

## 高功率光纤激光器的关键技术及应用

刘德明, 阎焱玲

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074 )

**摘要:** 高功率光纤激光器单模输出功率可达到 1 kW, 通过相干合束技术可以从多个光纤激光器获得几千瓦甚至几百千瓦的输出功率。高功率光纤激光器将使激光工业及国防应用产生革命性的变化。文中系统介绍了高功率光纤激光器的关键技术及其研究进展, 阐述了在工业、航空业以及国防等领域的重要应用。

**关键词:** 光纤激光器; 高功率; 关键技术; 应用

**中图分类号:** TN248      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2006)增 C-0105-05

## Key technologies and applications for high power fibre laser

LIU De-ming, YAN Chang-ling

(Institute of Optoelectronics Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The high power fiber lasers program will develop and demonstrate single mode fiber lasers with output powers of one kilowatt from a single aperture. Tens of kilowatts output power and capability to scale to greater than hundreds of kilowatts output power and beyond will be demonstrated through coherent combining of the output power from multiple fiber lasers. High power fiber lasers will provide a quantum leap in the laser industry and defense application. In this paper, the key technologies and the progress of the research for high power fibre lasers are introduced, as well as the applications in the industry and military.

**Key words:** Fibre laser; High power; Key technology; Application

### 0 引言

光纤激光器的历史和激光器本身的历史几乎一样长。但是由于增益光纤和泵浦光源等技术上的限制, 商用光纤激光器直到 20 世纪末才出现。20 世纪 70 年代以来, 随着光纤制备技术以及谐振腔结构的改进, 光纤激光器有了很大的发展, 特别是 80 年代中期英国南安普顿掺 Er<sup>3+</sup> 光纤的突破, 光纤激光器的实用化成为可能, 并显示出十分诱人的应用前景, 受到人们的广泛重视。90 年代开始出现了双包层掺杂光纤激光器的研究。20 世纪末宝利来公司的研究人员采用包层泵浦技术, 在实验室获得了 100 W 的激光输出, 使得光纤激光器的实

收稿日期: 2006-08-21

作者简介: 刘德明 (1957-), 男, 湖北随州人, 教授, 博士, 主要从事光电子器件与系统应用等的研究。

用化进入实际阶段。2001 年,SDL公司推出了第 1 台商用的拉曼光纤激光器,采用Yb包层泵浦激光器泵浦光栅式级联拉曼激光器的结构,根据这种结构可方便地设计出适合输出 1.30  $\mu\text{m}$ 、1.45  $\mu\text{m}$ 的谐振腔结构。IPG 光子公司采用类似的结构实现了 1 200~1 600 nm波段可选择任意波长的激光输出,输出功率达到了 10 W。DIANOV E.M.等人用掺有P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的光纤实现 1 240 nm、1 480 nm处的激光输出。2003 年 6 月,美国IPG公司在德国激光展演示了一台 1.1  $\mu\text{m}$ ,连续输出 10 kW的光纤激光器引起了业内的震撼!

日前光纤激光器研究与开发主要集中在大功率双包层光纤激光器技术上。用双包层光纤实现大功率激光输出技术最初于 1988 年提出。大功率双包层光纤激光器呈现出以下发展趋势:(1) 单根光纤输出功率从百瓦级向千瓦级发展,目前单根光纤激光仅在实验室实现了千瓦级功率输出,并且不是单横模;(2) 从大功率连续光纤激光向大功率脉冲光纤激光器发展,从应用目标出发时,连续工作的光纤激光能提供的靶面功率密度较低,脉冲工作的光纤激光将会更为有用;(3) 从常规的光纤激光组束技术向相干组束技术发展。

## 1 双包层光纤<sup>[1]</sup>

双包层光纤(DCF)是高功率光纤激光器的关键部件,其结构如图 1 所示。双包层光纤的基本结构包括直径为 10~100  $\mu\text{m}$ 的掺杂纤芯,以及直径 125~1 000 $\mu\text{m}$ 、数值孔径约为 0.45 的内包层。设计双包层光纤取决于要求的功率和光束质量。多模泵浦光被耦合进内包层,在其内传输 2~8 m,并不断被掺杂纤芯吸收。双包层光纤可以通过两端同时泵浦来提高可用泵浦功率。激光谐振腔由外部光学系统或用紫外激光在光纤芯层写入光纤布拉格光栅(FBG)构成。纤芯可以掺杂多种不同稀土元素,对应不同的激光波长。镱元素是可选掺杂物,因为它有宽吸收带和最高光能量转换效率为 80%。

### 1.1 光纤功率限制因素

由于很多因素限制,目前单模光纤激光器光功率限制在 1 kW左右,这些限制光纤功率的因素主要有<sup>[2,3]</sup>:

- (1) 光学非线性效应,包括受激布里渊散射,受激拉曼散射和自相位调制;
- (2) 放大自发辐射,它和激光波长竞争存储能量,限制最大粒子数反转和最终出射能量;
- (3) 光纤的热破裂极限大约为 100 Wcm<sup>-1</sup>。在不超过热破裂极限时,如果一在段 10 m长光纤上能量消耗为 15 Wm<sup>-1</sup>,一个 1 kW光纤激光器会消耗<15%的泵浦吸收能量,或者说每千瓦消耗 150 W的热量;

(4) 在 1 060 nm处如果最大功率大于 1 MW,10  $\mu\text{m}$ 芯径的掺镱光纤中脉冲激发的块损坏阈值大于 60 GW cm<sup>-2</sup>,连续和表面损坏阈值相当低约为 1 Wcm<sup>-2</sup>。脉冲长度小于 100 ns时,自聚焦阈值约为 4 MW,必须考虑。

增加模场直径、加大基模增益、插入空间滤波器、增加高阶模损耗、减少光纤长度、采用光子晶体或多孔光纤等都可以增加光纤最大输出功率,使单根光纤功率达到 2 kW。但获得高功率激光的最有效方法还是利用多束光纤组合输出。IPG 公司将多束 250~400 W 单模光纤合束,获得输出为 10 kW 的高功率光纤激光系统。简单的光纤合束固然可以获得高功率输出,但是输出光束是多模的,在一些应用场合效果并不是很好。

### 1.2 光纤寿命

虽然双包层光纤在 1 kW量级时是易于处理的,但仍有很多问题影响双包层光纤的可靠性和寿命。例如,由于氟化聚合物包层的受损引起泵浦光衰减。氟化聚合物包层既作为泵浦波导又用为光纤的保护膜。其破坏机理如下:水和玻璃表面作用引起表面形成氢氧根群,在 945 nm处其吸收也随之增加。通过控制相对湿度保

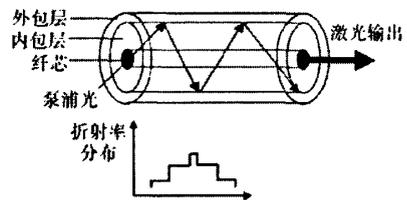


图 1 双包层光纤基本结构

Fig.1 Basic design of the DCF

持光纤温度低于  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 在 10 年内损耗可以小于  $5\%$ <sup>[4]</sup>。这个温度要求在泵浦功率达到约  $3\text{ kW}$  时, 光纤要水制冷, 而在多根光纤打捆时只需空气制冷即可。又如, 掺铈和掺铥光纤置于高功率脉冲激光器中, 由于多光子效应会引起明显变黑。而掺镱光纤置于大于  $60\text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$  ( $1\text{ 060 nm}$  处脉冲) 的激光中时, 在 5 天内光纤的吸收不会产生变化<sup>[2]</sup>。

## 2 高功率泵浦激光二极管<sup>[5,6]</sup>

高功率泵浦激光二极管有 3 种类型:

(1) 单管芯激光二极管 激光二极管芯片发光面尺寸约  $1\text{ }\mu\text{m}\times 500\text{ }\mu\text{m}$ , 输出光功率可以达到  $5\text{ W}$ , 一半采用 TO 封装, 利用半导体冷器 (TEC) 制冷。日前单管激光二极管售价为  $70\sim 100$  美元/W。

(2) 条状激光二极管阵列 由 50 个左右的单管芯片 (间隔约  $150\text{ }\mu\text{m}$  宽) 组成激光条, 每个激光条可以输出大于  $60\text{ W}$  的功率。激光条置于空气制冷或水制冷的热沉上。售价也是为  $70\sim 100$  美元/W。

(3) 叠层状激光二极管阵列 通过堆叠约 20 个激光条构成。可输出高达  $1\text{ 200 W}$  的连续激光。在这种结构中散热是主要问题, 一般采用微通道制冷设计, 使水在层叠的激光条之间的微小通道中流动, 如图 2 所示。

在设计高功率光纤激光器时, 泵浦激光二极管和光纤一样重要。最初的设计要求采用单横模激光二极管。但是现在双包层光纤的出现已经改变了这一要求。激光二极管的电光转换效率已经提高到接近  $50\%$ , 激光条叠层的功率量级也超过  $1\text{ kW}$ 。为制备具有竞争力的  $1\text{ kW}$  量级的光纤激光器, 需要有可提供  $2.5\sim 3\text{ kW}$  的功率的费用低廉的泵浦。除了激光条叠层器件很难有其他器件可提供这样量级的激光功率。而且, 为与现存 Nd: YAG 和  $\text{CO}_2$  激光器竞争, 激光二极管价格必须降至每瓦 50 美元以下, 并在不久的将来接近每瓦 12 美元。这样的价格在激光二极管规模生产时是可以实现的。有很多生产商如 LIMO, 美国的 nLight, 德国 DiLAS 和 Trumpf 等可以提供输出功率达  $1.2\text{ kW}$  的激光二极管, 寿命为  $10\text{ 000 h}$ 。到 2008 年, 激光二极管输出功率量级可达二三千瓦同时寿命可达  $20\text{ 000 h}$ 。

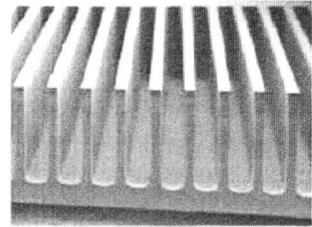


图 2 微通道制冷器 ( $20\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ )

Fig.2 Microchannel Cooler ( $20\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ )

除了激光条叠层器件很难有其他器件可提供这样量级的激光功率。而且, 为与现存 Nd: YAG 和  $\text{CO}_2$  激光器竞争, 激光二极管价格必须降至每瓦 50 美元以下, 并在不久的将来接近每瓦 12 美元。这样的价格在激光二极管规模生产时是可以实现的。有很多生产商如 LIMO, 美国的 nLight, 德国 DiLAS 和 Trumpf 等可以提供输出功率达  $1.2\text{ kW}$  的激光二极管, 寿命为  $10\text{ 000 h}$ 。到 2008 年, 激光二极管输出功率量级可达二三千瓦同时寿命可达  $20\text{ 000 h}$ 。

## 3 泵浦激光耦合

二极管激光条/激光条叠层到双包层光纤的耦合是增加光纤激光器输出功率和降低激光器成本的关键之一。通常, 通过改善激光二极管的光束质量或者通过光束转换可以提高耦合效率。光束质量是光束能够会聚的紧凑程度的度量。有多种参数描述这种会聚特性, 最常用的是光束参数积 BPP, 它定义为光束束腰半径, 即  $w_0$ , 和光束远场发散角半角  $\theta_0$  的积。在无像差的光学系统中, 任何光束的这个量是个定值。

根据双包层光纤的内包层参数要求, 二极管激光条/激光条叠层输出光应聚焦成直径为  $400\sim 1\text{ 000}\text{ }\mu\text{m}$ 、数值孔径 NA 约 0.45 的光束。这要求二极管激光器的  $BPP = 100\sim 259\text{ mm mrad}$ 。SPI 宣布将已制成的  $400\text{ W}$  输出功率耦合到直径为  $400\text{ }\mu\text{m}$  的双包层光纤。如果泵浦发射功率达到  $2.5\text{ kW}$ , 它可以耦合到直径为  $1\text{ mm}$  的双包层光纤, 相应光纤激光器的输出功率约为  $1\text{ kW}$ 。英国南安普敦大学光电子学研究中心于 2004 年 6 月也报道了一个掺镱大芯径 ( $43\text{ }\mu\text{m}$ ) 的  $8\text{ m}$  长的在  $1\text{ 090 nm}$  处连续输出  $1.01\text{ kW}$  的光纤激光器。

#### 4 光纤激光器相干合束<sup>[7, 8]</sup>

对不相干光源而言, 总功率强度是由单个光源功率强度乘以光源个数和填充因子  $F$ , 也就是说, 所有单个光源功率之和乘以填充因子。在同相位相干光源的情况下, 总功率强度则是各振幅相加然后平方, 和不相干光源的情况相比, 聚焦的模场半径减小了因子  $M$ , 而其他参数相同。要实现相干合束并不容易。因为单个光源的相位必须被动地监控和调节。美国诺斯罗普·格鲁曼 (NOC) 公司为军队设计了一个相干合束光纤激光器系统的原型, 如图 6 所示, 这里价格相对于性能是排在其后的。这个系统基于由美国 Nufem 公司生产的掺镱大模场面积偏正保持光纤, 每个臂的斜度效率为 77%, 输出功率达 150 W。每个臂的相位通过铌酸锂波导相位调整器控制。原则上系统可以升级到足够高的功率从而取代化学激光器作军事应用——导弹防护, 目标照明和袭击地面目标。然而这种结构不太可能用于商用系统, 因为它复杂而且费用昂贵, 但是它对光纤激光器和激光二极管相干阵列器件技术的发展是一个很好的驱动, 是它们可以借鉴的技术储备源。

#### 5 光纤激光器设计

工业激光器可分为基本两类: 连续和脉冲。脉冲激光器在钻孔和切割时在减少热损坏—热影响区 (HAZ) — (当脉冲宽度与材料中热扩散时间相比很小时, 大部分热量会消散) 上很有用。在敲击切割时它是材料的切除刀。而对于光纤激光器, 光纤可作为一个由连续或脉冲也即准连续 (QCW) 激光二极管泵浦的激光振荡器或放大器。在准连续 (QCW) 时, 可达毫秒量级的泵浦脉冲宽度, 无须采用振荡器/放大器结构。

##### 5.1 连续(CW)/长脉冲 (~1 ms) 光纤激光器

如图 3 所示, 连续光纤激光器的设计相对比较简单, 它可由不同厂商提供的现存元件装配制作, 输出功率至少可以达到 10~20 W。二极管泵浦组件可以由单发射器、激光条甚至是叠层器件, 它被熔接到光纤激光器组件集合。光到光的转换效率达到 80%, 是激光二极管泵浦棒设计的转换效率的两倍多, 而且可以升级至 1 kW。为达到脉冲工作, 连续泵浦激光二极管由脉冲激光二极管取代, 或者由和连续二极管激光器平均功率相同, 但是可以产生峰值功率 2~4 倍于平均连续功率, 脉宽小于 1 ms 的准连续 (QCW) 激光二极管取代 (SPI 供应一种平均功率 100 W 的器件, 其峰值功率为 400 W, 占空因子为 25%)。

##### 5.2 脉冲光纤激光器——种子激光振荡放大 (MOPA)<sup>[9]</sup>

为满足大多数军事和宇航应用, 需要纳米量级 (10~100 ns) 的短脉冲, 必须用光纤作为放大器连到主谐振腔上。谐振腔被直接调制或基于声光器件进行 Q-开关调制, 以保证在脉冲重复频率 20~50 kHz 的 1~500 ns 的脉冲中有约 1~100 mJ 的脉冲能量, 这样可得高达 100 W 的平均功率。脉冲激光器设计比连续激光器复杂得多, 费用也高得多。

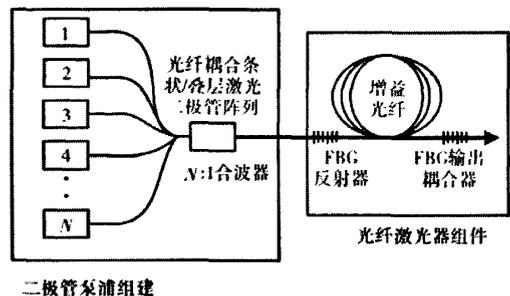


图 3 连续光纤激光器设计

Fig.3 CW fiber laser design

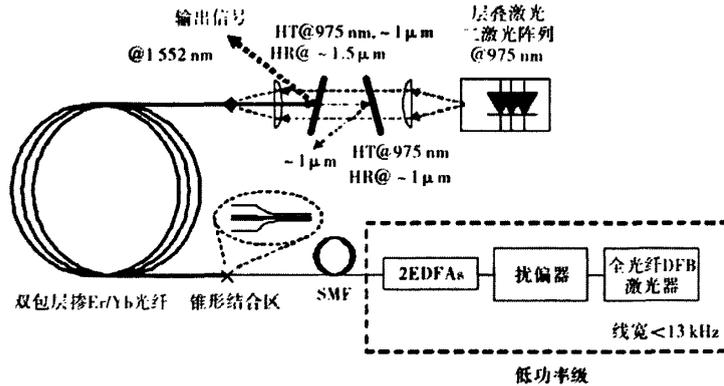


图4 SPI 脉冲光纤激光器结构

Fig.4 Configuration of SPI pulsed laser

## 6 应用

高功率光纤激光器可能的应用包括: 激光焊接(小于 1 mm 的窄区)、热处理、激光烧结、覆层塑料热合(焊接)、软焊涂料剥除、连续缝焊激光成型、环氧固化自由形态加工、点焊医学应用、激光二极管泵浦应用激光照明以及表面溶解混合成型等。最可能的应用是在大尺寸制造领域, 目前还没有发挥很大的作用。其中一些领域被看作是有发展潜力的领域, 包括: 汽车、采暖通风与空调(HVAC)、导管制造业、大型金属结构等。光纤激光器有多种军事应用。例如用于目标捕获的激光指示器(单脉冲能量大于 100 mJ)、激光测距仪(单脉冲能量大于 100 mJ, 脉宽小于 10 ns)以及功率大于 100 kW(目标是 1 MW)的激光武器。得到美国国防部高级研究计划署(DARPA)资助的美国诺斯罗普·格鲁曼(NOC)公司以及 SPI 和 IPG 公司利用多光束相干合束技术研究高功率光纤激光器, 为机载和舰载应用开发高于 100 kW 的光纤激光武器。

## 7 结论

过去 10 年光纤激光技术在输出功率、光束质量和亮度等方面取得了巨大进步。因为光纤激光器的高效率会进一步降低电功率需求(有可能减小 1/2), 在工业制造方面有进一步突破, 而这些新的制造技术会引发更多的目前尚未实现或等待开发的新设计和加工方法。高功率光纤激光器最终将会成为制造业的主流设备之一。

### 参考文献:

- [1] ZENTENO L. High power double-clad fiber laser[J]. *J of Lightwave Technol*, 1993, 11 (9): 1435-1446.
- [2] LEGRANGE J, VOGEL E, QUOI K, et al. Optical reliability of cladding pump fiber for high power communication networks[J]. *IEEE. Military Comm. Conference Proc.*, 1999, 1: 690-693.
- [3] NILSSON J, SAHU J K, JOENG Y, et al. High power fiber lasers: new developments [C]// *Proc. of SPIE*, 2003, 4974: 50-59.
- [4] LIMPET J, LIEM A, ZELLMER H, et al. Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers[C]// *Proc. of SPIE*, 2003, 4974: 135-147.
- [5] DU Keming. High power diode laser and their applications[C]// *Proc of SPIE*, 1998, 3550: 450-459.
- [6] WOLAK E, TAI K, SKIDMORE J, et al. Reliability of high-power multi-mode pumping module [C]// *Proc of SPIE*, 2004, 5336: 116-124.
- [7] LOOSEN P, TREUSCH G, HAAS C R, et al. High-power diode-lasers and their direct industrial applications[C]// *Proc of SPIE*, 1995, 2382: 78-88.
- [8] BOULLET J, DESFARGES-BERTHELENOT A, KERMENE V, et al. Coherent combining in an Yb doped double core fiber laser[J]. *IEEE. Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, 2005, 1: 523-525.
- [9] NORMAN S, ZERVAS M, APPELYARD A, et al. Latest developments of high power fiber lasers in SPI[C]// *Proc of SPIE*, 2004, 5335: 229-237.