

文章编号: 1001-3806(2005)06-0596-03

## 高功率光子晶体光纤激光器及其关键技术

邓元龙<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1\*</sup>, 阮双琛<sup>2</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>

(1. 天津大学 精密仪器学院 激光及光电子研究所, 天津 300072; 2. 深圳大学 工程技术学院, 深圳 518060)

**摘要:** 与常规双包层光纤相比, 空气包层大模面积光子晶体光纤更适用于高功率激光器的研制。介绍了高功率光子晶体光纤激光器研究的最新进展, 分析了耦合系统和谐振腔设计中所存在的不利于功率提高的因素, 指出低损耗的熔接技术是光子晶体光纤激光器达到更高功率的关键。

**关键词:** 光纤激光器; 光子晶体光纤; 高功率; 大模面积; 熔接

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A

## High power photonic crystal fiber laser and key issues

DENG Yuan-long<sup>1,2</sup>, YAO Jian-quan<sup>1</sup>, RUAN Shuang-chen<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>

(1. Institute of Laser & Optoelectronics Engineering, College of Precision Instrument Tianjin University, Tianjin 300072, China  
2. School of Engineering & Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract** The air-clad large mode area photonic crystal fibers have more advantages than conventional fibers for application in high power fiber lasers. The research progress of high power PCF lasers is briefly introduced, then the drawbacks existed in the design of coupling system and resonant cavity are analyzed. Finally it is pointed out that PCFs splicing with low loss is the key issue in the further research of higher power fiber lasers.

**Key words** fiber lasers; photonic crystal fibers; high power; large mode area; splicing

### 引 言

光子晶体光纤<sup>[1~3]</sup> (photonic crystal fibers-PCFs) 以其独特的、普通光纤所不具备的光学特性成为近年来热门研究课题。PCFs 又称微结构光纤 (microstructured fibers-MOFs) 或多孔光纤 (hollow fibers-HFs), 是在石英光纤中沿轴向规律地排列着空气孔, 根据导光机理不同, 可以分成两大类: (1) 折射率引导型 (total internal reflection PCFs-TIR-PCFs), 通过纤芯与多孔包层区域之间的全内反射原理导光<sup>[4,5]</sup>, 固体纤芯折射率略高于包层, 包层中的空气孔可以随即分布; (2) 严格的周期空气孔结构产生的光子带隙效应 (photonic bandgap-PBG) 限制光在低折射率的纤芯区域传输——PBG-PCFs<sup>[6,7]</sup>。在光子晶体光纤激光器中主要应用 TIR-PCFs。

通过改变包层中空气孔的大小  $d$ 、间距  $\Lambda$  和分布形式, 可以灵活控制 PCFs 很多独特的光学性能, 例如在很大波长范围内维持单横模传输<sup>[5]</sup>; 选择零色散点

在可见光和近红外波段; 利用极小的纤芯<sup>[8]</sup> (芯径可小于  $1\mu\text{m}$ ) 产生很强的非线性效应从而在非线性和非线性光学领域获得广泛应用; 大模场面积<sup>[9]</sup> (约  $350\mu\text{m}^2$ ) PCFs 不但可以避免非线性光学效应的产生, 而且可以实现低损耗单模传输, 适用于高功率激光器的研制, 而光束质量好的高功率光纤激光器在材料加工、光通讯等领域有极大的应用潜力。作者将主要结合这种大模面积 PCFs 的特点, 系统介绍高功率光子晶体光纤激光器的最新进展, 并分析所存在的问题和亟待解决的关键技术。

### 1 大模面积光子晶体光纤

优化光纤结构设计, 提高抽运光耦合效率、降低非线性效应、高的斜效率和较好的热量处理能力, 对高功率光纤激光器研制非常重要。因此, 高功率激光器中的光纤应具有以下特点: 数值孔径大、模场面积大、较短的长度、热载荷低、抽运光吸收系数大和使用耐高温材料。与常规双包层光纤相比, PCFs 更容易满足这些要求, 下面以最新报道用于高功率激光器的 LMA-PCFs<sup>[9]</sup> 为例说明。

图 1 所示六角形空气硅双包层 PCFs<sup>[9]</sup> 的参数为: 三角形纤芯直径约  $28\mu\text{m}$ , 相应实测模场面积达到  $350\mu\text{m}^2$ , 内包层直径  $150\mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.18$  纤芯和内包层数值孔径分别为 0.05 和 0.55, 外包层直径  $450\mu\text{m}$ 。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (031809); 广东省高校自然科学基金资助项目 (Z02062)

作者简介: 邓元龙 (1971-), 男, 讲师, 在职博士研究生, 研究方向为高功率光纤激光器。

\* 通讯联系人。E-mail: jayao@tju.edu

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2004-12-13

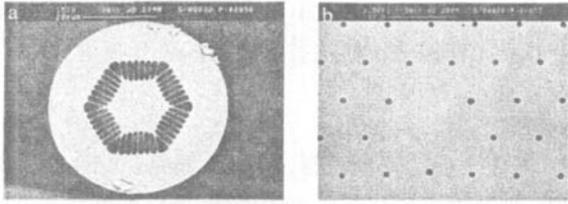


图 1 a—空气包层大模面积光子晶体光纤横截面图 b—纤芯部分

纤芯  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂原子数分数为 0.6%，采用  $\text{Al}^{3+}$  共掺以增加  $\text{Yb}^{3+}$  的溶解，同时掺氟用来补偿掺  $\text{Yb}^{3+}$  引起的纤芯折射率的增加，使掺杂后纤芯折射率接近纯硅，在相对较高的掺杂原子数分数下相对折射率差不超过  $2 \times 10^{-4}$ ，结合适当设计的  $d/\Lambda$ ，从而保证了激光器在大模面积条件下的单横模运转。独特的横截面设计能有效抑制螺旋光传输，对 976nm 抽运光吸收达到 9.6dB/m，相对于同等条件下常规光纤 2dB/m 的吸收效率，可以大大降低激光器所需要的光纤长度。由于采用了大空气孔的硅网结构，外包层折射率接近 1，所以在相同内包层尺寸情况下比常规双包层光纤更容易实现大的数值孔径，或者说在保证较高数值孔径的前提下，可以降低内包层的尺寸，从而进一步减少光纤长度。在相同芯径和功率级别时，数值孔径从 0.46 提高到 0.55 意味着可以减少 40% 的光纤长度<sup>[10]</sup>。而且纯硅-空气结构比常规双包层光纤的尼龙类材料更能胜任千瓦级以上的光功率输出。

## 2 高功率 PCF 激光器

限于 PCFs 熔接等技术工艺上的困难，目前所报道的 PCF 激光器多采用线形 F-P 腔结构，如图 2 所示。

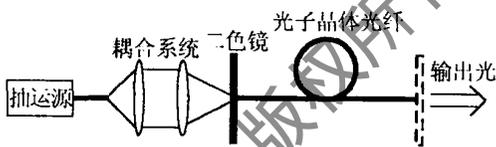


图 2 光子晶体光纤激光器原理图

大功率多模半导体激光器 LD 尾纤输出的抽运光经准直、聚焦后耦合进 PCFs 的内包层，对抽运光高透对信号光高反的二色镜 DM 作为输入腔镜，紧贴光纤端面，另一光纤端面约为 4% 的 Fresnel 反射或者 DM 作为输出端反馈。

2000 年，第 1 台 PCF 激光器问世<sup>[11]</sup>，2001 年，英国 Southampton 大学的 FURUSAWA 等人报道了第 1 台 IMA-PCF 激光器<sup>[12]</sup>，所用圆对称双包层 (air-clad) PCFs 如图 3 所示，内包层数值孔径 NA 约为 0.3~0.4，模场直径 12.3 $\mu\text{m}$ ， $d/\Lambda = 0.3$  为了增加对抽运光的吸收采取了偏芯设计，并且分析了大模场面积条件下实现单横模运转所需要的  $d/\Lambda$ 。激光器结构如图 2 所示，分别用 Ti 宝石和半导体激光器抽运 4.5m 和 7.5m 长光纤，获得 1W 以上的 CW 输出，斜效率超过

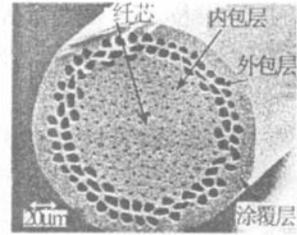


图 3 掺 Yb 光子晶体光纤

80%。在此基础上通过腔内声光器件实现了调 Q 和锁模运转。

2003 年 4 月，德国和丹麦的研究人员报道了波长 1070nm、输出功率达到 80W、斜率效率为 78% 的高功率 PCF 激光器<sup>[9]</sup>。所使用的空气包层 PCFs 如图 1 所示，该激光器结构如图 2 所示，用带尾纤 (400 $\mu\text{m}$ ， $\text{NA} = 0.22$ ) 输出 976nm 的大功率 LD 双端抽运，耦合效率为 55%，激光阈值大约 0.75W，2.3m 的光纤长度即可实现对入纤抽运光的完全吸收。光束质量  $M^2 \approx 1.2$  接近衍射极限。光纤中的功率密度达到 35W/cm<sup>2</sup>，没有出现任何热光问题。在同样的 PCFs 和激光结构的情况下，他们又采用更大功率的抽运源，在 4m 长的光纤中获得 260W 的激光输出<sup>[13]</sup>，功率密度升高到 65W/cm<sup>2</sup>，仍然没有观察到任何热光问题，用有限元方法 (FEM) 对 PCFs 横截面温度场分布进行了理论分析与数值计算，结果表明，纤芯温度主要由光纤外表面的散热能力所决定，增大光纤外径是最简单的方法。因此，这种空气包层 PCFs 完全可以用于制作千瓦级激光器。

国内的深圳大学<sup>[14~16]</sup>和南开大学<sup>[17]</sup>等单位也开展了高功率 PCF 激光器的研究，其中阮双琛等人<sup>[16]</sup>在抽运功率为 60W 时获得 15W 的激光输出，实验装置如图 2 所示，所用掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层 PCFs 长度为 20m，内包层直径 200 $\mu\text{m}$ ，外包层为 380 $\mu\text{m}$ ， $\text{Yb}_2\text{O}_3$  的质量分数为 1.5%。

## 3 问题分析及关键技术展望

激光器输出功率主要由抽运源功率、谐振腔质量和耦合系统效率所决定，图 2 所示线形谐振腔结构简单，可以实现较高的功率输出，但在进一步提高功率到千瓦量级时其谐振腔体和耦合系统的设计都存在一些不利因素。

(1) 抽运光聚焦于端面及以端面作为输出腔镜，对光纤端面加工质量要求较高，而多孔的 PCFs 端面无法直接清洁、抛光，任何一点缺陷或者碎片都容易使端面被大功率激光烧坏。因此在高功率激光器中应使用端面密封 (sealed-end) PCFs，即使用  $\text{CO}_2$  激光器烧熔其端面达到密封的目的，等效于一个平面透镜紧贴端面而不破坏其原有结构，从而可以像常规光纤一样

抛光、清洁。不过这一技术主要由世界上少数几家 PCFs 生产厂商掌握,没有任何技术工艺方面的公开报道。

(2) 使用镀膜二色镜提供反馈,聚焦后的抽运功率密度以及产生的激光功率密度极高(约在  $109\text{ W}/\text{m}^2$  以上),极易把镀膜打坏。与此相比,采用分布式光纤布喇格光栅(DBG)提供激光反馈,具有反馈效率高(可达 100%),输出谱线窄、中心反射波长可以精确控制、反射带宽可以任意选择以及易于集成等优点。2003年 8月, CANNING 等人报道了第 1台全光纤 PCF 激光器<sup>[18]</sup>,使用 ArF 准分子激光器 193nm 紫外光直接在 17cm 长掺  $\text{Er}^{3+}$  PCFs 两端刻蚀 1cm 长 DBG,作为谐振腔镜。但此方法通用性差,尚不成熟,更具有普遍性意义的方法是先在普通多模光纤上刻蚀 DBG,多模光纤一端与 PCFs 熔接,另一端拉成锥度与 LD 的尾纤直接耦合。

(3) 与常规光纤激光器相比,PCFs 激光器的抽运技术相对落后,目前尚无侧面抽运的报道,基本上以透镜聚焦、端面耦合方法为主,不利于激光器集成化,无法使用多个 LD 同时抽运,而且实验系统调整精度要求很高,影响系统的稳定性。对于更大功率的光纤激光器,最有发展潜力的耦合技术是采用树枝状结构(tapered fiber bundle)<sup>[19]</sup>,多个带尾纤大功率多模 LD 抽运源,通过尾纤与树枝状结构分别相连,然后通过多模耦合器传输抽运光进入 PCFs。避免了端面抽运中的耦合系统,提高了系统的耦合效率、稳定性和可靠性。此方法除了树枝状结构制作有难度之外,也必然涉及到 PCFs 与普通光纤的熔接问题。

PCFs 低损耗熔接非常重要,是 PCFs 获得各种实际应用必须解决的关键技术。2003年, CHONG 等人详细报道了使用 20W  $\text{CO}_2$  激光器实现 PCFs 和标准单模光纤熔接的技术<sup>[20-21]</sup>,两种光纤的外直径分别为 100 $\mu\text{m}$  和 125 $\mu\text{m}$ ,纤芯直径约为 9 $\mu\text{m}$  和 11.57 $\mu\text{m}$ ,熔接过程分为预加热、对准、熔接和退火,不考虑模场失配造成的传输损耗,实验结果表明,熔接损耗约为 0.6dB~0.9dB。特别值得注意的是,该研究报告指出使用约 1W 功率的激光垂直照射 PCFs 可以清洁表面灰尘,同时可以加热致干进入空气孔的液体清洁剂。也有用市售电弧光纤熔接机<sup>[22]</sup>,分别实现了 PCFs 之间及与标准单模光纤(SSMF)的熔接,给出了具体参数和实验结果,包括电弧持续时间、间隔、预处理时间、熔接损耗和抗张力强度,PCFs 与 SSMF 之间的熔接损耗为 0.7dB~1.1dB,PCFs 之间的熔接损耗低到 0.08dB,但对工艺参数比较敏感,不同光纤的模场失配会造成总的连接损耗有较大波动。

在 PCFs 熔接过程中,空气孔的塌陷变形是影响

熔接最关键问题,对于图 1 所示的空气包层、大模面积 PCFs 尚无任何关于熔接技术方面的公开报道。

## 4 结 论

与传统高功率激光器,如  $\text{CO}_2$  和 Nd:YAG 激光器相比,光纤激光器具有光束质量好、可靠性高且易于维护的优点,在材料加工等很多工业领域有极大的应用潜力。PCFs 由于其灵活的光学可控性和采用纯硅-空气结构,在实现大数值孔径和大模场面积的同时,保证单横模运转,且耐热性能好,比常规双包层光纤更适用于高功率激光器的研制。随着 PCFs 熔接、端面处理等关键技术的改进与发展,高功率 PCF 激光器的理论与应用研究必将更加深入、广泛。

## 参考文献

- [1] BROENG J, MOGILEVSTEY D, BARKOU S E *et al*. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides [J]. *Opt Fiber Technol* 1999, 5(3): 305-336.
- [2] KNIGHT J C, RUSSELL P S J. Photonic crystal fibers: new ways to guide light [J]. *Science* 2002, 296(5566): 276-277.
- [3] 潘玉寨, 张 军, 胡贵军 *et al*. 光子晶体光纤及其激光器 [J]. *激光技术*, 2004, 28(1): 48-51.
- [4] KNIGHT J C, BRKS T A, RUSSELL P S J *et al*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett* 1996, 21(19): 1547-1549.
- [5] BRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett* 1997, 22(13): 961-963.
- [6] KNIGHT J C, BROENG J, BRKS T A *et al*. Photonic band gap guidance in optical fiber [J]. *Science* 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [7] CREGAN R F, MANGAN B J, KNIGHT J C *et al*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science* 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [8] BRODERICK N G R, MONRO T M, BENNETT P *et al*. Nonlinearity in holey optical fibers: Measurement and future opportunities [J]. *Opt Lett* 1999, 24(20): 1395-1397.
- [9] LMPERT J, SCHREIBER T, NOLTE S *et al*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Express* 2003, 11(7): 818-823.
- [10] KRISTIANSEN R E, BROENG J. Air-clad photonic crystal fibers for high-power single-mode lasers [EB/OL]. <http://www.phasconferencence.org/materials/air-clad-photonic-crystal-fibers.pdf> 2004-03-15.
- [11] WADSWORTH W J.  $\text{Yb}^{3+}$  doped photonic crystal fibre lasers [J]. *Electron Lett* 2000, 36(17): 1452-1454.
- [12] FURUSAWA K, MALNOWSKI A, PRICE J H V *et al*. Cladding pumped ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding [J]. *Optics Express* 2001, 9(13): 715-720.
- [13] LMPERT J, SCHREIBER T, LEM A *et al*. Theoretical optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high-power operation [J]. *Optics Express* 2003, 11(22): 2982-2990.
- [14] 林浩佳, 阮双琛, 程 超 *et al*. 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层大模面积光子晶体光纤激光量的研究 [J]. *光子学报*, 2004, 33(7): 797-798.
- [15] 阮双琛, 杨 冰, 朱春艳 *et al*. 2 W 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光子晶体光纤激光器 [J]. *光子学报*, 2004, 33(1): 15-16.
- [16] 阮双琛, 林浩佳, 杜晨林 *et al*. 15W 光子晶体光纤激光器的研究 [J]. *光子学报*, 2004, 33(6): 768.

(下转第 651 页)

情况。通过实验得到两个典型的图形,见图 6a和图 6b,它们分别对应着图 2和图 3输出情况下的 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体。

如图 6a和图 6b所示,晶体 1在快消光的一瞬间光斑变化是均匀的,需要转动的消光角  $\phi$  也小,而晶体 2在快消光的一瞬间,光斑变化是不均匀的,出现了光斑畸变,所需转动的  $\phi$  角相对也稍大。 $\phi$  角大小实际上也反映了晶体内部消光比的大小<sup>[9]</sup>。通过计算,两个晶体的消光比分别为 38dB, 35dB, 虽然从消光比上可以区分出晶体的好坏,但之所以用应力双折射作为衡量晶体质量的关键指标,就在于用该方法可以清楚地用肉眼看到不良晶体的光斑情况,简单方便,便于生产中快速大量的检验,避免消光比测量装置的复杂以及烦杂计算的麻烦。由于应力双折射实际上反映的是晶体内部折射率的不均匀性,又由于双折射测量可以达到  $10^{-8}$  的精度<sup>[10]</sup>,因此,可以将材料内部的细小变化反映出来。

## 4 结 论

应力双折射测量的方法是挑选高质量晶体的有效方法,对于解决降低激光非线性输出有较大的作用。但需要注意的是,激光晶体内部应力双折射并不是引起激光非线性输出的唯一因素,其它如激光腔的设

计<sup>[11]</sup>、抽运光的稳定性、倍频晶体的选择都是非常关键的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 王长青,沈德元,卢建仁 *et al*. 激光二极管泵浦的 1.34 $\mu$ m 及其腔内倍频红光 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [ J ]. 中国激光, 1997, 24( 7 ): 579~580
- [ 2 ] AGNESIA, PENNACCHIO C, REALIG C *et al*. High power diode pumped Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> laser [ J ]. Opt Lett 1997, 22( 21 ): 1645~1647.
- [ 3 ] 华家宁. LD抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP激光光强高频调制技术 [ J ]. 中国激光, 2002, 29( 5 ): 389~392
- [ 4 ] CHEN Y H, XIONG Zh J, LI M G C *et al*. High efficiency Nd:YVO<sub>4</sub> laser end-pumped with a diode laser bar [ J ]. Proc SPIE, 1999, 3898 148~155.
- [ 5 ] ASUNDIA S, YUAN P X, CHEN Y H *et al*. Study of the thermal effects of diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> solid-state laser [ J ]. Proc SPIE, 1999, 3898 178~185
- [ 6 ] 林岳明,何慧娟. 单频运转的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [ J ]. 光学学报, 1995, 15( 3 ): 371~373.
- [ 7 ] 姚广涛. 激光晶体测试 [ J ]. 激光与红外, 1994, 24( 4 ): 54~56
- [ 8 ] 张敬斌,李国华,赵明山. 消光比自动测量可行性研究 [ J ]. 光电子·激光, 1995, 6( 6 ), 343~374
- [ 9 ] 刘训章,黎高平,杨照金 *et al*. 用单 1/4波片法测量晶体消光比的研究 [ J ]. 中国激光, 1999, 26( 7 ): 599~601
- [ 10 ] 朱劲松,葛传珍,许自然 *et al*. 晶体物理研究方法 [ M ]. 南京:南京大学出版社, 1990. 214
- [ 11 ] 郭明秀,陆雨田. Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP全固化倍频激光器的研究 [ J ]. 激光技术, 2003, 27( 3 ): 236~239
- [ 17 ] 闫培光,李乙钢,张 炜 *et al*. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光子晶体光纤激光器的实验研究 [ J ]. 光电子·激光, 2004, 15( 4 ): 413~415
- [ 18 ] CANNING J, GROOTHOFF N, BUCKLEY E *et al*. A fibre photonic crystal distributed Bragg reflector (PC-DBR) fibre laser [ J ]. Optics Express 2003, 11( 17 ): 1995~2000.
- [ 19 ] 杜卫冲. IPC高功率光纤激光器 [ J ]. 激光与光电子学进展, 2002, 39( 10 ): 36~40.
- [ 20 ] CHONG JH, RAO M K. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [ J ]. Optics Express 2003, 11( 12 ): 1365~1370
- [ 21 ] CHONG JH, RAO M K, ZHU Y N *et al*. An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO<sub>2</sub> laser [ J ]. IEEE Photon Technol Lett 2003, 15( 7 ): 942~944.
- [ 22 ] BOURLIAGUET B, PARÉ C, ÉMOND F *et al*. Microstructured fiber splicing [ J ]. Optics Express 2003, 11( 25 ): 3412~3417.

(上接第 598 页)