

文章编号:1001-5078(2007)07-0589-04

高功率光纤激光器的研究进展

陈苗海

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:文章扼要地介绍国际上高功率光纤激光器的进展状况,重点介绍近几年国内外高功率光纤激光器与放大器的发展水平和动向。

关键词:光纤激光器;高功率光纤激光器;掺镱双包层光纤;大模面积;光子晶体光纤

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Research Progress of High-power Fiber Lasers

CHEN Miao-hai

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The research progress of high-power fiber laser are summarized in brief, and the development level and recent trends of high-power fiber laser within China and abroad are introduced with emphasis.

Key words: fiber laser; high-power fiber laser; Yb-doped double-clad fiber; LMA; PCF

1 概 况

高功率光纤激光器与传统固体激光器相比具有转换效率高、光束质量好、散热方便等优势,是国际上激光技术研发领域的最大热点之一。近几年来,随着单根光纤输出功率的不断提高,高功率光纤激光器的应用前景更为看好,并已在光通信、材料加工和处理、医学、印刷等领域得到迅速的应用,呈现出逐步替代现有传统高功率激光器的趋势。

光纤激光器就是指采用光纤作为激光介质的激光器,通过在光纤基质材料中掺杂不同的稀土离子(Yb, Er, Nd, Tm 等),获得所对应波段的激光输出。对于常规的单模光纤激光器,要求注入到纤芯的泵浦光也必须为单模,这限制了泵浦光的入纤效率,导致光纤激光器的输出功率和效率较低。

双包层光纤和以双包层光纤为基础的包层泵浦技术的出现,是光纤激光器发展中的重大技术突破,为提高光纤激光器的输出功率和转换效率提供了有效的技术途径,改变了光纤激光器只是一种小功率光子器件的历史。双包层光纤是一种具有特殊结构的光纤,它比常规光纤增加了一个内包层,双包层光纤的纤芯一般掺有稀土离子,是单模激光的传输波导。内包层包绕在纤芯的外围,是多模泵浦光的传

输波导,其横向尺寸和数值孔径(NA)都比较大,可以有效地将泵浦光耦合到增益光纤,提高了泵浦光的入纤效率。泵浦光在内包层传输过程中,以折线方式反复穿越纤芯,被纤芯内的稀土离子吸收,产生单模激光,其转换效率可达 50% 以上,掺 Yb(镱)光纤的光-光转换效率可达 80% 以上。这种光纤结构增加了泵浦长度,提高了泵浦效率,从而使光纤激光器的输出功率提高几个数量级。目前,从量子转换效率、抗激光损伤阈值和基底损耗等因素考虑,掺 Yb 石英双包层光纤是实现高功率光纤激光器或放大器的最佳选择。

大模面积(LMA, 亦称大模场)光纤的设计成功,也是高性能光纤发展中的一个重大创新。LMA 光纤的纤芯密度大为降低,有效地抑制了久难解决的热光问题。采用低数值孔径(NA) LMA 光纤的激光器和放大器,可以获得更高功率的衍射限光束质量的激光输出。最近几年,由于双包层、大模面积、高性能掺杂光纤制造技术进展和可靠的 LD 激光泵浦源功率的提高,以及先进的光束整形技术,这

作者简介:陈苗海(1944-),男,工程师,长期从事科技情报研究工作。E-mail:cmh19442532@sina.com

收稿日期:2007-04-16; **修订日期:**2007-04-27

类光纤激光器的连续输出功率有了显著的提高(如图1所示^[1]),已达到千瓦级和数千千瓦级。采用光束组合技术等,有望达到100kW的武器级激光功率。

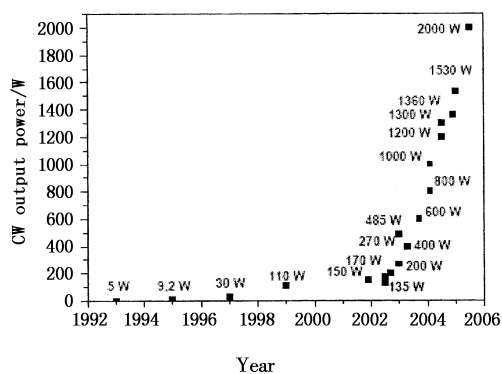


图1 power evolution of cw double-clad fiber lasers with diffraction-limited beam quality over the last decade

光子晶体光纤(PCF)是目前出现的一种新型的光纤,亦称多孔光纤(HF)或微结构光纤(MF),是一种由波长量级的空气孔构成微结构包层的新型光纤。光子晶体光纤(PCF)呈现出许多在常规光纤中难以实现的特性,得益于此类光纤设计的巨大灵活性和高精密性。这些特性包括:具有大波长范围内的单模特性,即所谓的“无截止单模特性”。此特性表明,在理论上 PCF 的模面积在某一波长上按比例可达到无限大。单模掺 Yb 光纤芯径可高达 $50\mu\text{m}$ 。有实验表明,一根微结构低非线性光纤的模场直径可大到 $45\mu\text{m}$;在由微结构形成空气包层制成的双包层光纤中,内包层和外包层之间的折射率差很大,因此数值孔径(NA)远大于常规的聚合物包层光纤;经分析表明,PCF 激光器的衍射限光束质量的高功率输出水平可高达约 10kW,目前限制功率水平的原因不是连续波光纤激光器本身,而是目前可选用的 LD 泵浦源功率。2005 年,这种掺 Yb 双包层 PCF 激光器的衍射限光束质量的功率输出水平已经达到 1530W ^[2]。由此可以认为,PCF 激光器将开创实现高功率掺杂光纤激光器新的光明前景。

2 国外进展

自 1988 年 E. Snitzer 等人提出双包层光纤概念之后^[3],基于这种包层泵浦技术的光纤激光器,国际上在 1999 年以前便实现了 110W 的单模连续激光输出。到 2003 年前后,由于 LMA 光纤技术和高功率泵浦源技术的发展,单根光纤激光器的连续输出功率得以从百瓦量级向千瓦量级发展。国际上率先在这方面做出贡献的科研机构包括:Southampton 大学、Michigan 大学、Tokyo 大学、IPG 光子和 Friedrich Schiller 大学(Jena)研究小组等。

英国 SPI 在 2003 年 8 月制成 1kW (波长 1090nm , $M^2=3$) 的光纤激光器^[4],并于 2004 年 12 月研制成功 1.36kW 连续光纤激光器,并预言通过对掺杂光纤更先进的设计和采用更高功率的泵浦源,单根光纤的输出功率可能高达近万瓦^[5]。该激光器采用双端泵浦 12m 长的双包层光纤(NA 低于 0.05,芯径 $40\mu\text{m}$),采用两个 975nm LD 模块的泵浦源,总泵浦功率为 1.8kW,斜率效率为 83%,输出激光波长在 $1.1\mu\text{m}$ 。光束质量因子 $M^2=1.4$,光束质量接近衍射极限。

美国 IPG 光子公司早在 1999 年制成的各种光纤激光器,其输出功率为 200W 至 1.5kW,至 2003 年可提供的工业级市售产品:掺 Yb 光纤激光器产品包括 200W 单模输出($M^2<1.05$)和 10kW 多模输出($M^2:2\sim40$,视用户功率大小要求而定);掺 Er(铒)光纤激光器产品有单模输出高达 100W,多模输出高达 2kW。2005 年 IPG 在实验室中获得掺 Yb 光纤激光器连续激光输出约 2kW ($1.1\mu\text{m}$, $M^2<1.2$)^[6]。2006 年 12 月 IPG 光纤激光器单模输出功率最高可达 3kW,而多模输出达 50kW 已成为可能^[7]。该公司产品的特点是采用紧凑的集成光学设计,并联式单 LD 模块泵源,机械结构结实和热性能稳定。2004 年 IPG 的光纤激光器销售数量超过 3000 套。目前 IPG 批量生产 300 余种不同型号的光纤激光器。IPG 光纤激光器发展趋势是:提高输出功率(由 20kW 提高到 $(50\sim100)\text{kW}$);改善光束质量(光束参数乘积(BPP)由 $4\text{mm}\times\text{mrad}$ 达到 $2\text{mm}\times\text{mrad}$ 或 $1\text{mm}\times\text{mrad}$);提高效率(插壁效率(WPE)由 25% 提高到 30%);降低价格(由 80 美元/m 降至 $50\sim30$ 美元/m)。

国际上比较著名的光纤激光器制造厂家还包括:德国 IPHT Jena,可以提供 100 余种光纤激光器;丹麦 Crystal Fibre A/S,正在致力于开发高功率 PCF 激光器,目前已能提供高达数百瓦的 PCF 激光器;美国 Nufern 公司是光纤激光器/放大器光路基础模块和特种光纤制造商,2007 年初推出的 MM-EYDF-12/130 双包层钕共掺光纤(波长 1550nm ,大纤芯设计),专供于诸如研发激光雷达用的高功率脉冲光纤激光器和脉冲放大器等。

3 国内进展

近年来,许多国内的科研单位在发展高功率光纤激光器方面,急起直追,在攻克大功率光纤激光器的关键技术,如包层泵浦技术、泵浦耦合技术和光束整形技术等方面取得了进展,尤其是在两年前,国内研制成功高性能掺 Yb 双包层光纤,高性能掺杂光纤的国产化,将有力地促进国内大功率光纤激光器

的研制和推广应用。

上海光机所通过和武汉烽火通信有限科技公司(烽火通信)合作,结合该所在光纤激光技术方面的优势与烽火通信在特种掺杂光纤制作设备和技术上优势,拉制出掺 Yb 大模面积高掺杂浓度双包层光纤(D形内包层,650 μm /600 μm ,NA 为 0.37,芯径为 43 μm)。该所采用由烽火通信提供的 15m 长的国产掺 Yb 双包层光纤(内包层为 D 形 450 μm /400 μm ,NA 为 0.37,芯径为 30 μm),借助于空间滤波和非球面耦合技术,从双端泵浦双包层光纤,在波长 1.1 μm 获得了 444W 的连续激光输出。最近,该所采用最新研制的大模面积双包层光纤,单根光纤获得了 916W 的激光输出^[8-10]。

2006 年,清华大学精密仪器系光子与电子学研究中心,采用烽火通信提供的新型掺 Yb 双包层光纤(直径 600 μm ,D 形内包层),在光纤的两个端面作高精度抛光处理,利用其中一个光纤端面的菲涅耳反射作为输出腔镜,一个对激光波长高反的镜片作为另一个腔镜构成谐振腔,并通过 45°双色片将产生的激光导出。通过特殊设计的温控热沉对光纤端部散热,以防止光纤端面损坏。采用双端泵浦技术,当前向与后向泵浦功率共计约 1020W 时,输出功率达 714W,总光-光转换效率达到 70%,斜率效率接近 72%^[11]。

目前,超过千瓦级单根光纤激光器的国内研制单位有两家,即中国电子科技集团公司第十一研究所和中国兵器装备研究院。2006 年 8 月,中国电子科技集团公司第十一研究所研制成功的高功率光纤激光器,输出功率高达 1207W。该所采用新型掺 Yb 光纤(D形内包层,直径 700 μm),对光纤两端面进行高精度抛磨处理,利用光纤端面的菲涅耳反射作输出腔镜,通过双色镜耦合输出激光。采用双端泵浦方案,精心设计了大功率泵浦光束整形、耦合结构和热管理系统,通过对光纤损伤机理的深入研究和多项工艺的改进,有效解决了大功率条件下光纤端面的损伤问题。实验中,当泵浦光功率为 1550W 时,光纤激光输出功率为 1207W,斜率效率为 78.6%,其输入输出曲线,有较好的线性关系,输出功率波动约为 1%,未见光纤有激光烧蚀或损伤现象,仍可提高输出功率^[12-13]。

2006 年 5 月,中国兵器装备研究院研制成功的单根光纤激光器输出功率达到 1049W,光-光转换效率大于 60%,电-光转换效率大于 30%,取得了阶段性成果。该激光器样机采用大功率 LD 阵列泵浦源,双端泵浦技术和高效的偏振耦合技术。采用的掺 Yb 的双包层光纤(包层直径为 400 μm ,芯径为

20 μm),所获得的光束质量比采用包层直径 600 μm ,芯径为 30 μm 甚至 40 μm 的光纤得到的好得多^[14]。

近两年,国内还有不少单位在发展高功率光纤激光器方面取得进展,如北京交通大学光波所研制的大功率包层泵浦光纤激光器,采用端面泵浦技术,当泵浦功率为 240W 时,光纤激光器在 1.09 μm 处产生了高质量的 196W 连续输出,获得了 85% 的斜率效率^[15]。南开大学物理学院光电信息科学系在光纤激光器的实验研究中,采用了 12m 长的 LMA 掺 Yb³⁺ 双包层光纤,研究了在连续泵浦和脉冲泵浦两种情况下这种光纤激光器的输出特性。采用连续泵浦,在最大泵浦功率为 10.4W 时,得到了平均功率 4.6W、中心波长 1.09 μm 的准连续激光输出,斜率效率为 51.8%;采用脉冲泵浦(脉宽为 100 μs ,占空比为 1:1),在 LD 最大注入电流下,得到了脉宽小于 50ns、峰值功率为 5.3kW、单脉冲能量为 0.26mJ 的稳定的调 Q 脉冲输出,平均功率为 1.32W,重复频率为 5kHz^[16]。中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室,对一种改进的 F-P 腔结构的高功率掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器所做的实验表明,该结构系统与传统 F-P 腔结构掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器相比,其光-光转换效率没有明显区别,而抗高功率热损伤有明显提高。该实验用的增益光纤为加拿大产 D 形掺 Yb³⁺ 双包层光纤(长 1.8m,芯径为 20 μm ,NA 为 0.14,D 形内包层为 250 μm /217 μm)。该实验获得了 1.06 μm ,50W 连续激光输出,斜率效率为 80.2%,整个系统的光-光转换效率为 31.9%,没有出现明显的热光问题、双色镜表面损伤和斜率效率下降等问题^[17]。据《科学时报》(2007 年 1 月 10 日)报道,西安光机所承担的“超短光纤大功率多用途激光系统”研制项目通过了验收。目前,此项目已申请发明专利 2 项,获实用新型专利授权 2 项。

4 脉冲光纤激光器

近几年高平均功率、高峰值功率的脉冲光纤激光器发展迅速。毫焦脉冲能量输出、纳秒和亚皮秒脉冲的光纤激光器系统在国外已有市售产品。例如,SPI 的商品级 YLP 系列脉冲掺 Yb 光纤激光器有两种:(1)(0.1~2)mJ(近衍射限光束质量,平均输出功率高达 200W,脉宽 40~500ns,重复频率 20~400kHz,WPE 为 10%,波长 1065nm,气冷);(2)(1~10)mJ(平均输出功率高达 200W,脉宽 400ns,输出光学隔离器, M^2 大约为 10)。

利用目前的光纤技术已能获得 100W 平均功率、毫焦脉冲能量、皮秒脉宽的光纤激光器。这类高于千赫重复频率皮秒光纤激光器相对于传统的飞秒

激光器来说,在一些需要高速高精度金属微加工和作为参量放大器的泵源等应用场合,具有特殊的优越性。2006年,英国 Southampton 大学的光电研究中心研制成功的脉冲光纤 MOPA(主控振荡功率放大器)激光器系统,平均输出功率为 321W(脉宽 20ps,重复频率 1GHz, $M^2 = 2.4$,波长 1060nm,相对于泵浦功率的斜率效率 78%),并认为有可能提高到 500W^[18]。

国内在开展基于 MOPA 脉冲双包层光纤激光器研究进展较大。2005 年上海光机所以 4m 长的国产高掺杂浓度掺 Yb 双包层光纤(纤芯 43 μm , NA 为 0.08;D 形内包层 650 μm /600 μm , NA 为 0.38, Yb³⁺ 掺杂浓度为 0.65%)作为放大器,实现了在重复频率 100kHz 时,平均功率为 133.8W(脉冲宽度 400ns)的脉冲激光输出^[19]。

5 展望

自 2003 年以来,光纤激光器一跃成为工业用激光器的竞争主导者。光纤激光的工业应用,已经从低功率(百瓦级)的打标、雕刻向更高功率(千瓦级到万瓦级)的金属和陶瓷的切割、焊接等方面发展。在汽车和造船等行业中,结构紧凑、使用方便的高功率光纤激光器具有巨大的市场潜力,但要成功取代传统工业激光器则依赖于它能获得优良的光束质量。同时,全光纤化器件设计备受重视,已成为光纤激光器进入商业化和产业化的最佳途径。

军事领域正在期待着激光武器级光纤激光器的突破。最近,美国空军研究实验室定向能机构(AFRL's Directed Energy Directorate at Kirtland AFB)的激光部技术主任 Roy Hamil 认为^[20],在有几家公司已经显示单根光纤激光输出功率高达 3kW、光束质量接近衍射极限以及效率达到 20%~25%的条件下,已经为通过光束相干组合技术,实现多个光纤激光器输出总功率达到 100kW,展现了很好的前景。高功率光纤激光器正在参与美空军 100kW 固体激光器的竞争,目前 AFRL 正在试验若干激光器输出光束(16 路,每路光束 200W)的相干组合。

据有关的市场调研公司(如 SU, Optec Consulting)2005 年和 2006 年的研究报告指出,过去 10 年中光纤激光器的工业市场每年增幅为 5%~10%。预测到 2010 年,光纤激光器的销量将以年增幅 30%~40% 的速度攀升,从 2005 年的 1.4 亿美元增至 2010 年的 6.8 亿美元。光纤激光器将至少占领工业激光器市场份额的四分之一。而同期,工业激光器市场每年增幅为 9%,2010 年将达到 28 亿美元。

参考文献:

- [1] Jens Limpert, Thomas Schreiber, Tiinnermann. Fiber based high power laser systems [EB/OL]. www. rp-photonics. com/highpowerfibrelasers. pdf. March 2007.
- [2] G Bonati, H Voelckel, T Gabler, et al. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]. Photonics West. San Jose, Late Breaking Developments, Session (2005)5709-2a.
- [3] E. Snitzer, et al. Double-clad offset core Nd fiber laser [C]//Proc. Optical Fiber Sensors, 1988.
- [4] Jeong Y, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power [J]. Electron Letters, 2004, 40(8): 470-471.
- [5] Jeong Yet, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW of continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [6] Jeff Hecht. The highest single-mode powers of Yb-doped fiber Lasers achieved 2 kW CW output [C]//Lasers and Electro-Optics Europe; 2005, CLEO/Europe2005 Conf., Publication Date: 12-17, 2005, 6: 508.
- [7] R E Kennedy, S V Popov, A B Rulkov, et al. (Femto-second Optics Group, Imperial College London). High power fiber-integrated sources [EB/OL]. IET London Dec 2006, www. femto. ph. ic. ac. uk.
- [8] 楼祺洪,等.高功率光纤激光器研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
- [9] 国产双包层掺镱光纤实现 440W 的连续高功率输出 [J]. 中国激光, 2005, 32(1): 20.
- [10] 高功率光纤激光器与放大器 [C]//上海激光通讯. 2007, 308, 摘编自“光子科技创新与产业化”论坛论文.
- [11] 李晨,等.采用国产掺 Yb 双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700W [J]. 中国激光, 2006, 33(6): 738.
- [12] 赵鸿,等.大功率光纤激光器输出功率超过 1.2kW [J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 930.
- [13] 输出功率超过 1.2kW 的大功率光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 81.
- [14] 李伟,等.大功率光纤激光器输出功率突破 1kW [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 890.
- [15] 宁志勇,等.196W 功率输出的高功率包层泵浦光纤激光器 [J]. 光通信研究, 2005, (6): 50.
- [16] 谢春霞,等.大模面积掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的实验研究 [J]. 光子学报, 2005, 34(5): 644-647.
- [17] 李康,等.改进的 F-P 腔结构的大功率掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器 [J]. 光电子·激光, 2006, 17(3): 302-305.
- [18] Dupriez P, Piper A, et al. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(9): 1013-1015.
- [19] 张芳沛,等.高功率双包层光纤放大器 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 38-44.
- [20] J R Wilson (Contributing writer). Transforming the battlefield: the laser's edge [EB/OL]. March 13, 2007. www. lexisnexis. com/wpublisher (20070319).