

文章编号: 0258-7025(2009)03-0658-05

具有高非线性和大有效模场面积的多固体 芯集束型光子晶体光纤

程同蕾¹ 柴路¹ 栗岩锋¹ 宋振明¹ 李曙光² 胡明列¹ 王清月¹

(¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
²燕山大学理学院亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出了以硅为基质、高折射率铋化合物作为纤芯的多固体芯集束型光子晶体光纤(PCF)。该类光纤利用全内反射型机制将传输光场约束在高折射率固体棒芯中,并能输出相同强度的光。通过数值模拟分析了集束六芯六角形和集束八芯四方形两种光子晶体光纤的有效模场面积和非线性系数随抽运波长以及纤芯直径的变化规律,证明了这种光纤同时具有等效的高非线性和大的有效模场面积的特性,可以用于实现高功率频率变换。

关键词 材料; 多芯光子晶体光纤; 高非线性; 有效模面积; 高功率

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0658

Novel Cluster-Solid-Core Photonic Crystal Fiber with High Nonlinearity and Large Effective Mode-Field Area

Cheng Tonglei¹ Chai Lu¹ Li Yanfeng¹ Song Zhenming¹

Li Shuguang² Hu Minglie¹ Wang Qingyue¹

¹Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instrument and Optoelectronics
Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information
and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

²Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan
University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The novel cluster-solid-core photonic crystal fiber (PCF) is proposed, which is structured by the bismuth silicate glass cores with a higher refractive index and the fused silica base with a lower refractive index. In particular, the guiding is only localized in the cluster-solid-core region by the total internal reflection (TIR). While the same power output from each solid-core in the PCF can be obtained. The nonlinearity and the mode field area of the cluster-six-core PCF and the cluster-eight-core PCF versus the pump wavelength and the core diameter are discussed by numerical simulation. The results show that the novel PCF designs have the specialities of the equivalently higher nonlinearity and the effectively large mode-field area, and can offer a significant potential in high-power frequency transform.

Key words materials; cluster-solid-core photonic crystal fiber; highly nonlinear; large mode field area; high power

1 引 言

自光子晶体光纤(PCF)问世以来,由于其独有

的特性,在一些领域已经被广泛应用^[1~6]。特别是被用于超连续产生^[7~9],并已经形成商品化的白光

收稿日期: 2008-09-28; 收到修改稿日期: 2008-11-05

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314904, 2006CB806002), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家自然科学基金(60678012), 高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073), 教育部科技重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 程同蕾(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事高功率下的频率变换等方面的研究。E-mail: chengtong-lei@163.com

导师简介: 柴路(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超快激光等方面的研究。E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

激光器^[10]。目前超连续产生一般使用的是高非线性的 PCF, PCF 的高非线性来自于 PCF 中光场能被高度局域在很小的芯区, 从而可以极大地提高其有效非线性系数, 一般是普通光纤的几十倍以上。关于高非线性 PCF 的研究已有相当多的文献报道。N. Sugimoto 等^[11]报道了掺杂 Bi_2O_3 高非线性光纤的非线性系数可达到 $1360 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; J. Y. Y. Leong 等^[12]报道了以硅化物为基质的小芯径 PCF, 其非线性系数可达到 $1860 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 除了通过减小纤芯增大 PCF 的非线性外, 还可以通过高掺杂折射率的纤芯来增大 PCF 的非线性, 比如掺杂硫化物和亚硅酸盐的光纤^[13~15]。

然而, 缩小芯径固然可以增加光纤的非线性, 但是同时要求将抽运光聚焦在更小的芯区, 这就使芯区上的功率密度很高, 容易导致光纤端面的损坏, 这对于实现高功率白光光源是一个限制。如果增加芯区面积, 势必造成 PCF 的非线性系数变小, 这样, 若维持原有的频率转换效率, 就必须增加抽运功率, 使成本大大增加。为使 PCF 既能承受高功率抽运又使其非线性保持很大, 本文提出一种同时具有高非线性和大有效模场面积的多固体芯集束光子晶体光纤设计方案, 并进行了详细的数值模拟和特性分析。该 PCF 以硅作为基质, 高折射率的铋化合物 (Bi_2O_3) 作为纤芯, 其中 Bi_2O_3 掺杂质量分数为 65.5%, 折射率 $n = 2.219$ ^[16], 将整个集束的 Bi_2O_3 纤芯称为“芯区”。当抽运光聚焦在整个芯区时, 由于全内反射作用, 光仅仅被限于在各个高折射率的固体小芯中传输。每个芯径在微米量级, 仍然保持与传统单芯 PCF 相同的高非线性的特性, 而就整根光纤的等效非线性则为集束芯数倍。此外, 由于集束的芯区面积远大于单芯光纤, 因此该光纤能够承受更高的抽运功率。由此, 这种新型 PCF 能够被用来实现高功率频率变换。

2 基本理论与光纤设计

已经有相当多的文献计算过 PCF 的非线性^[17~19]。当强度为 P 的光通过长度为 L 的 PCF 时, PCF 的非线性可表示为

$$N = \gamma LP, \quad (1)$$

其中 γ 是 PCF 的非线性系数, 可以表示为^[20]

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中 ω_0 为入射光的角频率, c 为真空中的光速, λ 为入射光的波长, n_2 为光纤的非线性折射率系数, A_{eff}

为有效模场面积。掺铋化合物的 n_2 可计算为^[21]

$$n_2 = \frac{12\pi^2}{n^2 c} \left(\frac{n^2 - 1}{4\pi} \right)^2 \times 10^{-10}, \quad (3)$$

其中, n 为掺铋化合物的线性折射率, 计算可得 $n_2 = 7.60 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$; A_{eff} 可以表示为^[20]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint_{\text{core}} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_{\text{core}} |F(x, y)|^4 dx dy}, \quad (4)$$

式中 $F(x, y)$ 是光传播时的横向电场分布。当光在多芯 PCF 中传播时, 每个小芯的有效模场面积可通过(4)式算出。多芯集束 PCF 总的有效模场面积可以看成是每个小芯有效模场面积之和, 则其承受的抽运功率也是每个小芯能够承受抽运功率的总和。

设计的两种多固体芯集束型 PCF 的横截面如图 1 所示, 图 1(a) 为六角型结构, 图 1(b) 为正方形结构。该光纤采用折射率为 1.45 的硅作为基质, 纤芯是高折射率的掺 Bi_2O_3 介质。在 PCF 的中心不设置高折射率固体芯, 这是因为中心的固体芯与周围固体芯的边界条件不同, 中心固体芯将汇聚更多的光在其内传输, 从而导致输出光强不一致, 以至于当高功率抽运时中间固体芯先于其他固体芯被破坏。

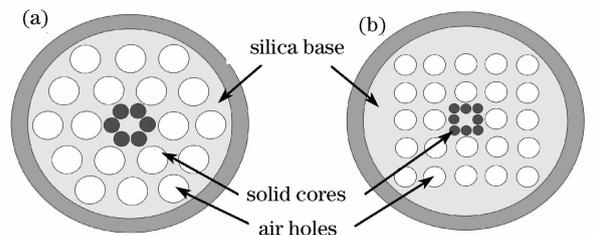


图 1 两种多固体芯集束 PCF 的横截面示意图

(a) 六芯六角形结构; (b) 八芯正方形结构

Fig. 1 Two schematics of cluster-solid-core PCF with

(a) six-core of hexagonal unit and

(b) eight-core of quadrate unit

3 结果与讨论

在讨论 PCF 有中心固体芯和无中心固体芯的光场分布特性时, 假如将图 1(a) 结构的 PCF 中间再加个固体芯, 变成中间没有“空洞”的七固体芯结构, 当用 800 nm 的光源分别抽运到无中心固体芯的六芯结构(图 1(a))和有中心固体芯的七芯结构的中心位置时, 得到的输出光强分布分别如图 2(a), (b) 所示。从图中看出, 有中心固体芯的七芯结构的输出光强分布特征: 中心固体芯输出的光强比周围的

六个芯要大很多,其纤芯输出强度为 6.918×10^{17} W,而周围的六个小芯的输出强度为约 2.103×10^{17} W,输出总功率为 19.536×10^{17} W。因此,当用高功率光源抽运时很容易造成中间芯承受的功率过高而先被损坏,达不到和周围六小芯一起承受传输功率的目的。无中心固体芯的六芯结构的输出光强特征:每个固体芯输出光强同为 3.852×10^{17} W。因此,各个芯可以共同承担高功率抽运和传输。该结

构计算出的输出总功率为 23.112×10^{17} W,与有中心固体芯的七芯结构相比输出总功率不但没有减少,反而有所增加,这主要是因为有中心固体芯的结构在中间芯和外围芯之间存在较多的模式限制损耗,而无中心固体芯结构则有较少的这种损耗。这种能够同时传输等强度光束和承受较大抽运功率的特性就是本文设计的 PCF 的优点。同理可以对图 1(b)的结构进行同样分析。

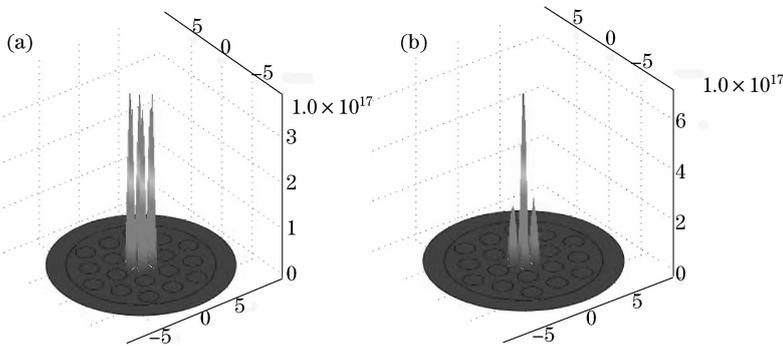


图 2 PCF 中的光场分布图。(a)有中心固体芯的 PCF 结构;(b)无中心固体芯 PCF 结构

Fig. 2 Distribution of power in the PCFs. (a) without a center solid-core in the PCF;
(b) with a center solid-core in the PCF

利用有限元方法的 COMSOL 软件对光在光纤中传输时的强度分布特性进行计算。图 3(a)~(c)分别表示传统单芯结构、本文设计的六芯六角形和八芯四方形结构的 PCF(光纤参数为:高折射率小芯棒直径 $d=1.60 \mu\text{m}$,棒间距 $\Delta_1=1.80 \mu\text{m}$,周围包层空气孔直径 $D=2.00 \mu\text{m}$,空气孔间距 $\Delta_2=$

$3.00 \mu\text{m}$) 在 800 nm 平顶型光束抽运下的输出端光强分布图。从图中可以看出输出光场分布在高折射率的固体小芯中,而且, N 个小芯集束型 PCF 传输的光功率可以是传统单芯 PCF 的 N 倍,这对于获得高功率超连续白光源是十分有益的。

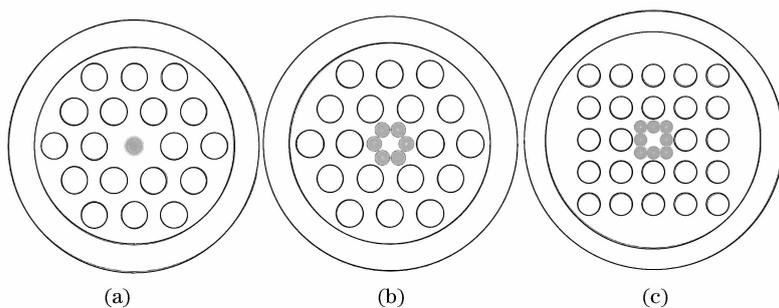


图 3 光强在不同 PCF 中的分布。(a)传统单芯 PCF;(b)集束六芯六角形 PCF;(c)集束八芯四方形 PCF

Fig. 3 Power distribution in the PCFs. (a) conventional single-core;
(b) clustered six-core; (c) clustered eight-core

最后讨论集束型 PCF 的有效模场面积和非线性系数与抽运波长和固体芯径之间的演变规律。图 4(a)~(c)分别表示传统单芯结构、六芯六角形和八芯四方形结构 PCF 的有效模场面积随抽运波长和固体芯径的变化关系。其中,所有的掺 Bi_2O_3 的小纤芯棒直径分别取 $d_1=1.50 \mu\text{m}$, $1.60 \mu\text{m}$ 和 $1.70 \mu\text{m}$, 而包层空气孔直径和空气孔间隔分别取定值

$D=2.00 \mu\text{m}$ 和 $\Delta_2=3.00 \mu\text{m}$;对于集束型 PCF 的小纤芯棒间隔参数 Δ_1 ,取定值 $\Delta_1=1.80 \mu\text{m}$ 。

由图 4 可见,有效模场面积随着抽运波长和芯径的增加而增大,而增大的模场面积使光纤的非线性系数减小,见图 5 所示。由于上述三种 PCF 的小芯径具有相同的参数,所以三种光纤结构的单芯非线性系数相同。图 5 表示的是三种结构 PCF 的非线

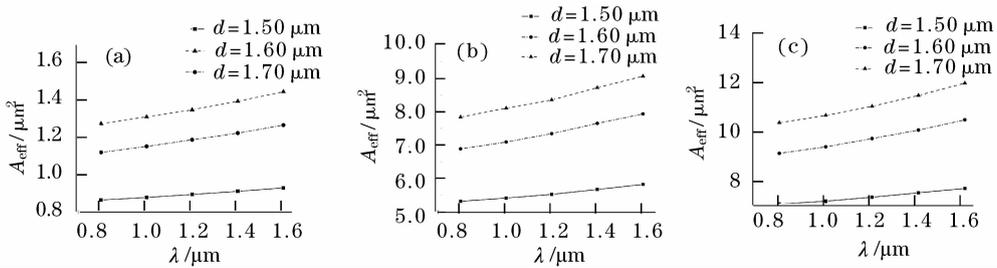


图 4 有效模场面积随抽运波长和固体小芯直径的变化关系。(a)传统单芯 PCF; (b)集束六芯六角形 PCF; (c)集束八芯四方形 PCF

Fig. 4 Dependence of the effective mode field area on the pump wavelength and core diameter in the PCFs, with (a) conventional single-core; (b) clustered six-core; (c) clustered eight-core

性系数与抽运波长和芯径的成反比关系。在纤芯直径取 $D=1.50 \mu\text{m}$ 和抽运波长 $\lambda=0.80 \mu\text{m}$ 时,单芯非线性系数可达 $6826.89 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。对于传统单芯结构,其有效模场面积仅为 $0.87 \mu\text{m}^2$,而对于集束六芯六角形和集束八芯四方形结构的 PCF,其非线性系数相当于分别增加了 6 倍和 8 倍,有效模场面积分别为 $5.32 \mu\text{m}^2$ 和 $7.07 \mu\text{m}^2$,也增加了大约 6 倍和 8 倍。这充分体现了多芯集束型 PCF 的主要优点,即同时具有等效高非线性和有效大模场面积的特点,能够在实现高功率超连续产生方面得到应用。

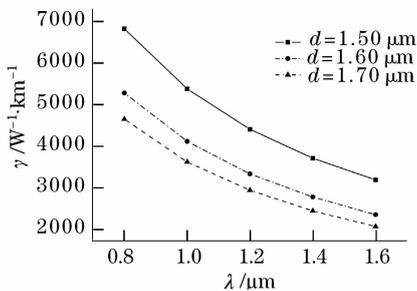


图 5 非线性系数 γ 随抽运波长和固体小芯直径的变化关系
Fig. 5 Dependence of the nonlinearity coefficient on the pump wavelength and the solid-core diameter

4 结 论

提出两种基于掺杂高折射率 Bi_2O_3 化合物的多固体芯集束型 PCF。该类光纤由于全内反射型导光机制,使传输光场被限制在高折射率固体芯中;并讨论了该类光纤的非线性系数和有效模场面积随抽运波长和芯径的变化关系;与传统单芯 PCF 相比,该类 PCF 的优势在于等效提高了非线性系数和有效模场面积,因此有效解决了在传统单芯 PCF 中获得高非线性和承受抽运功率的矛盾,为实现高功率频率变换器件提供了一种解决方案。

参 考 文 献

- Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):57~66
- S. O. Konorov, A. M. Zheltikov, M. Scalora. Photonic-crystal fiber as a multifunctional optical sensor and sample collector[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3454~3459
- F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20):2754~2756
- Liu Shengli, Li Yigang, Gao Yanli *et al.*. High-power widely tunable Yb-doped photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1663~1667
刘胜利,李乙钢,高艳丽等. 高功率宽调谐范围掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1663~1667
- Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):17~20
段德稳,朱涛,饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):17~20
- Li Shuguang, Cheng Tonglei, Zhang Huanping *et al.*. Effect of power saturation on spectrum expanding in normal dispersion region of microstructured fiber by femtosecond laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1041~1044
李曙光,程同蕾,张焕平等. 微结构光纤正常色散区飞秒激光脉冲传输光谱展宽的功率饱和效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1041~1044
- S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1356~1358
- J. C. Knight, D. V. Skryabin. Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15365~15376
- Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Enhanced spectral broadening by femtosecond pulses in large-air-filling fraction microstructure fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1429~1432
胡明列,王清月,栗岩峰等. 飞秒激光在大空气比微结构光纤中增强的非线性光谱展宽[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1429~1432
- Fianium Ltd, UK, <http://www.fianium.com>
- N. Sugimoto, T. Nagashima, T. Hasegawa *et al.*. Bismuth-based optical fiber with nonlinear coefficient of $1360 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ [C], *OFC 2004, Los Angeles, California, USA*, PDP26
- J. Y. Y. Leong, P. Petropoulos, S. Asimakis *et al.*. A lead silicate holey fiber with $\gamma = 1860 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ at 1550 nm [C]// *CLEO 2005, Optical Society of America, USA*, PDP22

- 13 G. Lenz, J. Zimmermann, T. Katsufuji *et al.*. Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 254~256
- 14 S. Kim, T. Yoko, S. Sakka. Nonlinear optical properties of TeO₂-based glasses; La₂O₃-TeO₂ binary glasses [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1993, **76**(4): 865~869
- 15 Ming Chen, Shizhong Xie. New nonlinear and dispersion flattened photonic crystal fiber with low confinement loss [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(4): 2073~2076
- 16 H. Ebendorff-Heidepriem, P. Petropoulos, S. Asimakis. Bismuth glass holey fibers with high nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5082~5087
- 17 T. Hasegawa, T. Nagasima, N. Sugimoto *et al.*. Bismuth-based extra-high nonlinear optical fiber [C]. *CLEO 2005, Optical Society of America, USA, CFC2*
- 18 P. Petropoulos, H. Ebendorff-Heidepriem, V. Finazzi. Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26): 3568~3573
- 19 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Academic Press, 1995
- 20 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics*[M]. Academic Press, 1992.
- 21 T. Hasegawa, T. Nagashima, N. Sugimoto. Determination of nonlinear coefficient and group-velocity-dispersion of bismuth-based high nonlinear optical fiber by four-wave-mixing[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(4): 782~787

《中国激光》“激光医学与生物光子学”专题征稿启事

光学技术特别是激光技术的快速发展给生物医学成像、传感以及诊断学领域带来了重大变革,并产生了巨大影响。激光医学与生物光子学作为一门新兴的交叉性学科,为生物医学的应用发展及基础理论研究提供了有利的条件。它结合多个学科,探索光子学技术在生物研究及医学诊断与治疗中的应用,已成为国际上迅速发展的领域并取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于2009年9月正刊上推出“激光医学与生物光子学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“激光医学与生物光子学”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域基础理论的研究进展以及最先进的临床试验水平。

征稿范围包括:

- 激光医学与生物光子学的基础研究
- 激光治疗
- 生物光学成像技术
- 非侵入性光学诊断
- 生物光学传感技术
- 生物光学器件
- 光动力学疗法
- 其他

截稿日期:2009年6月30日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“激光医学与生物光子学”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部