高功率双包层光纤激光器: 30周年的发展历程

周朴*, 黄良金, 冷进勇, 肖虎, 许将明, 姚天甫

国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073

* E-mail: zhoup203@163.com

收稿日期: 2018-12-01; 接受日期: 2019-07-22; 网络版发表日期: 2019-11-11

摘要 1988年双包层光纤的发明, 改变了光纤激光器只是弱光光源的历史. 本文简要回顾双包层光纤发明30年以来高功率光纤激光器的发展史, 按照时间顺序选取7个重要里程碑节点, 通过对掺铒光纤、大模场光纤、级联泵浦、光束合成等关键技术的剖析, 展示光纤激光器输出功率从瓦级到100 kW级的提升过程, 介绍光纤激光可实现“任意波长、任意脉宽、任意功率”这一最新成果, 展望高功率光纤激光的未来发展和应用前景.

关键词 光纤激光, 双包层, 高功率, 掺铒, 级联泵浦, 光束合成

1 引言

光纤激光器是较早实现的激光器类型之一. 激光器发明后的第二年(1961年), 来自America Optical公司的Snitzer^[1,2]就在掺铈玻璃波导中观察到了激光现象, 不久后又实现了光纤激光放大^[3]. 20世纪70年代, Bell实验室的Stone和Burrus^[4,5]成功实现了半导体激光泵浦的掺铈光纤激光器, 取代了早期通常采用的闪光灯泵浦的方法, 大大提高了激光器的效率. 20世纪80年代, Southampton大学的Payne研究团队^[6,7]在高倍率光纤激光放大(特别是掺铒光纤放大器)方面做出了大量开创性工作, 有力推动了光纤通信技术的发展和大规模普及应用, 包括互联网的快速发展^[8-10]. 前述的光纤激光器采用的激光介质大都为单包层光纤(其详细定义将在后文给出), 纤芯的几何尺寸相对较小, 对泵浦激光的亮度有较高要求, 高功率泵浦光受限于自身亮度, 难以有效耦合到纤芯中, 而当时的高亮度泵浦源输出功

率也不高, 因此光纤激光器一度被认为是一种输出功率较低的弱光光源^[11-13], 相关研究和应用大都集中在通信领域.

1988年, 当时就职于Polaroid公司的Snitzer等人^[14]报道了一种双包层光纤, 泵浦光可在这种光纤的内包层中传输, 由于内包层的几何尺寸和数值孔径都相对较大, 可以采用亮度相对较低但输出功率较高的半导体激光器作为泵浦, 为提高光纤激光器的输出功率提供了全新的解决途径, 改变了光纤激光器只是一种弱光光源的历史. 自从双包层光纤诞生以来, 光纤激光的输出功率以惊人的速度迅速提升, 目前单纤单模光纤激光的输出功率已经达到万瓦级^[15,16], 合束后的光纤激光输出功率已达100 kW级^[17]. 光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、热管理方便、可柔性操作等特性, 使其在先进制造、能源勘探、生物、国防等领域都得到了广泛应用, 已成为高功率激光领域研究和应用的热点^[18-20]. 预计到2020年, 光纤激光器(不包括基

引用格式: 周朴, 黄良金, 冷进勇, 等. 高功率双包层光纤激光器: 30周年的发展历程. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 123-135

Zhou P, Huang L J, Leng J Y, et al. High-power double-cladding fiber lasers: A 30-year overview (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 123-135, doi: 10.1360/N092018-00409

于光纤激光的应用系统及其相关产业链)的年度市场销售额将达到26亿美元, 占全部激光器市场的40%左右¹⁾。本文回顾双包层光纤诞生30年来高功率光纤激光发展史上的若干里程碑, 通过按照时间序列依次呈现的重要成果勾勒出30年的发展历程。

2 双包层光纤(1988年)

双包层光纤的基本结构如图1(a)所示, 由内而外依次是纤芯、内包层、外包层和涂覆层。纤芯、内包层和外包层的折射率依次降低。纤芯掺杂稀土元素(如镱、钕、铒和铥等), 纤芯和内包层构成波导结构, 是激光产生和传输的通道。内包层通常由纯 SiO_2 构成, 内包层和外包层构成的波导是泵浦光的传输通道。泵浦光在内包层中反复穿越纤芯, 被掺杂离子吸收, 从而将泵浦光高效地转换为激光。由于内包层的横向尺寸和数值孔径远大于纤芯, 能够很方便地耦合进大量光束质量较差的高功率泵浦光。

单包层光纤的基本结构如图1(b)所示, 在这种结构中, 泵浦光和激光使用相同的通道。与单包层光纤相比, 在芯径几乎相同的情况下, 双包层光纤能使可注入泵浦光的功率和激光输出的功率提升数个量级: 如较为常见的单模掺杂光纤纤芯直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 由于单模半导体激光最大输出功率尚在百毫瓦量级, 因此, 半导体激光纤芯泵浦单模掺杂光纤输出激光功率一般在百毫瓦量级(这个结果至今仍成立); 与此同时, 从芯径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右的双包层光纤中则可实现(数)

百瓦功率输出^[21~23], 提升了3~4个量级。

3 掺镱双包层光纤(1994年)

双包层光纤公开报道以后, 一段时间内大多数高功率光纤激光器都是基于掺镱光纤实现的。Southampton大学、Polariod公司和Laser Zentrum Hannover分别于1992, 1993和1995年将双包层掺镱光纤激光器的输出功率提升至 1 W ^[24], 5 W ^[25]和 9.2 W ^[26]。由于泵浦波长(800 nm 附近)和激光波长(1060 nm 附近)间隔较大, 掺镱光纤激光器的光光转换效率相对较低, 这就使得高功率输出时激光器的热负荷较大^[27], 从而限制了其功率提升能力。1997年, Laser Zentrum Hannover的研究人员将输出功率提升至 30 W ^[28]。随后鲜有相关高功率双包层掺镱光纤激光器的报道, 原因可能在于双包层掺镱光纤的出现和广泛使用^[29]。尽管早在1962年就有关于掺镱光纤激光的报道^[30], 但双包层掺镱光纤激光器直至1994年才由Southampton大学的Hanna课题组^[31~33]报道。

掺镱光纤就是在纤芯内掺入一定浓度的镱离子(Yb^{3+})作为增益介质。与其他稀土离子相比, Yb^{3+} 的能级结构更为简单, 仅由基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 和激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ 两个能级组成。在配位场作用下, 基态和激发态产生斯塔克分裂, Yb^{3+} 在二氧化硅玻璃中的能级图如图2(a)所示。 Yb^{3+} 简单的能级结构避免了激发态吸收、多光子无辐射弛豫和浓度淬灭等影响转换效率的不利因素^[10,34]。

Yb^{3+} 在铝硅酸盐光纤中的吸收发射截面如图2(b)

图1 (网络版彩图) 光纤基本结构示意图。(a) 双包层光纤; (b) 单包层光纤

Figure 1 (Color online) The sketch for fiber. (a) A double clad fiber; (b) a single clad fiber.

1) Investor Presentation (January 2018) provided by IPG Photonics

图 2 (a) Yb^{3+} 在二氧化硅玻璃中的能级图; (b) Yb^{3+} 在铝硅酸盐光纤中的吸收发射截面^[29]

Figure 2 (a) The energy-level diagram for Yb^{3+} doped in SiO_2 glass; (b) emission/absorption cross section in aluminosilicate fiber ^[29].

所示. Yb^{3+} 具有很宽的吸收谱, 可从850 nm延伸至1080 nm^[31]. Yb^{3+} 吸收谱的两个峰值位于910和976 nm附近, 这两个波段恰好处于高功率半导体激光器的最佳工作波长范围内. 有趣的是, 虽然 Yb^{3+} 在1010~1020 nm波段内的吸收较弱, 却使得利用高亮度光纤激光器作为泵浦源的级联泵浦(将在第6节细介绍)成为可能. 另外, Yb^{3+} 较宽的发射谱使得掺镱光纤的工作波长可以覆盖975~1180 nm很宽的光谱范围, 而常见的高功率掺镱光纤器的波长范围为1060~1100 nm^[8]. 综合来看, 掺镱光纤激光器的泵浦波长与激光波长很接近, 因此可实现很高的转换效率, 这是激光器输出功率可定标放大的重要基础. 如泵浦波长选择为975 nm, 激光输出波长为1060 nm, 理论上光光转换效率可以大于90%. 图3为最早实现的双包层掺镱光纤激光器实验结果, 激光阈值约为75 mW, 当泵浦激光功率约为800 mW时, 输出激光功率约为500 mW, 扣除泵浦光耦合过程中引入的损耗等因素, 该激光器的光光转换效率达到了80%^[33]. 1995年, Pask等人^[29]撰写了长文“Ytterbium-doped silica fiber lasers: Versatile sources for the 1–1.2 μm region”, 受到人们的高度关注, 从此掺镱双包层光纤极大地推动了高功率光纤激光的发展历程.

需要说明的是, 除了掺镱双包层光纤之外, 研究人员也基于掺杂其他稀土离子的光纤实现了较高功率输出, 其中最具有代表性的就是千瓦级掺铒光纤激光(2010年)^[35]、600 W级掺铒光纤激光(2018年)^[36]和400 W级掺钕光纤激光(2013年)^[37]. 不同掺杂光纤使得激光器的中心波长等参数有较大差别, 但单从输出功率这一项而言, 掺镱光纤激光无疑是最具有代表性的, 单束掺镱光纤激光输出功率已经突破了万瓦级

图 3 最早实现的双包层掺镱光纤激光器输出功率与泵浦功率关系曲线^[33]

Figure 3 The relationship between output power and pump power of the first double clad fiber laser ^[33].

(2009年)^[15,16], 比其他类型的掺杂光纤激光功率高出了1个量级.

4 百瓦级光纤激光器(1999年)

自1994年首次报道之后, 掺镱双包层光纤激光器的输出功率得到迅速提高: 1996年, IPG Photonics公司发布了10 W量级激光器^[11], 1997年, Bell实验室(与Opto Power公司合作)、Polarion公司分别实现了输出功率大于20和35 W的掺镱双包层光纤激光器^[38,39]; 1998年, Opto Power公司将输出功率提升至大于50 W^[40], 超过了当时掺钕光纤激光的功率纪录.

得益于高功率半导体泵浦源的高速同步发展

(1998年Opto Power公司报道的50 W级光纤激光器就得益于他们当时自研的高功率泵浦源, 详见文献[40]), 高功率光纤激光器输出功率迅速达到百瓦级: 1999年, SDL公司(原Polaroid公司的光纤激光系统部门)的Dominic等人^[40,41]报道了输出功率达到110 W的光纤激光器. 如图4所示, 该激光器是一个空间结构的光纤振荡器. 泵浦源为4个输出功率为45 W、中心波长为915 nm的bar条半导体激光器(总泵浦功率为180 W); 采用的增益光纤为掺镱双包层单模光纤, 其内包层横截面为 $170\text{ }\mu\text{m}\times 330\text{ }\mu\text{m}$ 的矩形, 数值孔径为0.46, 纤芯的模场直径为 $9\text{ }\mu\text{m}$. 该激光器的中心波长为1120 nm, 斜效率为58.3%.

需要指出的是, 除了泵浦能力飞速发展之外, 在百瓦级光纤激光器诞生的前后, 双包层光纤的结构设计对功率(效率)提升发挥了重要作用. 与单包层纤芯泵浦的情形不同, 若内包层采取与纤芯同轴的同心圆对称结构设计, 包层泵浦时很多泵浦光是以螺旋光的形式传播的^[42,43], 从而造成纤芯无法充分吸收, 降低纤芯吸收效率和激光效率. 为解决上述问题, 研究人员提出多种结构内包层设计以破坏完美的圆形对称, 如“D”型、多边形、矩形等, 以提高内包层对泵浦光的吸收效率^[44,45]. 目前商用的双包层光纤内包层大多采用的是多边形(如八边形)结构设计.

5 大模场双包层光纤及千瓦级光纤激光器 (2004年)

由于Dominic等人报道的百瓦级光纤激光器采用的掺镱光纤模场直径约为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 纤芯中的功率密度很高, 进一步提升输出功率受到非线性效应(特别是受激拉曼散射效应)的限制^[46-49]. 为了提高非线性效应的阈

值并保持单模输出, Taverner等人^[50,51]提出了大模场光纤的概念, 他们将掺铒单模光纤的纤芯数值孔径由常见的0.15降低至0.066~0.08, 同时将纤芯直径增加至 $14\sim 17\text{ }\mu\text{m}$. 这样的单模大模场光纤的模场面积可达 $200\sim 300\text{ }\mu\text{m}^2$, 是常规单模光纤的4~5倍, 可大幅提高非线性效应阈值. 对于双包层光纤而言, 在保证内包层尺寸不变的情况下增大纤芯直径, 还能提高泵浦吸收率, 从而减小增益光纤的长度, 这将进一步提高非线性效应的阈值. 随着弯曲选模^[52]等模式控制技术的发展, 高光束质量对大模场光纤的要求也由单模放宽至少模, 使光纤的模场面积得到进一步增加.

大模场双包层光纤使得光纤激光的功率再一次飞速发展, 从百瓦级迅速提升至数百瓦级^[53-57], 千瓦级光纤激光已经呼之欲出. 2004年, Southampton大学报道了首台千瓦级的单模光纤激光器^[58]. 图5所示为输出功率为1.36 kW的光纤激光器结构图^[58], 该激光器是空间结构的光纤振荡器, 泵浦光的中心波长为975 nm, 最高功率可达1.8 kW, 所采用的掺镱双包层光纤长度为12 m, D型内包层的直径和数值孔径分别为 $650/600\text{ }\mu\text{m}$ 和0.46. 该掺镱光纤的纤芯直径为 $40\text{ }\mu\text{m}$, 数值孔径小于0.05, 相应的基模模场面积约为 $900\text{ }\mu\text{m}^2$. 为了实现模式控制, 掺镱光纤的弯曲直径控制在20 cm左右. 得益于掺镱光纤较低的数值孔径和相当大的模场面积, 最终实现了最高输出功率1.36 kW、斜率效率83%的高功率高效率输出, 光束质量 M^2 因子为1.4.

尽管文献[58]是千瓦级光纤激光器最具有代表性的论文, 但需要指出的是, 在同一年, Jena大学、IPG Photonics公司也报道了千瓦级光纤激光器^[59,60]. 而且在千瓦级光纤激光器问世后不久, IPG Photonics公司的光纤激光器输出功率也迅速突破了2^[61]和3 kW^[62]. 在2006年以后, 光纤激光的最高输出功率记录都是由IPG Photonics公司创造的, 高功率光纤激光的发展由前期的“百家争鸣”的状态进入了“IPG一家独大”的状

图4 首台百瓦级光纤激光器结构示意图^[40]

Figure 4 The sketch for the first hundred-watt level double clad fiber laser [40].

图5 (网络版彩图)首台千瓦级单模光纤激光器结构示意图^[58]

Figure 5 (Color online) The sketch for the first kilowatt level double clad fiber laser [58].

态(这也将后文第6~8节的介绍中得到印证)。

在2004年前后, 高功率光纤激光器的典型结构也发生了重大变化。早期百瓦级、千瓦级光纤激光器大都采用如图6(a)所示的空间结构实现, 该结构的优点是技术相对简单, 易于实现; 但是同时存在很多缺点, 如光纤端面容易损伤、对机械稳定性和精度要求高、可靠性和环境适应性较差等, 不适合对稳定性要求较高的应用场合。真正让高功率光纤激光器走向实用的是IPG Photonics公司倡导的全光纤结构高功率光纤激光器, 如图6(b)所示, 该结构将光纤光栅作为谐振腔镜, 构成全光纤化激光谐振腔, 通过泵浦光纤合束器或其他方式实现高功率泵浦光到双包层光纤的全光纤化耦合, 从而实现高功率光纤激光器的全光纤化。全光纤的设计提高了系统的可靠性和环境适应性, 让光纤激光器走上了实用化的发展之路^[63]。

6 级联泵浦技术与万瓦级光纤激光器(2009年)

通过研读相关文献不难发现, 在3 kW光纤激光问世之前, 光纤激光的输出功率很大程度上受限于半导体激光的亮度, 文献中经常出现“受限于泵浦”、“pump-limited”一类的文字。以2 kW光纤激光为例^[61], 它采用了二级级联放大结构, 种子激光是一台输出功率为490 W的振荡器, 经过一级功率放大(泵浦源为36只100 μm 芯径/0.12数值孔径尾纤输出的20 W半导体激光器)后功率提升至1040 W, 再经过二级功率放大(泵浦源为72只100 μm 芯径/0.12数值孔径尾纤输出的20 W半导体激光器)后功率提升至1960 W。后续研究表明: 如果放大器的泵浦能力充足, 对数十瓦的种子激光采用一级功率放大即可实现2 kW(甚至

更高)功率输出^[64-66]。但在当时, 半导体泵浦源输出功率和亮度有限, 因此需要采用对高功率种子源多级功率放大的方式才能实现。实际上, 到了2010年, 100 μm 芯径/0.12数值孔径尾纤输出的半导体激光器输出功率就已经突破了100 W²⁾, 通过简单换算可知, 一级放大就可以保证5 kW输出。

采用“光纤激光”泵浦“光纤”(又称“级联泵浦”)是克服激光功率“受限于泵浦”的可行方案。级联泵浦方案早在1988年(甚至更早)就被用于掺铒光纤放大器^[67], 后又被用于瓦级光纤放大器^[68], 但真正引起高功率光纤激光研究者的关注则在20年之后。2008年, IPG Photonics公司在Laser Optics会议上宣布采用1018 nm光纤激光泵浦掺铒光纤, 实现了光纤激光输出功率从3 kW到6 kW的飞跃³⁾; 2009年, 该公司采用47路1018 nm光纤激光泵浦掺铒光纤, 实现了万瓦级功率输出^[69], 系统结构如图7所示。

采用1018 nm光纤激光泵浦掺铒光纤主要有两个方面的优势^[70,71]: 一是亮度方面的优势, 半导体激光的典型输出参数是100 W, 100 μm , 0.2数值孔径, 而相同功率的1018 nm光纤激光的典型输出参数是10 μm , 0.08数值孔径, 亮度高出了2~3个量级; 二是热管理的优势, 与常见的976 nm半导体激光泵浦相比, 1018 nm激光的波长与光纤激光最终输出波长(如1070 nm)更加接近, 有效降低了量子亏损带来的热效应。

7 光束合成与100 kW级光纤激光系统(2012和2013年)

光纤激光输出功率的提升会受到受激拉曼散射效应、受激布里渊散射效应、模式不稳定效应等物理因素的限制, 科研人员很早就意识到单纤激光输出功率

图6 (网络版彩图) 光纤激光器结构示意图。(a) 空间结构光纤激光器; (b) 全光纤结构光纤激光器

Figure 6 (Color online) The sketch for fiber laser structure. (a) Free-space optics setup; (b) all-fiber setup.

2) Technical program of International Conference on Laser Optics 2010.

3) Technical program of International Conference on Laser Optics 2008.

图7 (网络版彩图)IPG Photonics公司于2009年实现的万瓦级级联泵浦光纤激光器结构示意图^[69]

Figure 7 (Color online) The sketch for the 10 kW level tandem pumped fiber laser achieved by IPG Photonics in 2009 ^[69].

存在极限. 2008年Lawrence Livermore National Laboratory的Dawson等人^[47]发表的文献无疑是最具有代表性的, 该文预测常规光纤激光器的最大输出功率在30 kW量级, 后续又有文献对其进行了进一步补充或修正^[48,72,73]. 值得指出的是, 2011年以来才逐渐被发现和认知的模式不稳定效应(modal instability, 在第9节将会详细描述)已经成为继传统限制因素(如受激拉曼散射效应等)之外的光纤功率提升的新制约因素, 文献^[72,73]等的补充或修正正是基于上述新近发现的制约因素做出的.

对多束激光进行光束合成是获得更高功率输出的可行技术途径^[63,74~76], 而光纤激光器结构紧凑、易于模块化等特质使其十分适合于进行光束合成. 因此, 尽管光束合成的研究历史几乎和激光器的发明同步^[77], 但光纤激光无疑是研究最多的激光器类型^[78]. 光纤激光光束合成包括功率合成、光谱合成、相干合成等方法. 其中光谱合成和相干合成已有书籍和综述论文对其进行了详细归纳、分析和比较^[63,74~82], 下文重点介绍使得光纤激光系统输出功率从万瓦迈向100 kW的功率合成的代表性成果.

一是空间功率合成: 空间功率合成的最早代表当属美国海军的LaWS系统, 该系统由6台IPG Photonics公司生产的5.5 kW级光纤激光器(该型号的激光器原本用于工业加工)组成, 系统总功率为33 kW, 单台激光器的光束质量因子(BQ)约为5^[83]. 随后, 来自德国的两家研究机构将系统功率进一步提升至40和50 kW^[84,85]. 2012年9月, 欧洲导弹集团德国分公司(MBDA Germany)采用4台万瓦级光纤激光进行空间功率合成, 成功进行了40 kW级固态高能激光静态试验, 试验中在短短几秒内燃毁距离500 m的迫击炮弹,

引起了广泛关注. 同年底, 德国Rheinmetall GmbH成功开展了50 kW高能激光系统试验(从官网图片推测该系统是由5台万瓦级光纤激光组成的), 报道中称该激光系统“在2 km外击落了若干架处于俯冲状态的无人机”^[86,87].

二是全光纤功率合成: 全光纤功率合成是指将多根中等功率的单模光纤激光通过功率合束器合成到一根多模光纤中, 功率合束器是其中的核心器件. 全光纤功率合成方案已有很多报道^[88~91], 最早文献已经很难查询到, 但基于功率合束器实现超高功率输出的代表性成果无疑可以归属于IPG Photonics公司: 该公司2008年即已基于全光纤功率合成实现了50 kW输出, 在2013年的ASSL会议上, 该单位报道了首台100 kW级光纤激光系统^[92], 其结构如图8所示: 系统由90台千瓦级单模光纤激光器和两级功率合束器组成, 首先每15台单模激光经过一个19×1的功率合束器(其中有4个端口闲置未使用), 共形成6台一级功率合束光纤激光器; 随后6台一级功率合束光纤激光器再经过1个7×1的功率合束器(其中有1个端口闲置未使用)后从一根光纤输出, 总输出功率可达101.3 kW. 需要说明的是, 此类合束方法输出尾纤是多模光纤, 光束质量相对较差.

功率合成在提升系统输出功率的同时并不能保持光束质量; 相比之下, 光谱合成和相干合成则都具备提升功率的同时保持光束质量的能力. 因此, 对于同时需要高功率、高光束质量的应用场合, 光谱合成和相干合成更具有优势.

8 “任意波长、任意脉宽、任意功率”的光纤激光器(2018年)

除了诞生了世界上首台100 kW级光纤激光器以外, 2013年还涌现了很多重要成果, 如: 飞秒光纤激光器的输出功率首次达到千瓦级^[93]、全光纤结构单频光纤激光输出功率达到300 W级^[94]、单模光纤激光的输出功率提升至20 kW^[17]等. 此后, 光纤激光领域进一步呈现出加速发展态势: 如大能量型光纤激光实现单纤百毫焦级输出^[95]、全光纤结构中红外光纤激光器输出功率达到30 W^[96]、光纤激光光谱合成输出功率达到30 kW同时保持良好光束质量^[97]、单级全光纤结构光纤振荡器输出功率突破5 kW^[98,99]等, 上述成果都

图 8 首台 100 kW 级光纤激光系统结构示意图^[92]

Figure 8 The sketch for the first 100 kW level fiber laser system [92].

是基于“双包层”光纤实现的。从当前的视角看, 选取任何一项成果作为近5年来的代表作可能都会以偏概全, 或许2018年1月IPG Photonics公司的报告中的“any”一词最能代表目前的发展成果¹⁾: “any wavelength, mode of operation, power, beam quality or application”; 实际上该单位2017年的报告中⁴⁾就提及了这个词汇, 当时的报告中用到了“any wavelength, any pulse duration, any power”, 这三个“any”可能更加便于理解。在“any power”方面, IPG Photonics官网已有500 kW光纤激光器的报道, 图9所示的是对于“any wavelength”和“any pulse duration”的注释⁴⁾, 可以看出, 通过双包层掺杂光纤(掺铒、掺镱、掺钕、掺钐)激光及其与物质的非线性相互作用过程(参量振荡、倍频)等, 激光的输出光谱范围已经可以覆盖从紫外到中红外; 而通过调Q、锁模等技术, 光纤激光器的输出脉宽可以实现从准连续到飞秒的无缝覆盖, 其中皮秒、飞秒光纤激光器的峰值功率已经达到10 MW量级, 并在太阳能薄膜、薄金属切割等领域得到了广泛应用。

9 问题与展望

前述三个“any”体现了高平均功率光纤激光技术得到了蓬勃发展, 但并不意味着它的发展已经步入没有技术瓶颈的阶段。目前, 研发高平均功率光纤激光依然受到一系列因素的制约, 比较具有代表性的因素有: 光纤熔融、模式不稳定、光子暗化等。光纤熔融是指当功率密度超过某一阈值时, 可能观测到白色的亮光以数米/秒的速度向光源方向传输, 在白光经过的光纤纤芯处会产生一系列类似于子弹头形状的周期性小孔, 对光纤产生永久性破坏^[100,101]; 模式不稳定是指激光功率超过某个阈值后输出模式突变而引起光束质量退化的现象^[102]; 光子暗化是指随着运行时间的增加, 光纤激光器会出现由于光纤损耗增大而导致的输出功率减小的现象^[103]。参考文献[104]的描述以及上述因素发生的时间尺度, 我们可以将其概括为“瞬时不稳定”、“短时不稳定”和“长期不稳定”。上述三个“不稳定”是目前限制光纤激光平均功率提升和稳定高效

4) Investor Presentation (June 2017). <http://www.ipgphotonics.com>.

图 9 (网络版彩图)IPG Photonics公司对于“any wavelength”和“any pulse duration”的注释
Figure 9 (Color online) The note for “any wavelength” and “any pulse duration” by IPG Photonics.

应用的重要因素, 研究人员提出了大量对策^[105~107], 有效提升了高平均功率光纤激光系统的性能。

未来的技术突破点可能有两个方面: 一是通过引入新基质、新结构的光纤材料和结构设计, 如双包层光子晶体光纤^[108]、单/多沟壑双包层光纤^[109,110]、超低数值孔径双包层光纤^[111]、部分掺杂双包层光纤^[112]等; 二是对限制功率提升的因素由以往的“抑制”改为“调控”, 如受激拉曼散射效应一直是限制功率提升的典型非线性效应^[113], 近年来科研人员通过引导受激拉曼散射效应, 也获得了数千瓦高功率输出^[114~116], 并有望成为一种获得万瓦级高功率输出的新方案^[117]。

10 结语

本文通过选取重要里程碑节点的方式简略回顾了双包层光纤诞生30年来高功率光纤激光发展史。沿着“双包层光纤的发明(1988年)—掺铒双包层光纤的使

用(1994年)—百瓦级光纤激光器(1999年)—大模场双包层光纤及千瓦级光纤激光器(2004年)—级联泵浦技术与万瓦级光纤激光器(2009年)—光束合成与100 kW级光纤激光系统(2012和2013年)—‘任意波长、任意脉宽、任意功率’的光纤激光器(2018年)”的脉络不难发现, 在30年的发展过程中, 几乎每隔4~5年就有重要的成果涌现。上述成果已经广泛应用于先进制造、能源勘探、生物、国防等领域。近年来, 以人工智能、物联网为代表的高新科技飞速发展, 随着新一轮科技革命和产业革命的加速演进, 与新兴学科的交叉为光纤激光的研究与发展带来了新的机遇, 同时有望在引力波探测^[118]、激光加速器^[119]等大科学工程(大科学装置)中得到应用。

谈及光纤激光, 高锟、Payne和Gapontsov等专家因其在光纤、光纤通信和高功率光纤激光等领域的巨大贡献为人熟知; 本文的文献梳理结果显示, Snitzer不仅仅是双包层光纤的发明人^[14], 同时也是近60年前第一

台光纤激光器的发明人^[2], 并在光纤激光级联泵浦等领域^[64]也做出了开创性的工作, 为光纤激光“从无到有”、“从低功率到高功率”等做出了巨大的历史性贡献. Snitzer已于2012年去世, 作者谨以此文缅怀和致敬.

有”、“从低功率到高功率”等做出了巨大的历史性贡献. Snitzer已于2012年去世, 作者谨以此文缅怀和致敬.

参考文献

- 1 Snitzer E. Optical maser action of Nd^{3+} in a barium crown glass. *Phys Rev Lett*, 1961, 7: 444–446
- 2 Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers. *J Appl Phys*, 1961, 32: 36–39
- 3 Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser. *Appl Opt*, 1964, 3: 1182–1186
- 4 Stone J, Burrus C A. Neodymium-doped fiber lasers: Room temperature CW operation with an injection laser pump. *Appl Opt*, 1974, 13: 1256–1258
- 5 Stone J, Burrus C A. Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry. *Appl Phys Lett*, 1973, 23: 388–389
- 6 Mears R J, Reekie L, Poole S B, et al. Neodymium-doped silica single-mode fibre lasers. *Electron Lett*, 1985, 21: 738–740
- 7 Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, et al. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm . *Electron Lett*, 1987, 23: 1026
- 8 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27: B63
- 9 Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [Invited]. *Appl Opt*, 2014, 53: 6554–6568
- 10 Li J Y, Li H Q, Jiang Z W, et al. Analysis of present status of rare-earth doped fibers (in Chinese). *Study Opt Commun*, 2006, 32: 41–43 [李进延, 李海清, 蒋作文, 等. 我国掺稀土光纤的现状分析. 光通信研究, 2006, 32: 41–43]
- 11 Yao J Q, Ren G J, Zhang Q, et al. Yb doped double clad fiber laser and pump coupling technology (in Chinese). *Laser J*, 2006, 27: 1–4 [姚建铨, 任广军, 张强, 等. 掺镱双包层光纤激光器及其泵浦耦合技术. 激光杂志, 2006, 27: 1–4]
- 12 Lou Q H, Zhu J Q, Zhou J, et al. Double cladding fiber laser and its application in military (in Chinese). *J Acad Equip Command Tech*, 2003, 14: 28–32 [楼祺洪, 朱健强, 周军, 等. 双包层光纤激光器及其在军事中的应用. 装备指挥技术学院学报, 2003, 14: 28–32]
- 13 Lv K C, Liu W W, Lv F Y, et al. Cladding pumping fiber laser (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 1999, 5: 288–292 [吕可诚, 刘伟伟, 吕福云, 等. 包层泵浦光纤激光器. 中国科学基金, 1999, 5: 288–292]
- 14 Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double clad, offset core Nd Fiber laser. In: *Optical Fiber Sensors*, Vol. 2 of OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1988). New Orleans, 1988. PD5
- 15 O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*. Baltimore, 2009. CThA3
- 16 Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers*. Dresden, 2009
- 17 Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market. In: *CLEO: Applications and Technology*. San Jose, 2013. AF2J.1
- 18 Shi W, Schulzgen A, Amezcua R, et al. Fiber lasers and their applications: Introduction. *J Opt Soc Am B*, 2017, 34: FLA1
- 19 Zhou J, Wang P, Zhou P. The introduction of “High-power fiber laser technology” special issue. *Chin J Lasers*, 2017, 44: 201000 [周军, 王璞, 周朴. “高功率光纤激光技术”专题前言. 中国激光, 2017, 44: 201000]
- 20 Harun S W, Alam S U, Kurkov A S, et al. Introduction to the issue on fiber lasers. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20: 5–7
- 21 Rosales-Garcia A, Tobioka H, Abedin K, et al. 2.1 kW single mode continuous wave monolithic fiber laser. In: *Shaw L B, ed. Fiber Lasers XII: Technology, Systems, and Applications*. San Francisco, 2015. 93441G
- 22 Zhang H, Xiao H, Zhou P, et al. 322 W single-mode Yb-doped all-fiber laser operated at 1120 nm. *Appl Phys Express*, 2014, 7: 052701
- 23 Du X, Zhang H, Wang X, et al. Short cavity-length random fiber laser with record power and ultrahigh efficiency. *Opt Lett*, 2016, 41: 571–574
- 24 Minelly J D, Taylor E R, Jedrzejewski K P, et al. Laser-diode-pumped neodymium-doped fiber laser with output power >1 W. In: *Johnson A, Lind R, Baer T, et al., eds. Conference on Lasers and Electro-Optics*. California, 1992. CWE6
- 25 Po H, Cao J D, Laliberte B M, et al. High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser. *Electron Lett*, 1993, 29: 1500–1501
- 26 Zellmer H, Willamowski U, Tünnermann A, et al. High-power CW neodymium-doped fiber laser operating at 92 W with high beam quality. *Opt Lett*, 1995, 20: 578–580
- 27 Zhou S H. The heat managements of the solid-state lasers (in Chinese). *Chin J Quant Electron*, 2005, 22: 497–509 [周寿桓. 固体激光器中的热管理. 量子电子学报, 2005, 22: 497–509]

- 28 Zellmer H, Tünnermann A, Welling H, et al. Double-clad fiber laser with 30 W output power. In: Zervas M, Willner A, Sasaki S, eds. *Optical Amplifiers and Their Applications*, Victoria. Canada, 1997. FAW18
- 29 Pask H M, Carman R J, Hanna D C, et al. Ytterbium-doped silica fiber lasers: Versatile sources for the 1–1.2 μm region. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1995, 1: 2–13
- 30 Etzel H W, Gandy H W, Ginther R J. Stimulated emission of infrared radiation from ytterbium activated silicate glass. *Appl Opt*, 1962, 1: 534–536
- 31 Hanna D C, Pask H M, Townsend J E, et al. Yb-doped silica cladding-pumped fiber laser pumped at 974 nm. In: Fan T, Chai B, eds. *Advanced Solid State Lasers*. Salt Lake City, 1994. YL1
- 32 Pask H M, Archambault J L, Barber P R, et al. Recent advances in Yb^{3+} -doped silica fiber lasers. In: Baer T, Smirl A, Bowers J, et al., eds. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Anaheim, 1994. CWP3
- 33 Pask H M, Archambault J L, Hanna D C, et al. Operation of cladding-pumped Yb^{3+} -doped silica fibre lasers in 1 μm region. *Electron Lett*, 1994, 30: 863–865
- 34 Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2014, 20: 219–241
- 35 Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass Tm:fiber laser. In: Tankala K, ed. *Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications*. San Francisco, 2010
- 36 Lin H, Feng Y, Feng Y, et al. 656 W Er-doped, Yb-free large-core fiber laser. *Opt Lett*, 2018, 43: 3080
- 37 Hemming A, Simakov N, Davidson A, et al. A monolithic cladding pumped holmium-doped fibre laser. In: *CLEO: Science and Innovations 2013*. San Jose, 2013. CW1M.1
- 38 Inniss D, DiGiovanni D J, Strasser T A, et al. Ultrahigh-power single-mode fiber lasers from 1.065 to 1.472 μm using Yb-doped cladding pumped and cascaded Raman lasers. In: Killinger D, Valley G, Chang-Hasnain C, et al., eds. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Baltimore, 1997. CPD31
- 39 Muendel M, Engstrom B, Kea D, et al. 35-Watt CW single mode ytterbium fiber laser at 1.1 μm . In: Killinger D, Valley G, Chang-Hasnain C, et al., eds. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Baltimore, 1997. CPD30
- 40 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fibre laser. *Electron Lett*, 1999, 35: 1158–1160
- 41 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser. In: Chang-Hasnain C, Knox W, Kafka J, et al., eds. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Baltimore, 1999. CPD11
- 42 Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers. *Opt Commun*, 1996, 132: 511–518
- 43 Kouznetsov D, Moloney J V, Wright E M. Efficiency of pump absorption in double-clad amplifiers I. Fiber with circular symmetry. *J Opt Soc Am B*, 2001, 18: 743–749
- 44 Doya V, Legrand O, Mortessagne F. Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier. *Opt Lett*, 2001, 26: 872–874
- 45 Kouznetsov D, Moloney J V. Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers II Broken circular symmetry. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19: 1259–1263
- 46 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 2013
- 47 Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power. *Opt Express*, 2008, 16: 13240–13266
- 48 Zhu J, Zhou P, Ma Y, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers. *Opt Express*, 2011, 19: 18645–18654
- 49 Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering. *Appl Opt*, 1972, 11: 2489–2494
- 50 Taverner D, Richardson D J, Dong L, et al. 158- μJ pulses from a single-transverse-mode, large-mode-area erbium-doped fiber amplifier. *Opt Lett*, 1997, 22: 378–380
- 51 Lees G P, Taverner D, Richardson D J, et al. Q-switched erbium doped fibre laser utilising a novel large mode area fibre. *Electron Lett*, 1997, 33: 393–394
- 52 Koplow J P, Kliner D A V, Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier. *Opt Lett*, 2000, 25: 442–444
- 53 Jeong Y, Sahu J K, Williams R B, et al. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 272 W output power. *Electron Lett*, 2003, 39: 977–978
- 54 Platonov N, Gapontsev V P, Shkurihin O, et al. 400 W low-noise single-mode CW ytterbium fiber laser with an integrated fiber delivery. In:

- Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference. Baltimore, 2003. CThPDB9
- 55 Limpert J, Liem A, Zellmer H, et al. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality. *Electron Lett*, 2003, 39: 645
 - 56 Jeong Y, Sahu J K, Baek S, et al. Cladding-pumped ytterbium-doped large-core fiber laser with 610 W of output power. *Opt Commun*, 2004, 234: 315–319
 - 57 Liu C H, Galvanauskas A, Ehlers B, et al. 810-W single transverse mode Yb-doped fiber laser. In: Quarles G, ed. *Advanced Solid State Photonics*. Santa Fe, 2004. 87
 - 58 Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Opt Express*, 2004, 12: 6088
 - 59 Bonati G, Voelckel H, Gabler T, et al. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser. In: *Photonics West 2005*. San Jose, 2005. 5709
 - 60 Gapontsev V P. High power, kilowatt class fiber lasers are winning and securing new opportunities in automotive and heavy industry. In: *Photonics West 2004*. San Jose, 2004
 - 61 Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, et al. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness. In: *Lasers and Electro-Optics Europe*. Munich, 2005
 - 62 Gapontsev V P. New milestones in development of super high power fiber lasers. In: *Photonics West, OE/LASE 2006*. San Jose, 2006
 - 63 Liu Z J, Zhou P, Xu X J, et al. *Coherent Beam Combining of High Average Power Fiber Lasers* (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2016 [刘泽金, 周朴, 许晓军, 等. 高平均功率光纤激光相干合成. 北京: 国防工业出版社, 2016]
 - 64 Ma P, Tao R, Su R, et al. 189 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality. *Opt Express*, 2016, 24: 4187
 - 65 Xu J, Zhou P, Liu W, et al. Exploration in performance scaling and new application avenues of superfluorescent fiber source. *IEEE J Sel Top Quant*, 2018, 24: 1–10
 - 66 Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 43 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier. *Opt Express*, 2017, 25: 14892
 - 67 Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm Yb sensitized Er oscillator. In: *Optical Fiber Communication Conference*. New Orleans, 1988. PD2
 - 68 Minelly J D, Laming R I, Townsend J E, et al. High-gain fibre power amplifier tandem-pumped by a 3 W multi-stripe diode. In: *Optical Fiber Communications Conference*. San Jose, 1992. TuG2
 - 69 Injeyan H, Goodno G. *High Power Laser Handbook*. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011
 - 70 Xiao H, Leng J Y, Zhou P, et al. High power tandem-pumped Yb-doped fiber laser (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2017, 44: 100–111 [肖虎, 冷进勇, 周朴, 等. 高功率级联抽运掺镱光纤激光器研究进展. 中国激光, 2017, 44: 100–111]
 - 71 Zhou P, Xiao H, Leng J, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping. *J Opt Soc Am B*, 2017, 34: A29
 - 72 Zervas M N. Power scaling limits in high power fiber amplifiers due to transverse mode instability, thermal lensing, and fiber mechanical reliability. In: Hartl I, Carter A L, eds. *Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. San Francisco, 2018. 1051205
 - 73 Otto H-J, Jauregui C, Limpert J, et al. Average power limit of Ytterbium-doped fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality. In: Ballato J, ed. *Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*. San Francisco, 2016. 97280E
 - 74 Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11: 567–577
 - 75 Liu Z J, Zhou P, Xu X J, et al. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 1597–1606
 - 76 Brignon A. *Coherent Laser Beam Combining*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013
 - 77 Liu Z J, Zhou P, Wang X L, et al. The history, development and trend of coherent combining of laser beams (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2010, 2221–2234 [刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势. 中国激光, 2010, 2221–2234]
 - 78 Zhou P, He B. Foreword of “Beam combining of fiber lasers” special issue. *Infrared Laser Eng*, 2018, 47: 11 [周朴, 何兵. “光纤激光光束合成”专栏序言. 红外与激光工程, 2018, 47: 11]
 - 79 Leger J R, Nilsson J, Huignard J P, et al. Introduction to the issue on laser beam combining and fiber laser systems. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15: 237–239
 - 80 Su R T, Zhou P, Zhang P F, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2018, 47: 13–31 [粟荣涛, 周朴, 张鹏飞, 等. 超短脉冲光纤激光相干合成. 红外与激光工程, 2018, 47: 13–31]

- 81 Sprangle P, Ting A, Penano J, et al. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45: 138–148
- 82 Liu Z, Ma P, Su R, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: Progress and prospect. *J Opt Soc Am B*, 2017, 34: A7
- 83 Pawlak R J. Recent developments and near term directions for Navy Laser Weapons System (LaWS) testbed. In: Ackermann H, Bohn W L, eds. High-Power Lasers 2012: Technology and Systems. Edinburgh, 2012. 854705
- 84 Protz R, Zoz J, Geidek F, et al. High-power beam combining—A step to a future laser weapon system. In: Ackermann H, Bohn W L, eds. High-Power Lasers 2012: Technology and Systems. Edinburgh, 2012. 854708
- 85 Mohring B, Dietrich S, Tassini L, et al. High-energy laser activities at MBDA Germany. In: Dubinskii M, Post S G, eds. Laser Technology for Defense and Security IX. Baltimore, 2013. 873304
- 86 Ludewigt K, Riesbeck T, Schünemann B, et al. Overview of the laser activities at Rheinmetall Waffe Munition. In: Ackermann H, Bohn W L, eds. High-Power Lasers 2012: Technology and Systems. Edinburgh, 2012. 854704
- 87 Ludewigt K, Riesbeck T, Graf A, et al. 50 kW laser weapon demonstrator of Rheinmetall Waffe Munition. In: Titterton D H, Richardson M A, Grasso R J, et al., eds. Technologies for Optical Countermeasures X, and High-Power Lasers 2013: Technology and Systems. Dresden, 2013. 88980N
- 88 Eschrich T, Hoh D, Just F, et al. Incoherent beam combining of 5.1 kW using a 7×1 signal combiner into a 50 μm core output fiber. In: Advanced Photonics. Barcelona, 2014. JTu6A.1
- 89 Jager M, Plotner M, Eschrich T, et al. High-brightness incoherent combination of fiber lasers in 7×1 fiber couplers at average powers > 5 kW. *J Lightwave Technol*, 2015, 33: 4297–4302
- 90 Lei C, Gu Y, Chen Z, et al. Incoherent beam combining of fiber lasers by an all-fiber 7×1 signal combiner at a power level of 14 kW. *Opt Express*, 2018, 26: 10421–10427
- 91 Noordegraaf D, Maack M D, Skovgaard P M W, et al. All-fiber 7×1 signal combiner for incoherent laser beam combining. In: Dawson J, ed. Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications. San Francisco, 2011. 79142L
- 92 Shcherbakov E, Fomin V, Abramov A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser. In: Advanced Solid State Lasers. Paris, 2013. ATh4A.2
- 93 Wan P, Yang L M, Liu J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers. *Opt Express*, 2013, 21: 29854–29859
- 94 Ma P, Zhou P, Ma Y, et al. Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality. *Appl Opt*, 2013, 52: 4854–4857
- 95 Shen X, Zhang H, Gong M. High energy (100 mJ) and high peak power (8 MW) nanosecond pulses delivered by fiber lasers and self-focusing analysis based on a novel mode decomposition method. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, 24: 1–6
- 96 Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 294 μm. *Opt Lett*, 2015, 40: 2882
- 97 Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling. In: Glebov A L, Leisher P O, eds. Components and Packaging for Laser Systems II. San Francisco, 2016. 97300Y
- 98 Zhang H W, Yang B L, Wang X L, et al. The output power of all-fiber oscillator based on home-made fiber gratings exceeding 5.2 kW (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2018, 45: 0415002 [张汉伟, 杨保来, 王小林, 等. 基于国产光栅的全光纤振荡器输出功率突破5.2 kW. *中国激光*, 2018, 45: 0415002]
- 99 Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing. In: Hartl I, Carter A L, eds. Fiber Lasers XV: Technology and Systems. San Francisco, 2018. 105120C
- 100 Kashyap R. The Fiber Fuse—From a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective. *Opt Express*, 2013, 21: 6422–6441
- 101 Zhang H, Zhou P, Wang X, et al. Fiber fuse effect in high-power double-clad fiber laser. In: 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Kyoto, 2014. WPD_4
- 102 Tao R M, Zhou P, Xiao H, et al. Progress of study on mode instability in high power fiber amplifiers (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2014, 51: 020001 [陶汝茂, 周朴, 肖虎, 等. 高功率光纤激光中模式不稳定现象研究进展. *激光与光电子学进展*, 2014, 51: 020001]
- 103 Liu C P, Liao L, Li J Y. Research progress on photodarkening of Yb-doped fiber lasers (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2016, 53: 070002 [刘超平, 廖雷, 李进延. 掺镱光纤激光器光子暗化现象的研究进展. *激光与光电子学进展*, 2016, 53: 070002]
- 104 Ye C, Petit L, Koponen J J, et al. Short-term and long-term stability in ytterbium-doped high-power fiber lasers and amplifiers. *IEEE J Sel Top*

- [Quantum Electron](#), 2014, 20: 188–199
- 105 Zhao N, Xing Y B, Li J M, et al. 793 nm pump induced photo-bleaching of photo-darkened Yb^{3+} -doped fibers. [Opt Express](#), 2015, 23: 25272–25278
- 106 Zhou P. Fundamentals of high-average-power fiber laser technology: Mode (in Chinese). *High Power Laser Particl Beams*, 2018, 30: 8–21 [周朴. 高平均功率光纤激光技术基础: 模式. 强激光与粒子束, 2018, 30: 8–21]
- 107 Otto H J, Jauregui C, Stutzki F, et al. Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector. [Opt Express](#), 2013, 21: 17285–17298
- 108 Limpert J, Stutzki F, Jansen F, et al. Yb-doped large-pitch fibres: Effective single-mode operation based on higher-order mode delocalisation. [Light Sci Appl](#), 2012, 1: e8
- 109 Jain D, Baskiotis C, May-Smith T C, et al. Large mode area multi-trench fiber with delocalization of higher order modes. [IEEE J Sel Top Quantum Electron](#), 2014, 20: 242–250
- 110 Jain D, Alam S, Jung Y, et al. Highly efficient Yb-free Er-La-Al doped ultra-low NA large mode area single-trench fiber laser. [Opt Express](#), 2015, 23: 28282–28287
- 111 Huang L, Sun H, Leng J, et al. 736 W average power all-fiber nanosecond MOPA based on ultra-low NA ytterbium doped fiber. In: *Advanced Solid State Lasers*. Berlin, 2015. AM5A.50
- 112 Marcianite J R. Gain filtering for single-spatial-mode operation of large-mode-area fiber amplifiers. [IEEE J Sel Top Quantum Electron](#), 2009, 15: 30–36
- 113 Liu W, Ma P, Lv H, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy. [Opt Express](#), 2016, 24: 26715–26721
- 114 Zhang L, Liu C, Jiang H, et al. Kilowatt Ytterbium-Raman fiber laser. [Opt Express](#), 2014, 22: 18483–18489
- 115 Zhang H, Tao R, Zhou P, et al. 1.5-kW Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier at 1120 nm. [IEEE Photon Technol Lett](#), 2015, 27: 628–630
- 116 Xiao Q, Yan P, Li D, et al. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser. [Opt Express](#), 2016, 24: 6758–6768
- 117 Zhang H, Zhou P, Xiao H, et al. Toward high-power nonlinear fiber amplifier. [High Pow Laser Sci Eng](#), 2018, 6: e51
- 118 Wellmann F, Booker P, Hochheim S, et al. Recent progress on monolithic fiber amplifiers for next generation of Gravitational wave detectors. In: Hartl I, Carter A L, eds. *Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. San Francisco, 2018. 105120I
- 119 Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators. [Nat Photon](#), 2013, 7: 258–261

High-power double-cladding fiber lasers: A 30-year overview

ZHOU Pu, HUANG LiangJin, LENG JinYong, XIAO Hu, XU JiangMing & YAO TianFu

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

The invention of a double-cladding fiber in 1988 has evolved the conventional view that a fiber laser is only a weak-power source. This paper presents a 30-year evolution of the high-power fiber lasers, including seven important milestones that are summarized according to the time sequence. The key technologies, such as ytterbium-doped fiber, large-mode-area fiber, tandem pumping, and beam combination, are introduced. The promotion of the output power of fiber lasers from the watt-level to 100-kW-level is presented. Finally, the latest research result of the fiber laser summarized as “any wavelength, pulse duration, and power” is reviewed, as well as the development trend and the application prospect of high-power fiber lasers.

fiber laser, double clad, high power, ytterbium doping, tandem pumping, beam combination

doi: [10.1360/N092018-00409](https://doi.org/10.1360/N092018-00409)