大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展

杨昌盛¹, 徐善辉¹, 周军², 何兵², 杨依枫², 渠红伟³, 赵智德⁴, 杨中民^{1*}

1. 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

3. 中国科学院半导体研究所固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

4. 苏州长光华芯光电技术有限公司, 苏州 215000;

*E-mail: yangzm@scut.edu.cn

收稿日期: 2016-12-18; 接受日期: 2017-03-24; 网络出版日期: 2017-05-18

国家重点研发计划(编号: 2016YFB0402200)资助项目

摘要 相比于其他类型激光器, 大功率光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、热管理方便等优点, 在工业、国防等领域有着广泛的应用前景. 其中高增益光纤材料与元件、高质量激光泵源、高性能激光种子源成为了制约万瓦级光纤激光器发展的主要因素. 本文介绍了大功率光纤激光材料与器件的发展现状, 分析讨论了高增益双包层光纤与元件(光纤光栅、包层光剥离器、合束器等)、激光泵源、单频光纤激光种子源等关键技术, 对国产万瓦级乃至数万瓦级光纤激光技术的发展进行了展望.

关键词 光纤激光, 双包层光纤, 激光泵源, 单频激光

1 引言

大功率光纤激光器是以稀土离子掺杂双包层光纤为工作介质的一种新型全固态激光器. 相比于传统固体激光器而言, 其具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、易于散热等明显优势, 在先进制造业、军事国防、科研、医疗等众多领域有着重要的应用前景, 是国际上激光技术领域研究热点^[1-4]. 得益于双包层光纤控制技术与大功率半导体激光器制作工艺的不断发展与完善, 光纤激光器的转换效率与输出功率获得大幅度提升. 尤其在工业加工、定向能武器、长距离遥测、激光雷达等应用需求的牵引下, 以美国IPG Photonics公司、Nufern公司、nLIGHT公司、英国SPI

公司和德国通快集团等为代表的国外研究机构、企业, 纷纷对大功率光纤激光器进行积极研发, 相继推出了连续波功率从数十瓦到数万瓦的商用化光纤激光器产品, 并且部分产品对我国实行限制性出口或者禁运. 可以发现, 激光及其激光技术的发展与应用, 极大地促进了人类生产力的蓬勃发展^[5], 深刻地影响了人们生活的方方面面.

其中, 激光制造具有非接触、超精细、快速、无应力等优势, 正推动着传统制造向智能制造的转型, 以“光制造”为代表的新技术对工业制造带来了革命性变革, 而万瓦级大功率光纤激光作为高端激光制造的核心光源, 极其重要. 目前, 实现万瓦级乃至数万瓦级单模光纤激光的主要技术方式包括两种: (1) 直接

引用格式: 杨昌盛, 徐善辉, 周军, 等. 大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1038-1048
Yang C S, Xu S H, Zhou J, et al. Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1038-1048, doi: 10.1360/N092016-00437

单根光纤输出; (2) 激光合束输出. 前者是将一定功率(千瓦量级)光纤激光器作为种子源, 通过单根高性能掺 Yb^{3+} 双包层光纤直接将功率放大至万瓦级甚至更高功率, 由于受到非线性效应、泵浦源亮度、光纤材料和器件本身损伤等一些因素的限制, 单根光纤激光的输出功率毕竟有限, 其宽谱、严格单模输出时的理论极限功率约为13 kW^[6-8]. 后者是将多路光纤激光通过相干合束或者光谱合束的方式, 产生高光束质量的激光输出. 早在2013年, 美国IPG Photonics公司用半导体激光器(LD)进行端面泵浦(图1(a)), 实现了当前最大功率20 kW近单模(M^2 小于2)激光输出. 2014年, 美国洛克希德马丁公司采用光谱合束技术实现了33 kW输出; 至2016年, 美国空军实验室采用相干合成技术实现了4.9 kW单模输出^[9].

国内科研院所与企业也积极开展了大功率光纤激光的研究, 其中中国科学院上海光学精密机械研究所(简称中科院上海光机所)、清华大学分别基于LD端面泵浦, 实现了单纤7和10 kW输出; 国防科技大学和中国工程物理研究院用分布式侧面耦合包层泵浦(GT-wave泵浦, 如图1(b)所示), 于2014和2015年分别实现了1和2 kW输出^[10,11]; 中科院上海光机所和中国工程物理研究院采用光谱合成技术分别实现了10.8和9.6 kW输出^[12,13]; 国防科技大学采用相干合成技术实现了功率2.16 kW单模激光输出^[14]. 此外, 国内能够研发、生产、销售大功率光纤激光器的代表性企业主要包括: 武汉锐科公司和深圳创鑫公司. 其中武汉锐科公司推出了输出功率涵盖1~10 kW的大功率连续多模光纤激光器产品; 深圳创鑫公司也推出了连续功率1.5 kW单模光纤激光器和4 kW多模光纤激光器产品.

通过对比国内外的研究结果, 可以发现: 国内研究机构对于大功率光纤激光刚刚迈入万瓦级功率的门槛, 且停留在实验样机的状态, 对于商品化产品跟国外研究机构或激光器厂商的差距较大. 究其原因, 我国在万瓦级光纤激光技术方面的落后主要源于在高增益光纤材料与元件、高质量激光泵源、高性能激光种子源等技术的落后和进口的限制, 使得国产万瓦级大功率光纤激光存在以下技术瓶颈: (1) 高增益双包层光纤的稀土离子掺杂均匀性差导致增益不均衡, 在大功率激光输出时存在一定损伤和暗化效应; (2) 大功率下光纤光栅退化与损伤、合束器与包层光剥离器承受激光功率较低, 无法满足万瓦级激光的工作要

图1 (网络版彩图)端面泵浦和GT-wave侧面泵浦结构示意图

求; (3) 激光泵源的输出功率与亮度不高, 与光纤耦合效率较低, 导致大功率光纤激光器的插拔效率较低; (4) 用于大功率激光合束的单频激光种子源功率低、噪声高, 导致合束后激光质量差、激光功率无法提升.

因此, 亟待发展新型万瓦级光纤激光材料和器件, 突破其关键技术, 实现拥有自主知识产权的国产化高增益光纤、光器件、高亮度泵浦源、高性能种子源等, 打破国外技术封锁和产品垄断, 为我国单路万瓦级高功率光纤激光的国产化提供基础支撑, 为未来万瓦以上更高功率光纤激光铺平道路, 最终能够对我国高技术产业和国防建设的可持续化发展产生重大意义.

本文主要从构筑与制约万瓦级光纤激光的关键部分——光纤激光材料与器件出发, 介绍了近年来高增益光纤材料与元件、高质量激光泵源、高性能激光种子源的研究进展情况, 分析了当前高增益双包层光纤与元件(光纤光栅、包层光剥离器、合束器等)、激光泵源、单频激光种子源等关键技术, 介绍了国内外一些科研院所与企业在光纤激光材料与器件方面所做的部分工作, 并对大功率光纤激光材料与器件的发展动向进行了展望.

2 研究现状

在近十年以来, 大功率光纤激光技术得到了飞快发展, 究其原因除了光纤激光器本身的独特优势之外, 受到市场行为推广的光纤激光材料与器件(即高增益双包层光纤、光纤光栅、合束器、包层光剥离器、大功率泵浦源等)对激光器的发展起到了至关重要的作用. 图2所示为万瓦级大功率光纤激光装置结构示意图, 无论是“单路光纤放大”还是“多路光束合成”方案, 光纤激光系统都主要由: 激光种子源、激光泵源、光纤材料与元件(合束器、包层光剥离器等)等几个关键部分组成, 下面分别予以介绍.

图2 (网络版彩图) 万瓦级大功率光纤激光装置结构示意图

2.1 核心光纤材料与元件

1988年, Snitzer等人^[15]描述了包层泵浦光纤激光器。1989年, 英国南安普顿大学的Hanna等人^[16]报道光纤激光输出, 随后其发展潜力逐渐显现出来, 高功率激光输出功率的记录不断被刷新。20世纪90年代晚期, 大模场面积双包层光纤的采用进一步促进了激光功率的提升, 使用大模场面积光纤的同时采取模式(横模)控制技术, 使得激光在大芯径少模光纤中能够单模运转, 极大地提高了非线性效应的阈值。从20世纪90年代开始, 俄罗斯、英国、美国、法国和日本等发达国家的主流研究机构先后对双包层光纤激光器相关材料和器件开展了大量的研究工作。

在大功率光纤激光器应用中, 掺Yb³⁺大模场面积光纤及基于大模场面积光纤的无源光器件占据了主流位置^[1]。2009年, 美国的IPG Photonics公司率先研制出单纤输出功率达10 kW的掺Yb³⁺双包层光纤, 并采用此种光纤搭建了万瓦级光纤激光器装置, 其方案示意图如图3所示^[17]。同时, 美国Nufern公司、英国SPI公司等研究单位也先后掌握了高增益光纤材料核心技术, 并且推出了相应的数千瓦级光纤激光器产品。在高功率光无源器件方面, 最近, 德国Laser Component公司推出了单臂承受功率达到2 kW的光纤合束器产品, 加拿大ITF公司推出了单臂承受功率超过400 W的光纤合束器产品。加拿大TeraXion公司推出了承受功率超

图3 (网络版彩图) IPG公司10 kW激光器方案^[17]

过3 kW的光纤光栅产品。包层光剥离器方面目前国外公开报道的结果较少, 一般认为已经达到千瓦量级水平^[18]。

国内科研院所与企业在大功率光纤激光器的研究方面起步较晚, 但发展迅速, 已经取得了瞩目的成绩。清华大学、国防科技大学、中科院上海光机所、天津大学、中国工程物理研究院、中国科学院西安光学精密机械研究所等众多单位积极开展大功率光纤材料和元件的理论实验研究, 推动了国内大功率光纤激光的发展^[19-23]。在光纤材料方面, 华中科技大学研制的大模场面积掺Yb³⁺光纤在国内率先获得了大于7 kW输出, 中国电子科技集团公司(简称中电集团)第23研究所、46所等单位也推出了数千瓦的产品。在光纤合束器方面, 中科院上海光机所研制的(6+1)×1光纤合束器目前单臂承受功率已超过1.2 kW; 深圳朗光科技有限公司开发的商用(6+1)×1光纤合束器单臂承受功率>200 W。在光纤光栅方面, 中科院上海光机所研制了承受功率超过1 kW的大模场面积光纤光栅, 并完成了其高功率封装与测试。在包层光剥离器方面, 深圳朗光科技有限公司开发了基于大模场面积双包层光纤的包层光剥离器, 其最大承受功率达到800 W, 中科院上海光机所研制的包层光剥离器承受功率>700 W^[12]。

2.2 高亮度半导体激光泵源

随着半导体激光器制作工艺的不断发展, 无论其作为直接光源还是作为其他激光器的泵源, 半导体激光器在加工、国防、显示及医疗等领域都展现出巨大的应用前景^[24-27]。尤其是将带尾纤耦合输出的半导体激光器作为泵源直接抽运光纤激光器, 其中泵浦波长、泵源亮度、泵源功率对于光纤激光器来

说至关重要. 一般而言, 掺 Yb^{3+} 双包层光纤中的镱离子(Yb^{3+})具有很高的吸收截面、较宽的吸收光谱(典型值为910~980 nm), 能与InGaAs半导体泵浦源有效结合, Yb^{3+} 的典型吸收谱如图4所示. 波长范围处于910~980 nm的高功率多模半导体激光器能够很好地满足大功率光纤激光对泵源的使用要求. 总之, 大功率光纤激光器非常需要高亮度半导体激光芯片及由多个芯片合束的高功率光纤耦合输出模块.

在高亮度半导体激光器芯片方面, 随着外延结构设计、外延晶体生长、腔面处理工艺、芯片封装等核心技术的不断发展, 9xx nm半导体激光器的功率从20年前的1 W发展到目前的15 W(90 μm 条宽)左右, 即保持着平均15%的年增幅. 其中9xx nm半导体激光器芯片是泵源的核心器件, 国际上技术领先的单位有美国IPG Photonics, Lumentum Operations LLC(原JDSU), 美国nLight Photonics等^[28-31]. 截止到2016年, 上述公司的90 μm 条宽单管芯片功率水平保持在10~15 W. 长期以来我国在此领域远落后于国外, 国内关于半导体激光器的研究早期主要受到外延及腔面处理技术水平的限制, 在功率、效率等关键性能方面均落后于国外, 可靠的单管芯片功率远低于10 W(90 μm 条宽). 国内山东浪潮华光与中电集团13所目前976 nm单管芯片在售产品最高功率为8 W. 相比而言, 近年快速发展的苏州长光华芯公司依靠自身技术的积累, 成功推出的976 nm单管芯片产品功率已达13~15 W, 且有较好的发展态势, 比肩国际水平.

在半导体激光泵源(光纤耦合输出模块)方面, 早期是基于单个芯片的光纤耦合输出方式, 但是其输出功率仅几瓦. 后来, 随着合束技术的出现与不断发展, 通过集成多个芯片从而提高泵源的耦合输出功率. 目前, 工业应用的半导体激光泵源输出功率一般小于200 W, 能够推出输出功率超过500 W的单波长成熟泵源产品的厂家极少. 一些著名的国外厂商, 如: 德国Dilas公司于2011年报道了功率775 W(光纤芯径200 μm , 数值孔径0.22)的单波长976 nm激光输出^[31]; 美国Teradiode公司于2011年报道了功率1040 W(光纤芯径200 μm , 数值孔径0.18)的单波长966 nm光纤耦合输出模块^[32], 而Teradiode公司此后基于光谱合束技术, 推出了多款多波长的光纤耦合输出模块, 包括于2012年报道的2.03 kW(芯径50 μm , 数值孔径0.15)产品^[33]及2014年宣布交付的4 kW(芯径100 μm , 数值孔径0.18)产品, 其光束质

图4 (网络版彩图) Yb^{3+} 吸收光谱图

量(BPP)均小于4 mm mrad.

国内半导体激光泵源在早期主要集中于低功率(10~200 W量级)工业产品. 当前, 国内能够研发、生产半导体激光泵源的单位主要包括: 北京凯普林、大族天成、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称中科院长春光机所)等几家. 其中, 中科院长春光机所报道了500 W的输出结果^[34], 北京凯普林光纤耦合输出模块最高输出功率在200 W左右. 分析与国外产生差距的原因, 一方面封装以及光纤耦合技术水平较低, 另一方面没有发展相应的半导体激光器芯片技术, 进一步限制了泵源产品能力. 苏州长光华芯公司利用自行研制的90 μm 条宽芯片, 开发了功率800 W(芯径200 μm , 数值孔径0.22)的单波长976 nm半导体激光泵源, 是报道并销售600 W以上功率单波长光纤耦合输出模块的国内唯一一家, 其拥有自主知识产权和可靠的半导体激光泵源产品生产能力.

2.3 光子晶体激光泵源

早在2002年, 德国柏林工业大学的Ledentsov和Shchukin^[35]提出了光子晶体激光器的概念, 该激光器利用光子晶体模式调控, 从芯片层次实现单横模和近圆形光斑输出, 更容易获得高光束质量和高亮度激光, 因而可以用作传统固体激光器或光纤激光器的理想泵源. 国际上的科研机构, 如俄罗斯Ioffe物理技术研究所、德国柏林工业大学、以色列PBC公司和FBH公司均开展了相关的研究工作, 在国际上发表了一系列研究成果, 报道了工作波长分别为650 nm^[36], 850 nm^[37], 980 nm^[38]以及1060 nm^[39]的光子晶体激光器, 最高转换效率接近60%, 最高脉冲输出功率超过了20 W.

2010年, 德国柏林工业大学和俄罗斯Ioffe物理技术

研究所研制了980 nm波段光子晶体激光器^[40], 垂直远场发散角7°, 连续输出功率2.2 W, 亮度87 MW/cm²/sr. 2015年, 德国柏林工业大学和FBH公司成功研制了1060 nm波段光子晶体激光器^[41], 连续输出功率1.9 W, 垂直远场发散角14°, 亮度72 MW/cm²/sr; 宽条长腔最大输出功率9.5 W(条宽100 μm, 腔长3 mm). 最近2016年, 德国柏林工业大学对1064 nm光子晶体激光器的转换效率进行了研究^[42], 通过理论和实验证实: 减少光子晶体激光器的串联电阻, 可以有效增加转换效率.

国内科研院所, 如中国科学院半导体研究所和中科院长春光机所也积极开展高功率高光束质量光子晶体激光器的相关研究. 至2003年以来, 中国科学院半导体研究所就一直从事光子晶体激光器的研究, 国际上率先研制出了905 nm波段光子晶体激光器^[43,44], 单管连续输出功率大于5 W, 垂直发散角小于10°(最小6.5°), 窄脉冲峰值功率大于20 W; 研制出了976 nm波段光子晶体激光器, 单管连续输出功率大于6 W, 垂直发散角小于13°, 其实验结果如图5所示. 此外, 中科院长春光机所于2015年报道了808 nm光子晶体激光器^[45], 单管连续输出功率为4.6 W, 垂直发散角4.91°.

2.4 高性能单频光纤激光器

单频光纤激光是指腔内以振荡单一纵模形式输出, 具有输出光谱线宽窄、频率可调谐、相干长度长、噪声低、结构紧凑等优势, 使其在光纤传感、激光测距、高精度光谱学、非线性频率转换、相干合束等领域有着重要的应用价值^[46-49]. 目前, 实现单频光纤激光输出的技术主要有环形腔和线性短腔两种方式^[50-55], 环形腔腔长较长、结构复杂、缺乏有效的鉴频机制, 容易出现跳模现象. 而线性短腔包含分布反馈(DFB)和分布布拉格(Bragg)反射(DBR)结构, 线性短腔结构简单、不易跳模、工作稳定、效率较高. 利用石英光纤作为增益介质的短腔结构可以实现稳定的单频运转, 得到线宽2~15 kHz的单频激光输出, 但输出功率通常仅为几个毫瓦. 为了提高激光输出功率, 往往需要提高光纤中稀土离子的掺杂浓度. 与石英玻璃相比, 多组分玻璃对稀土离子具有良好的溶解度, 可达上百万ppm, 且未发现因稀土离子高浓度掺杂而引起的荧光猝灭现象. 如掺杂磷酸盐玻璃光纤可将传统单频激光器中增益介质的使用长度减少至厘米量级, 腔内纵模间隔可达几个千兆赫, 可以从腔内直接实现

功率几百毫瓦的单频激光输出^[54,55], 图6所示为典型的短腔DBR结构单频光纤激光器装置结构示意图.

早在2005年初, 美国NP Photonic公司就推出了基于磷酸盐玻璃光纤作为增益介质的单频光纤激光器, 优异的激光性能使其成为了目前市场上的主流产品. 但到目前为止, 仅美国NP Photonic公司研制出了基于短光纤技术的窄线宽单频光纤激光器, 其输出波长为1.06 μm, 输出功率达到200 mW, 斜率效率达31%, 输出线宽小于3 kHz^[56]. 国内华南理工大学在磷酸盐玻璃光纤的制作、单频谐振腔结构设计以及单频光纤激光器研制等方面也取得了一些进展, 成功拉制出高增益磷酸盐玻璃光纤, 构建了厘米量级线性短腔, 直接从腔

图5 (网络版彩图)光子晶体激光器 P - I - U 曲线(a)和光子晶体激光器远场发散角(b)

图6 (网络版彩图)短腔DBR单频光纤激光器装置结构示意图

内分别实现了波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 功率大于 $400\ \text{mW}$, 线宽小于 $7\ \text{kHz}$ ^[54]和波长 $1950\ \text{nm}$, 功率大于 $100\ \text{mW}$, 线宽小于 $6\ \text{kHz}$ ^[57]的两类单频光纤激光输出. 此外, 华南理工也开展了单频光纤激光器的线宽压窄、噪声抑制等研究工作. 采用虚拟折叠腔与慢光技术相结合的方式, 实现了 $3\ \text{dB}$ 线宽压窄至 $600\ \text{Hz}$ 的单频光纤激光输出^[58]. 采用饱和和非线性放大效应和光电反馈技术, 在 $0.8\sim 50\ \text{MHz}$ 频率范围内将单频光纤激光的噪声抑制到 $-150\ \text{dB/Hz}$, 接近量子噪声极限^[59,60], 其实验结果如图7所示.

基于单一谐振腔方式的窄线宽单频激光器, 一般使用单模纤芯泵浦方式, 其单模泵源功率低, 无法直接实现数瓦级乃至更高功率输出. 为了实现大功率单频光纤激光输出, 通常将小功率单频激光作为种子源, 使用主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)技术方案进行单频激光的放大, 使用MOPA结构可以实现数瓦到数百瓦量级的单频光纤激光输出^[61~63]. 比较有代表性的国内外研究工作: 2012年, 德国汉诺威激光中心实现了 $301\ \text{W}$ 的非线偏振光纤激光输出^[64]. 2014年, 美国空军实验室利用光子晶体光纤实现了 $811\ \text{W}$ 的 $1064\ \text{nm}$ 单频激光输出, 为空间结构单频激光的最高功率水平^[65]. 2012年, 国防科技大学实现了 $310\ \text{W}$ 非线偏振单频光纤激光^[66]. 2013年, 国防科技大学又实现了 $332\ \text{W}$ 的线偏振单频激光输出^[67], 为目前国际上全光纤结构线偏振光纤激光的最高功率水平, 其装置结构示意图如图8所示. 同样, 主要由于非线性效应的影响, 单频、严格单模输出时的极限功率在 $1\ \text{kW}$ 量级^[68,69]. 然而, 大功率光纤激光器合成技术可以使多路激光光束叠加, 在提高输出功率的同时获得良好的光束质量^[70,71].

大功率光纤激光器合成技术已成为国际上的研究热点, 多个国家都对此展开了广泛而深入的研究^[48,72~76], 已有多家单位实现了数百瓦至千瓦级的功率输出. 当前, 主流的光束合成方法包括: 主动相干合成、被动相干合成和非相干光谱合成3种. 光束合成要求小功率高性能单频光纤激光器或者窄线宽激光器(通常线宽千兆赫量级)作为种子源, 经过功率放大后至千瓦量级, 然后作为单元(孔径)激光器模块进行合束研究. 比较有代表性的研究工作是, 麻省理工学院林肯实验室Yu等人^[72]于2011年采用主动相位控制方法, 完成了8路 $500\ \text{W}$ 掺 Yb^{3+} 光纤放大器的相干合成.

图7 (网络版彩图)不同条件下单频光纤激光器的相对强度噪声结果^[59]

图8 (网络版彩图)332 W全光纤线偏振单频激光器装置结构示意图^[67]

实验上采用商用光纤放大器, 成功地将功率 $5\ \text{mW}$, 线宽 $10\ \text{GHz}$ 的种子源放大至功率 $500\ \text{W}$ 量级, 系统总输出功率 $4\ \text{kW}$, 合成效率达到了 78% ^[72].

国内有单位对光谱合成技术进行了研究, 中科院上海光机所实现了 $10.8\ \text{kW}$ 光纤激光输出^[12], 其装置结构示意图如图9所示; 中国工程物理研究院则实现了 $9.6\ \text{kW}$ 输出^[13]. 基于相干合成技术, 国防科技大学实现了功率 $2.16\ \text{kW}$ 单模激光输出^[14], 如图10所示为其4路 $500\ \text{W}$ 级光纤放大器相干偏振合成系统示意图.

3 发展分析

由上述分析可以看出, 万瓦级大功率光纤激光的发展主要涉及到大功率激光光纤材料与元件、高质量激光泵源、高性能单频光纤激光种子源等几项关键技术.

在大功率激光光纤材料与元件方面, 目前适合万瓦级光纤激光系统的高增益大模场面积光纤和合束器、光纤光栅、包层光剥离器等无源光器件, 存在着国内产品无法满足需求以及面临国外禁运的问题. 目前各主流科研院所和公司都在为制备高增益光纤材料、高功率承受性合束器、光纤光栅和包层光剥离器

图9 (网络版彩图)10.8 kW 光纤激光输出装置结构示意图^[12]

图10 (网络版彩图)4路500 W级放大器相干偏振合成系统示意图^[14]

等产品而努力,今后的发展方向将主要集中于Al, F, P等新元素的引入对掺 Yb^{3+} 石英玻璃光学和光谱性能的影响规律和机理的研究,从而制备出低损耗、高光学均匀性、低纤芯数值孔径的大模场面积光纤;进一步提高光纤合束器的制备工艺、光纤光栅的刻写工艺以及对包层光剥离器剥离方法、剥离深度、长度等参数的精确控制,实现光无源器件的低损耗、高功率承受性等指标性能。

在高质量激光泵源方面:随着应用领域对光纤激光器输出功率需求的持续增强,高亮度千瓦级半导体激光泵源的研发也在加快,通过不断地提高半导体激光器芯片的功率、亮度等参数。由于受限于常规激光合束方式,空间合束在增加激光功率的同时,降低了整体光束质量;偏振合束和波长合束可以在不改变光束质量的同时增加激光功率,但功率提高倍数有限。光谱合束是近年来迅速发展的一种实用化合束方式,采用前腔面镀有增透膜的半导体激光芯片与外部光学系统整体构成谐振腔,每个激光单元振荡波长均与

外部光栅色散和外腔反馈匹配,所有激光单元沿相同方向谐振,实现合束激光的光束质量与激光单元保持一致。因此,通过光谱合束和更高密度的空间合束将是当前的研究重点。另外,高光束质量光子晶体激光可以从芯片层实现高亮度高功率激光输出,是未来半导体激光器的重要发展方向之一。单芯片高光束质量光子晶体激光技术的发展不仅可促进基础科学领域研究的不断深化,随着科学技术水平的不断提升和应用领域上的不断拓展和创新,未来在很多领域可以逐渐取代其他激光光源,尤其可以在工业、信息、医疗和国防等领域得到重要的应用。

在高性能单频光纤激光器方面:虽然国际上诸多单位采用MOPA技术方案,开展了单频激光的功率提升技术研究,但是大都采用自由空间装置结构,主要问题是在线宽控制、噪声抑制等方面研究深度不够。此外,非保偏输出的单频光纤放大器的综合性能不能满足诸多实际应用的要求。因此,在较长一段时间内,打破单频光纤激光放大的限制性因素,实现全光纤化、更高功率、更低噪声、线宽可控等高性能激光输出将是单频光纤激光器的重要发展方向。

4 结语

随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺与和高质量泵浦技术的发展,单根单模双包层光纤激光器的输出功率以惊人的速度迅速提高,与其他种类的激光器以及常规固体激光器相比,大功率光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、热管理方便等一系列优点。但是,在高端激光制造对核心光源的需求背景下,随着光纤激光器进一步深入地发展,高增益光纤材料与元件、高质量激光泵源、高性能激光种子源成为了制约万瓦级大功率光纤激光发展的主要因素。

以实现万瓦级大功率光纤激光的方案为主线,分别介绍与讨论了高增益双包层光纤与元件(光纤光栅、包层光剥离器、合束器等)、激光泵源、单频激光种子源等关键技术,对国产万瓦级乃至数万瓦级光纤激光技术的发展进行了展望。相信在不远的将来,通过对激光材料与器件的继续深入研究,加强国内科研院所、企业之间的技术交流与合作,上述瓶颈一定能够被打破,最终为我国的大功率光纤激光器的持续化、科学化发展铺平道路。

参考文献

- 1 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives [Invited]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27: B63–B92
- 2 Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers. *Nat Photon*, 2013, 7: 861–867
- 3 Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier. *Opt Express*, 2016, 24: 6011–6020
- 4 Kathy K. Fiber lasers find opportunities in medical applications. *Laser Focus World*, 2005, 41: 76–80
- 5 杜祥瑞, 丁武, 董志伟, 等. 对自由电子激光(FEL)发展的评论. *强激光与粒子束*, 1995, 7: 1–9
- 6 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
- 7 Dawson J W, Messerly M J, Heebner J E, et al. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials. In: *Proc. SPIE 7686, Laser Technology for Defense and Security VI*, 2010
- 8 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
- 9 Flores A, Ehreich T, Holtz R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light. In: *Proc. SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications*, 2016
- 10 陈金宝, 曹润秋, 潘志勇, 等. 全国产分布式侧面抽运光纤激光器实现千瓦输出. *中国激光*, 2015, 42: 0219002
- 11 林傲祥, 湛欢, 王瑜英, 等. 2 kW抽运增益一体化复合功能激光光纤. *中国激光*, 2015, 42: 1219002
- 12 Zheng Y, Yang Y, Wang J, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation. *Opt Express*, 2016, 24: 12063–12071
- 13 马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的9.6 kW共孔径光谱合成光源. *中国激光*, 2016, 43: 0901009
- 14 马鹏飞, 王小林, 栗荣涛, 等. 2 kW级光纤激光相干偏振合成. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 4–5
- 15 Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser. In: *Optical Fiber Sensors*, 1988. PD5
- 16 Hanna D C, McCarthy M J, Perry I R, et al. Efficient high-power continuous-wave operation of monomode Tm-doped fibre laser at 2 μm pumped by Nd:YAG laser at 1.064 μm . *Electron Lett*, 1989, 25: 1365–1366
- 17 Gapontsev G V, Fomin V, Yusim A. Recent progress in scaling high power fiber laser at IPG Photonics. In: *22nd Annual Solid State and Diode Laser Technology Review*. Newton, 2009
- 18 Kliner A, Hou K C, Plötner M, et al. Fabrication and evaluation of a 500 W cladding-light stripper. In: *Proc. SPIE 8616, MOEMS and Miniaturized Systems XII*, 2013
- 19 王雪娇, 肖起榕, 闫平, 等. 国产光纤实现直接抽运全光纤化3000 W级激光输出. *物理学报*, 2015, 64: 164204
- 20 陈霄, 肖起榕, 金光勇, 等. 高功率千瓦级(N+1)×1光纤级联泵浦耦合器. *光子学报*, 2015, 44: 0606004
- 21 杨依枫, 沈辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现2.5 kW近衍射极限输出. *中国激光*, 2016, 43: 0419004
- 22 胡志涛, 陈晓龙, 何兵, 等. 高功率光纤激光器包层光滤波器的温度场研究. *中国激光*, 2016, 43: 0701004
- 23 Ma P, Tao R, Su R, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality. *Opt Express*, 2016, 24: 4187–4195
- 24 Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing. *Appl Surface Sci*, 2003, 208-209: 125–136
- 25 Bezotosnyi V V, Krokhn O N, Oleshchenko V A, et al. Emission parameters and thermal management of single high-power 980-nm laser diodes. *Quantum Electron*, 2014, 44: 145–148
- 26 Chen H, Shen Y, Tao M, et al. 1150 nm high-power fiber laser oscillator pumped by 976 nm laser diode. *J Russ Laser Res*, 2016, 37: 297–301
- 27 Karpf A, Qiao Y, Rao G N. Ultrasensitive, real-time trace gas detection using a high-power, multimode diode laser and cavity ringdown spectroscopy. *Appl Opt*, 2016, 55: 4497–4504
- 28 Bao L, Kanskar M and Hemenway M. High reliability demonstrated on high-power and high-brightness diode lasers. In: *Proc. SPIE 9348, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII*, 2015
- 29 Yamagata Y, Yamada Y, Muto M, et al. 915 nm high power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on asymmetric decoupled confinement heterostructure (ADCH). In: *Proc. SPIE 9348, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII*, 2015
- 30 Demir A, Peters M, Rossin V, et al. 29.5 W continuous wave output from 100 μm wide laser diode. In: *Proc. SPIE 9348, High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII*, 2015
- 31 Köhler B, Kissel H. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device. In: *Proc. SPIE 7918, High-Power Diode Laser Technology and Applications IX*, 2011
- 32 Huang R K, Chann B, Glenn J D. Extremely high-brightness kW-class fiber coupled diode lasers with wavelength stabilization. In: *Proc. SPIE*

- 8039, Laser Technology for Defense and Security VII, 2011
- 33 Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers. In: Proc. SPIE 8241, High-Power Diode Laser Technology and Applications X, 2012
- 34 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展. 中国光学, 2015, 8: 517–534
- 35 Ledentsov N N, Shchukin V A. Novel concepts for injection lasers. *Opt Eng*, 2002, 41: 3193–3203
- 36 Novikov I I, Karachinsky L Y, Maximov M V, et al. Single mode cw operation of 658 nm AlGaInP lasers based on longitudinal photonic band gap crystal. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 231108
- 37 Posilovic K, Kettler T, Shchukin V A, et al. Ultrahigh-brightness 850 nm GaAs/AlGaAs photonic crystal laser diodes. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 221102
- 38 Novikov I I, Gordeev N Y, Shernyakov Y M, et al. High-power single mode (>1 W) continuous wave operation of longitudinal photonic band crystal lasers with a narrow vertical beam divergence. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 103515
- 39 Posilovic K, Kalosha V P, Winterfeldt M, et al. High-power low-divergence 1060 nm photonic crystal laser diodes based on quantum dots. *Electron Lett*, 2012, 48: 1419–1420
- 40 Bimberg D, Kalosha V, Seidlitz D, et al. High-power high-brightness semiconductor lasers based on novel waveguide concepts. In: Proc. SPIE 7616, Novel In-Plane Semiconductor Lasers IX, 2010. 82–88
- 41 Rosales R, Kalosha V P, Posilović K, et al. High brightness photonic band crystal semiconductor lasers in the passive mode locking regime. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 161101
- 42 Miah M J, Kalosha V P, Rosales R, et al. Novel types of photonic band crystal high power and high brightness semiconductor lasers. *Front Optoelectron*, 2016, 9: 225–237
- 43 Liu L, Qu H, Liu Y, et al. High-power narrow-vertical-divergence photonic band crystal laser diodes with optimized epitaxial structure. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 231110
- 44 Liu L, Qu H W, Liu Y, et al. Design and analysis of laser diodes based on the longitudinal photonic band crystal concept for high power and narrow vertical divergence. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2015, 21: 440–446
- 45 Wang L J, Tong C Z, Tian S C, et al. High-power ultralow divergence edge-emitting diode laser with circular beam. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2015, 21: 343–351
- 46 Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17: 1827–1829
- 47 Robin C, Dajani I, Chiragh F, et al. Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single-frequency output. In: Proc. SPIE 7914, Fiber Lasers VIII: Technology, Systems, and Applications, 2011
- 48 Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique. *Opt Lett*, 2011, 36: 951–953
- 49 Theeg T, Ottenhues C, Sayinc H, et al. Core-pumped single-frequency fiber amplifier with an output power of 158 W. *Opt Lett*, 2016, 41: 9–12
- 50 Zyskind J L, Sulhoff J W, Stone J, et al. Electrically tunable, diode-pumped erbium-doped fibre ring laser with fibre Fabry-Perot etalon. *Electron Lett*, 1991, 27: 1950–1951
- 51 Wang A T, Ming H, Xie J P, et al. Single-frequency Q-switched erbium-doped fiber ring laser by combination of a distributed Bragg reflector laser and a Mach-Zender interferometer. *Appl Opt*, 2003, 42: 3528–3530
- 52 Poulsen C V, Sejka M. Highly optimized tunable Er³⁺-doped single longitudinal mode fiber ring laser, experiment and model. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, 5: 646–648
- 53 Babin S A, Churkin D V, Kablukov S I, et al. Single frequency linearly polarized DFB fiber laser source. In: Proc. SPIE 6727, ICONO 2007: Nonlinear Laser Spectroscopy and High-Precision Measurements; and Fundamentals of Laser Chemistry and Biophotonics, 2007
- 54 Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 3708–3710
- 55 Xu S, Li C, Zhang W, et al. Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm. *Opt Lett*, 2013, 38: 501–503
- 56 Kaneda Y, Spiegelberg C, Geng J, et al. 200-mW narrow-linewidth 1064.2-nm Yb-doped fiber laser. In: Proc IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004
- 57 Yang Q, Xu S H, Li C, et al. A single-frequency linearly polarized fiber laser using a newly developed heavily Tm³⁺-doped germanate glass fiber at 1.95 μm. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 094206
- 58 Mo S, Huang X, Xu S, et al. 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser. *Opt Lett*, 2014, 39: 5818–5821

- 59 Zhao Q, Xu S, Zhou K, et al. Broad-bandwidth near-shot-noise-limited intensity noise suppression of a single-frequency fiber laser. *Opt Lett*, 2016, 41: 1333–1335
- 60 Li C, Xu S, Huang X, et al. All-optical frequency and intensity noise suppression of single-frequency fiber laser. *Opt Lett*, 2015, 40: 1964–1967
- 61 Gray S, Liu A, Walton D T, et al. 502 watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier. *Opt Express*, 2007, 15: 17044–17050
- 62 Mermelstein M D, Brar K, Andrejco M J, et al. All-fiber 194 W single-frequency single-mode Yb-doped master-oscillator power-amplifier. In: Proc. SPIE 6873, Fiber Lasers V: Technology, Systems, and Applications, 2008
- 63 Zhang L, Cui S, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier. *Opt Express*, 2013, 21: 5456–5462
- 64 Theeg T, Sayinc H, Neumann J, et al. All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 1864–1867
- 65 Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power. *Opt Lett*, 2014, 39: 666–669
- 66 Wang X L, Zhou P, Xiao H, et al. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration. *Laser Phys Lett*, 2012, 9: 591–595
- 67 Ma P F, Zhou P, Ma Y X, 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
- 68 朱家健, 杜文博, 周朴, 等. 单模光纤激光极限功率的数值研究. *物理学报*, 2012, 61: 064209
- 69 Zhu J, Zhou P, Wang X, et al. Analysis of maximum extractable power of single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber sources. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48: 480–484
- 70 Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array. In: Proc. SPIE 4974, Advances in Fiber Lasers, 2003
- 71 Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, et al. High power phase locking of a fiber amplifier array. In: Proc. SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 2009
- 72 Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array. *Opt Lett*, 2011, 36: 2686–2688
- 73 Wang X, Leng J, Zhou P, et al. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array. *Appl Phys B*, 2012, 107: 785–790
- 74 Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, et al. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam. *Opt Lett*, 2012, 37: 2832–2834
- 75 Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam. *Opt Lett*, 2012, 37: 3741–3743
- 76 Shah L, Sims R A, Kadwani P, et al. High-power spectral beam combining of linearly polarized Tm: fiber lasers. *Appl Opt*, 2015, 54: 757–762

Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components

YANG ChangSheng¹, XU ShanHui¹, ZHOU Jun², HE Bing², YANG YiFeng², QU HongWei³, ZHAO ZhiDe⁴ & YANG ZhongMin¹

¹State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

²Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Laboratory of Solid State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

⁴Suzhou Everbright Photonics Company, Ltd, Suzhou 215000, China

Compared with other types of lasers, high-power fiber laser has a compact structure, high conversion efficiency, convenient thermal management, and good beam quality, which has a broad application prospect in industry, national defense and other fields. However, the high-gain fiber materials, the optical components, the high-quality laser pumps, and the high-performance laser seed became the key factors restricting the development of 10-kW-level fiber laser. The development status of the high-power fiber laser materials and the optical components are introduced in this paper. The key technologies of the Yb³⁺-doped double clad fiber, the optical components (e.g., fiber Bragg grating, cladding power stripper, and combiner), laser pumps, and single-frequency laser seed are analyzed and discussed. Moreover, the new development trends of the fiber laser technology about domestic 10-kW-level even more higher output power is prospected.

fiber laser, double clad fiber, laser pumps, single-frequency laser

doi: 10.1360/N092016-00437