场特性的影响如图3所示。通过比较图

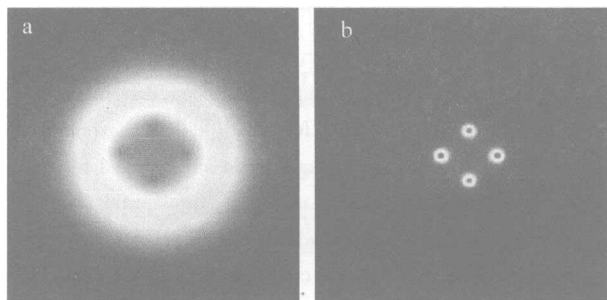


Fig. 3 z-direction Poynting vectors of four silica wires at 600nm wavelength
a—200nm b—800nm

3a和图3b可以看出:在微纳光纤芯径200nm时,多芯光纤z向能流密度分布最均匀,耦合最强;在芯径800nm时,耦合会相对图3a变得很弱。如果芯径继续增大,纤芯间的耦合会变得更弱,这时相干组束就很难实现。这种耦合现象可以通过单根微纳纤芯的模场特性解释,由图2中看出,芯径越小,扩散到包层中的能量越多,则纤芯间的倏逝耦合越强;如果芯径较大,纤芯束缚光的能力很强,包层中的能量非常小,纤芯间的倏逝场耦合较弱。

当芯径大小一定时,计算了不同纤芯距离情况下的z向能流密度分布,得到了相似的结论,即随着纤芯间距的逐渐增大,4根光纤的能流密度分布变得越来越不均匀,其模场分布也越来越不均匀。

2.3 包含多根微纳纤芯和大芯径纤芯多芯光纤的模场特性

利用微纳光纤的大模场倏逝波,设想将微纳光纤引入常规多芯光纤中,用以实现相位锁定和模场整形。当大芯径光纤的半径为1 μm ,微纳光纤的半径为100nm,相对的大芯径光纤纤芯距离为10 μm ,其z向

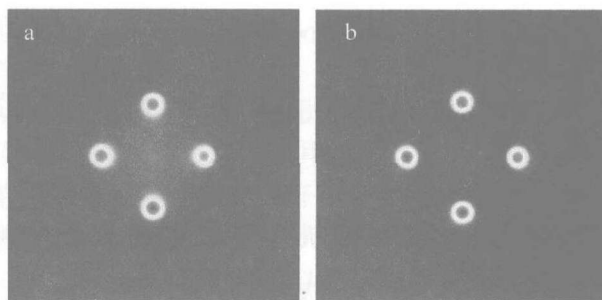


Fig. 4 z-direction Poynting vectors of four large core size fibers with diameters of 2 μm at 600nm wavelength with core distance of 10 μm
a—introducing five nano fibers with diameters of 200nm b—without nano fibers

能流密度分布如图4a所示,图4b中给出了没有微纳光纤的能流密度分布。图4a与图4b比较,当微纳光纤存在时,在大芯径光纤与微纳光纤之间的区域能流分布较均匀,大部分光在大芯径光纤中传输。

3 结论

通过时域有限差分法研究了一种新型多芯光纤的模场特性,结果表明:通过调整纤芯间距和粗细,多根微纳光纤组束或者多根微纳光纤和大芯径光纤组束可以较好实现多纤芯的耦合,并起到模场整形的效果。在选择微纳光纤的芯径时,光纤芯径最好小于 $\lambda/5$,这时候倏逝波的耦合效果较强。该结果不仅适应于4根光纤束,对6根、8根或者更多根纤芯的相干耦合同样适用。对于具体的耦合机制,正在进一步研究。利用倏逝波耦合这种被动锁相机制避开了主动锁相繁琐复杂的锁相电路,在实现大模场的同时,也实现了较好的光束质量输出,为高功率光纤激光器和放大器的进一步发展提供了另外一种可能。

参 考 文 献

- [1] LOU Q H, ZHU J Q, ZHOU J, *et al.* Double cladding fiber laser and its application in military [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2003, 14(5): 28-32 (in Chinese).
- [2] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 438-444 (in Chinese).
- [3] GAO Q S, TONG L X, JIANG J F, *et al.* The four-pass pumped coupling system of high power diode lasers stack [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 135-137 (in Chinese).
- [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [5] WICHHAM M, ANDEREGG J, BROSNAN S, *et al.* Coherently coupled high power fiber arrays [R]. California; Stanford Photonics Annual Meeting, 2003: 1-64.
- [6] BUESSEL B H, CRIS J D. Self-organized coherence in fiber laser arrays [J]. Opt Lett, 2005, 30(11): 1339-1341.
- [7] HUO Y M, CHEO P K, KING G G. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. Optics Express, 2004, 12(27): 6230-6239.

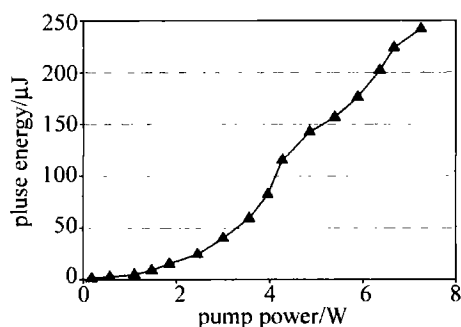


Fig. 4 Output energy of double clad fiber amplifier

加,使脉冲前沿和后沿的增益都增加,但由于脉冲前沿放大对后沿放大的抑制,导致脉冲种子信号的前沿增益大于后沿的增益,脉冲峰值将向前沿方向移动,产生波形的畸变。尤其是如果脉冲信号光很强,或FWHM较宽时,脉冲后沿根本就得不到放大,因此出现脉宽压缩现象。当双包层光纤放大器输出脉冲能量为242 μ J时,放大FWHM为29ns,对应的峰值功率达到了8.3kW。单模光纤放大器与多模光纤放大器输出脉冲波形如图5所示。

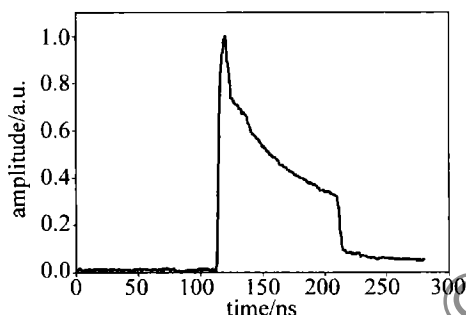


Fig. 5 Amplifying pulse shape

采用光束质量分析仪检测了从双包层光纤放大器输出的近场光束能量分布,如图6所示。由图可知,从

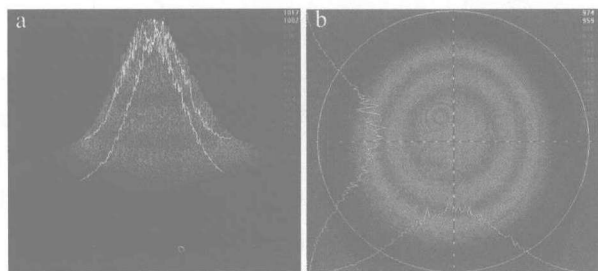


Fig. 6 3-D and 2-D energy distribution of amplifying pulse

中放1级输出的光束质量较好,为准单模输出。同时说明了双包层光纤放大器输出端的多模光纤并未对放大器光束质量造成影响。

3 结论

研制了低重频脉冲掺Yb³⁺光纤放大器。光纤放大器采用2级放大结构,得到频率100Hz、半峰全宽为29ns、脉冲能量242 μ J的放大脉冲输出。实验中观察到了脉冲压缩现象,输出的光束质量较好,为准单模输出。

参考文献

- [1] MADASAMY P, KIMPEL F, TORRUELLAS W. High peak power ytterbium doped diode pumped fiber amplifier system [J]. Proc SPIE, 2007, 6552: 65520Q/1-65520Q/10.
- [2] FEUCHTER T, LUMHOLT O. mJ pulse energy fiber lasers based on Yb-doped photonics crystal fibers [J]. Proc SPIE, 2007, 6453: 64531X/1-64531X/10.
- [3] LIMPET J, ZELLAME H, TUNNERMANN A, et al. High-average-power millijoule fiber amplifier system [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, Lasers and Electro-Optics. Long Beach; CLEO, 2002: 591-592.
- [4] KHITROV V, SAMSON B, MACHEWIRTH D, et al. High peak power pulsed single-mode linearly polarized LMA fiber amplifier and Q-switch laser [J]. SPIE, 2007, 6453: 645305/1-645305/6.
- [5] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J, et al. 133W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber [J]. Opt Engng, 2006, 45(1): 010502/1-010502/2.
- [6] YE Ch G, GONG M L, YAN P, et al. Linearly-polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power [J]. Optics Express, 2006, 14(17): 7604-7609.
- [7] CHEN M Y, CHANG Y C, GALVANAUSKAS A, et al. 27mJ nanosecond pulse in M² = 6.5 beam from a coiled highly multimode Yb-doped fiber amplifier [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Francisco; CLEO, 2004: 1-2.
- [8] GALVANAUSKAS A, CHENG M Y, HOU K Ch, et al. High peak power pulse amplification in large-core Yb-doped fiber amplifier [J]. Selected Topics in IEEE J Q E, 2007, 13(3): 559-566.
- [9] YE Ch G, YAN P, GONG M L, et al. Pulse pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(5): 249-250.
- [10] MARCIANTE J R, ZUEGAL J D. High-gain, polarization-preserving, Yb-doped fiber amplifier for low-duty-cycle pulse amplification [J]. Appl Opt, 2006, 45(26): 6798-6804.

(上接第531页)

- [8] LI Y Zh, QIAN L J, LU D Q, et al. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(1): 957-963.
- [9] KURKOV A S, BABIN S A, LOBACH I A, et al. Mechanism of mode coupling in multicore fiber lasers [J]. Opt Lett, 2008, 33(1): 61-63.
- [10] LI Y Q, CUI M. Optical waveguide theory and technology [M]. Bei-

jing: Posts and Telecom Press, 2002: 93-100 (in Chinese).

- [11] TONG L M, LOU J Y, MAZUR E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [12] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2000: 91-99.