

我国高功率光纤激光技术学科方向的历程、现状、挑战与建议

周 朴

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 高功率光纤激光是激光技术领域的热点,我国近年来取得了高速发展和突出成就。文中以学科方向的视角,分四个阶段梳理我国该学科方向的发展历程,从科学研究、教育教学、学术交流、行业应用等方面介绍该学科方向的现状,通过深入对比分析归纳进一步发展面临的挑战,并提出对策建议。

关键词: 高功率; 光纤激光; 学科

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230071

0 引言

2023 年 1 月,国家自然科学基金委员会信息科学部管理人员和相关技术专家合作发表了《国家自然科学基金视角下我国激光科学技术发展的分析和展望》一文,从国家自然科学基金视角梳理了我国激光科学技术的发展现状和挑战^[1]。文章介绍国家自然科学基金重点项目资助情况的部分指出:“最热门的主题热词为‘光纤’‘高功率’‘红外’‘飞秒’。高功率是激光最重要的核心指标之一,激光相关应用领域很多方面性能的提升都依赖于更高功率的激光。光纤具有很大的表面积/体积比,散热性能十分优越,因此,以光纤作为增益介质是实现高功率激光的一个理想途径”。这表明,高功率是研究应用热点,而光纤激光是实现高功率的重要方式。

近年来,我国在高功率光纤激光的科学研究方面取得了显著成就,这源自多年以来我国在高功率光纤激光技术学科方向的深厚积淀。文中在文献^[1]的基础上,以学科方向的视角,从科学研究、教育教学、学术交流、行业应用等方面回顾历程、分析现状,系统梳理当前存在的问题和面临的挑战,对学科方向的未来发展提出建议。

1 历程

早期,光纤激光主要是作为一种信息光子器件,应用于通信、传感、成像等领域。1988 年,双包层光

纤的发明^[2],结合当时高速发展的半导体激光技术,使得半导体激光包层泵浦方式迅速得到应用,光纤激光器具备成为能量光子器件的可能,光纤激光的功率得到了飞速提升^[3-4]。我国高功率光纤激光的发展也是基于双包层光纤和半导体激光包层泵浦等技术逐步实现的。

系统梳理公开发表的相关文献(包括论文、会议、新闻报道、科研项目等),我国在高功率光纤激光学科方向的发展大致可以分为 4 个阶段:

(1) 积累阶段(1990 年—1999 年)。20 世纪 80 年代及以前,我国关于“光纤激光”的报道内容与目前对于光纤激光的共识不尽相同,以“光纤”作为“激光”的传输介质为主。大约自 1990 年起,国内开始关注并研究“光纤”作为“激光”产生介质的光纤激光,南开大学、中国科学院上海光学精密机械研究所(下面简称中科院上海光机所)、天津大学等单位较早开展相关研究^[5-9]。尽管国际上已有双包层光纤激光器的相关报道,但当时国内的研究主要是在激光的产生机理上,以单包层光纤为主,双包层光纤的报道不多。随着输出功率的不断提升,国际上双包层光纤激光技术的进展日益引起国内科研人员的关注^[10-11]。1997 年,中国科学技术大学、香港科技大学联合课题组研究了天津电子材料研究所研制的双包层光纤的泵浦波长及其光谱特性;1999 年,武汉邮电科学院报道了自研双包层光纤的激光性能。国产双包层光纤的成功研制

收稿日期:2023-02-15; 修订日期:2023-03-14

作者简介:周朴,男,研究员,博士生导师,目前主要从事高功率光纤激光、激光光束合成等方向以及相关交叉科学的研究工作。

为国内高功率光纤激光的起步打下了良好的基础^[12-13]。

(2) 起步阶段 (1999 年—2009 年)。1999 年前后可以初步视作我国高功率光纤激光的起步, 1999 年发表的《包层泵浦光纤激光器》是较早地全面介绍基本原理、关键技术、研究进展和发展趋势的论文^[14]; 1999 年—2000 年, 复旦大学与烽火通信科技股份有限公司合作, 南开大学与天津电子材料研究所合作, 中科院上海光机所、中国科学技术大学与武汉邮电科学院合作, 均实现了基于国产双包层光纤的激光输出^[15-17]。2000 年, 王之江院士建议中科院上海光机所楼祺洪研究员 (国内研究高功率高亮度光纤激光器的开拓者) 开展光纤激光研究^[18], 楼老师带领课题组于 2002 年实现 4.9 瓦级功率输出^[19]; 同年, 南开大学报道了输出功率达瓦量级的全光纤结构双包层光纤激光器^[20], 相关研究得到了国家自然科学基金重点项目的支持^[21]。之后, 我国的高功率光纤激光的技术水平取得了飞速提升, 中科院上海光机所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国工程物理研究院激光聚变研究中心、清华大学、南开大学、北京交通大学、国防科技大学等单位发表了较多的研究论文; 2007 年前后, 兵器装备研究院、中国科学院上海光机所、华北光电技术研究所、清华大学等多家单位实现了单纤激光千瓦级输出^[22-25]。

值得注意的是, 当时实现的千瓦级激光都采用的是空间结构, 与后面广泛采用的全光纤结构相比, 实用性相对较差, 之后输出功率也未能进一步提升, 到 2009 年, 输出功率最高值依旧在千瓦量级。而从 2004 年—2009 年, 国际同行采用全光纤结构已经实现单模激光输出功率从千瓦到万瓦的飞跃^[3,26]。尽管如此, 在这一阶段, 华中科技大学, 上海传输线研究所、天津电子材料研究所、烽火通信有限公司等单位开展了激光光纤研制, 清华大学等单位开展了光纤激光模式分析等理论研究, 珠海光库、深圳光越、深圳朗光、北京凯普林等企业开展无源器件与半导体泵浦源等关键元件研制, 中国科学院西安光学精密机械研究所等单位开展高功率全光纤激光器的研究, 武汉锐科光纤激光技术股份有限公司等单位开展高功率光纤激光器整机研制, 为后续更加科学合理的布局发展做了储备。

(3) 快速提升阶段 (2010 年—2017 年)。面对应用需求和技术差距, 2010 年前后, 我国高功率光纤激光学科方向进入快速提升阶段, 各研究单位结合应用需求和发展实际, 对研究内容进行了科学布局, 科学研究的目标和内容更加合理。中国科学院上海光机所、清华大学、国防科技大学等单位聚焦光纤光栅、泵浦合束器、泵浦/信号合束器、光纤端帽等全光纤结构必备的高性能无源器件开展攻关, 上海传输线研究所、天津电子材料研究所、中国工程物理研究院激光聚变中心、中国科学院上海光机所、北京工业大学、国防科技大学、华中科技大学、华南理工大学等单位启动或下更大气力开展激光光纤研制, 武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、深圳创鑫等单位致力于器件和整机的国产化; 同时, 国内科研的精细分工和协同创新特色日益突出, 高功率单频与窄线宽光纤激光、高功率宽带/超连续谱光纤激光、高功率拉曼光纤激光、高功率光纤激光相干合成等科研方向获得代表性研究成果, 取得了很好的国际影响力^[27-35]。

这一阶段, 国内同行更加重视教育教学和学术交流等活动^[36-40], 从多个方面促进学科方向发展。2010 年, 中国科学技术大学出版社出版《高功率光纤激光器及其应用》一书; 2011 年, 中国科学院上海光机所等单位启动举办“光纤激光高级培训班”; 2012 年, 中国宇航学会光电专委会、国防科学技术大学光电科学与工程学院等单位联合举办“国际高功率光纤激光技术研究及应用”研讨会。通过这一阶段的布局, 我国高功率光纤激光学科方向取得了一系列重要成果: 在 2016 年举行的第 22 届全国激光学术会议上, 有 2 个大会报告与高功率光纤激光密切相关 (报告名称分别是《光纤激光的现状与未来》和《大功率光纤激光的非线性问题研究》), 并且报告中都宣布和介绍了单纤光纤激光万瓦级高功率输出的实验结果, 标志着我国在该方面的研究重新达到了国际先进水平; 2017 年 2 月, 《中国激光》发布了“高功率光纤激光技术”专辑, 收录了 21 篇优秀论文, 集中展示了我国的研究成果。

(4) 稳定发展阶段 (2018 年至今)。近年来, 我国高功率光纤激光学科方向进入了高速发展阶段。一方面, 激光光纤、功能元件性能继续提升, 功能光纤 (器件) 高功率化和高功率光纤 (器件) 功能化融合发

展^[41],为激光整机的研制和性能提升提供了多元化的选择、奠定了良好的“硬件”基础,并带动了激光合成、激光应用方面突破;另一方面,光纤激光物理、非线性效应与模式不稳定效应抑制等基础理论研究取得一些进展^[42-43],并不断更新进入光纤激光设计软件,为高功率光纤激光器的设计研制提供了良好的“软件”基础。

此外,通过与材料科学与工程、计算机科学与技术、控制科学与工程等学科的交叉,在激光设计、控制、测量、应用等方面也取得了具有创新性的研究成果^[44]。从公开报道的文献看,常规高功率激光和多模高功率激光的输出功率分别突破2万瓦和10万瓦级^[45-50]、达到国际先进水平。高功率光纤激光的高速发展为“激光制造”、“增材制造”注入了强大动能,促进了我国先进制造等领域的发展。

需要说明的是,上述4个阶段,只是依据具有代表性的文献进行的一个大致区分,并不具有广义的普适性。

2 现状

按照《研究生教育学科专业目录》,高功率光纤激光属于“光学工程”一级学科;按照《中华人民共和国国家标准学科分类与代码》,高功率光纤激光属于“电子、通信与自动控制技术”下面的“光电子学与激光技术”。尽管是一个相对“小”、“窄”的学科方向,但是已经形成了相对明确并持续成长发展的“学术共同体”,并与其他学科方向保持良性的互动交流,科学研究、教育教学、学术交流、行业应用等方面都在向上向好发展。

(1) 科学研究方面。我国已经形成了相对稳定的科研资助体系:“十三五”以来,国家重点研发计划“激光制造与增材制造”、“新型显示与战略性电子材料”等专项均对高功率光纤激光研究给予了稳定支持;21世纪以来,国家自然科学基金(F0506等代码)也通过重大、重点、面上、青年等多种科研项目以及人才类项目等方式充分支持高功率光纤激光研究。近年来,国内专门从事高功率光纤激光的科研力量建设蹄疾步稳、日臻完善,产出(包括学术论文、工业化产品等)比较多的单位有中国科学院上海光机所/中国科学院西安光学精密机械研究所/中国科学院安徽光学

精密机械研究所、中国工程物理研究院激光聚变研究中心/应用电子研究所、清华大学、天津大学、北京工业大学、华中科技大学、华南理工大学、电子科技大学、南京理工大学、吉林大学、国防科技大学、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、深圳创鑫、深圳杰普特等,涵盖了科研院所、高等院校、高新技术企业等创新主体。在科研项目的支持下,各创新主体不断产出高水平成果。以“高功率光纤激光”为主题检索Web of Science数据库,发表单位是中国的论文有5700余篇(截至2023年1月)。技术指标领先(先进)的有高功率单频激光、高功率窄线宽激光、激光相干合成、激光光谱合成、高功率拉曼激光、高功率超连续谱激光、高功率超荧光激光、高功率可见光激光等。

(2) 教育教学方面。我国在高功率光纤激光学科方向已经形成了多元化的教育教学方式,促进了人才培养规模和质量的提升。部分高等院校开设了专业课程,比如国防科技大学前沿交叉学科学院开设了《Fundamentals of Fiber Laser》研究生课程;中国激光杂志社等单位举办的“光纤激光高级培训班”吸引力持续扩大。近年来,随着信息技术的发展,中国光学学会、中国光学工程学会、中国激光杂志社等通过“光子学公开课”、“云光课堂”、“光学前沿在线”等网络课程的方式,进一步促进了知识传播,“光子学公开课”中高功率光纤激光相关课程的总观看人数已经过万。中国科学院软件研究所与国防科技大学前沿交叉学科学院等单位联合研制了Seefiberlaser软件^[51],构建了从基础理论到激光器研制的“桥梁”,能指导不同阶段的人员(初学者、高级研究人员)设计制备激光器。

(3) 学术交流方面。我国科技期刊和学术会议为高功率光纤激光同行的学术交流提供了高端平台。从中国知网统计,《中国激光》、《光学学报》、《物理学报》、《红外与激光工程》、《强激光与粒子束》等中文期刊和《Chinese Optics Letters》、《Photonics Research》、《High Power Laser Science and Engineering》等英文期刊发表了大量高质量的研究论文,《中国激光》、《红外与激光工程》等期刊通过出版专刊^[40,52]的方式进一步促进小同行的学术交流。中国光学大会、全国激光学术会议、激光与光电子学会议、全国激光技术与产业发展大会、Applied Optics and Photonics Conference

(AOPC)、Conference on Information Optics and Photonics (CIOP) 等高水平学术会议都开设有相关主题(专题)。此外,自2019年起,中国光学工程学会主办专门的先进光纤激光(Advanced Fiber Laser, AFL)研讨会,入选了中国科协高水平学术会议指南,已经成为国内外同行认可的行业高水平学术会议。此外,在Photonics West (PW)、Advanced Solid State Laser (ASSL)、CLEO-PR 等高水平国际会议上,我国也有专家在程序委员会等机构任职,这些会议和国内单位主办的相关会议(如AFL等)一起,提供了中国与世界交流的平台。

(4) 行业应用方面。近年来,高功率光纤激光的行业应用飞速发展,形成了材料、元件、激光器、激光系统完整的链条,据《中国激光产业发展报告》报道,2020年、2021年,光纤激光的行业产值已经分别达到94.2亿元和124.8亿元^[53];2022年预计达到138亿元^[54]。高平均功率连续波(包括准连续、长脉冲等)光纤激光的主要应用领域是在切割、焊接、3D打印、清洗等行业,高平均功率超短脉冲光纤激光也已广泛应用于精密加工、科学研究等行业,已经有力支撑了先进制造、航空航天、能源、汽车等领域的飞速发展。

3 挑 战

尽管我国在高功率光纤激光技术学科方向已经取得了瞩目的成绩,但还存在不少短板、弱项,对相关方向的未来发展提出了严峻挑战,需要研究、教学、应用等方面的人员共同努力攻关。具体表现在以下几个方面:

(1) “硬核”成果偏少。一方面,具有高技术指标、高可靠性的“器”少:对于高功率光纤激光,最具有代表性的成果包括但不限于国际同行2009年报道的万瓦级单模光纤激光^[55],2010年报道的千瓦级2 μm波段光纤激光^[56],2013年报道的千瓦级飞秒光纤激光^[57],2018年报道的40瓦级中红外光纤激光^[58],等;我国目前均还存在不少差距。具体而言,激光材料、激光器件等(特别是中红外、可见光等特殊波段)的性能参数尚不足以支撑高性能激光器的研制。另一方面,“制器之器”少:研制过程中采用的大模场光纤熔接机、切割刀、涂覆机等设备,测试表征过程中采

用的热像仪、光斑分析仪、光束质量测量仪和光谱仪等设备,国产设备比例不高;高功率光纤激光研发过程中的切割、端面处理、熔接、涂覆等工艺流程固化也有待加强。

(2) 原创理论几乎没有。研究高功率光纤激光,Agrawal教授的《Nonlinear Fiber Optics》一书基本涵盖了所需的经典理论工具与方法,该书已经出版6版^[59],中文版也已更新至第5版^[60],入门阶段和高阶研发阶段的人员均适合阅读。近年来,随着研究的不断深入,高功率光纤激光学科方向产生了一些新的理论,比如模式不稳定效应、多模光纤中的非线性效应,等,尚未被该书籍收录。但是,原创性的理论基本源自德国耶拿大学、美国康奈尔大学、俄罗斯科学院西伯利亚分院、英国阿斯顿大学等^[61-65]。值得指出的是,我国在光腔时频动力学、脉冲孤子动力学等方面的基础研究有突破进展并得到了实验验证^[66-70],期待后续能有更多的力量投入基础研究,形成具有中国气派的理论学派。

(3) 专著教材有待加强。近年来,Springer、Wiley、CRC等出版机构都出版了高水平学术专著^[71-75],相比之下,近年来国内的进展明显不够,与研究与应用水平的发展不匹配,致使国内师生和企业研发人员的案头参考书籍以进口原版书籍或其影印版为主。此外,尽管在课程(培训班)等方面取得了显著进展,但据调研,目前国内还没有专门的教材,研究生和入门阶段的研究人员“知识启蒙”的主要方式是阅读相关经典综述文献^[76-77]。

(4) 同行交流不够充分。随着研究的深入和应用的推广,国内的科技期刊和学术会议同步建设发展,为高功率光纤激光学科方向人员提供了良好的交流平台,但“研究”和“应用”分离的现象比较明显,同行交流不够充分。比如在全国激光学术会议、激光与光电子学会议(LTO)、AOPC等涉及光纤激光的综合类学术会议上,参会单位以研发光纤激光的高等院校和科研院所为主;在全国激光加工学术会议等涉及光纤激光的应用类学术会议上,参会单位以企业和应用研究机构为主,研发光纤激光的高等院校和科研院所参与的就很少。相比之下,可以注意到,在以Photonics West的Fiber Laser分会等为代表的国际学术会议上,高等院校、科研院所、企业、国家实验室等创新

主体都积极参与,很多高质量原创性成果是由 IPG Photonics、Northrop Grumman 等企业发表的^[78-80]。

4 建议

经过多年的建设发展,我国在高功率光纤激光学科方向取得了可喜的成绩。但客观分析,与国际同行相比,我们尚处于“跟跑”和局部“并跑”阶段,与应用需求相比,当前的技术水平还存在明显不足。如何更合理地配置科技资源、更有效地激发创新活力,为科技强国、制造强国、航天强国等做出行业贡献,是一个需要深入分析和研判的课题。综合国家相关规划政策、新的科研范式生成演化、“双一流”建设等大背景,结合本学科方向现有基础和面临的挑战,对未来发展提出以下建议:

(1) 科学研究方面。鼓励多学科交叉、鼓励原创探索,力争在激光光纤材料、光纤处理设备、激光性能测量设备等方面取得新的结果;通过设置多种类型的重大项目,引导优势单位进行集智攻关。以万瓦级单模激光、十万瓦级多模激光在工业、国防等领域的应用需求带动科学研究,促进行业应用。特别是,根据应用性能提升和未来发展需求,高功率光纤激光的发展已经呈现出“激光脉冲特性可控、激光光谱特性可控、空间模式特性可控”的发展趋势^[26],需要激光材料、激光物理和信息技术学科相关方向的研究人员共同努力。

(2) 教育教学方面。加大专业培训班和网络公开课的开设力度,积极引进 CLEO、ASSL 等高水平学术会议上国际专家讲授的短课程 (Short Course);积极申请“虚拟教研室”,促进教育资源共享;鼓励高水平科研成果进课堂、进教材,密切关注激光技术与人工智能技术的“双向赋能”能力^[81],打造精品教材、创建优质课程,促进科教融合。对比美国 IPG Photonics 等技术领先单位的人力资源规模,加强教育教学,进一步扩大专业研究队伍是行业发展需要关注的事项。

(3) 学术交流方面。引导科研人员将好的研究成果发表在国产期刊特别是中文期刊,视情适时组织多种类型的专刊 (专辑) 集中展现国内研究成果;聚力建设以 AFL 为代表的高水平专业国际学术会议,主动在国内高水平综合性学术会议上开设论坛或设计专题,鼓励不同类型创新主体的人员高质量互动。

致谢 感谢国防科技大学前沿交叉学科学院助理研究员吴函烁和博士研究生郝修路在部分中文文献检索方面的协助。

参考文献:

- [1] Tang Hua, Shen Yong, Long Liyuan. Analysis and prospect of the development of the laser science and technology in China from the perspective of national science [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(2): 0200001. (in Chinese)
- [2] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]//Optical Fiber Sensors, 1988.
- [3] Zhou Pu, Huang Liangjin, Leng Jinyong, et al. High-power double-cladding fiber lasers: A 30-year overview [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(2): 123-135. (in Chinese)
- [4] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [5] Dong Xiaoyi. Doped fiber lasers and amplifiers [J]. *Laser & Infrared*, 1990, 20(3): 17-23. (in Chinese)
- [6] Cui Guoqi, Dong Xiaoyi, Zhang Jianzhong, et al. Analysis of doped fiber characteristics [J]. *Optronics-Lasers*, 1990, 1(5): 290-295, 299. (in Chinese)
- [7] Chen Yihong, Cheng Ruihua, Gan Fuxi. Nd-doped fiber laser characteristics of AR ion laser pumping [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(20): 1539-1541. (in Chinese)
- [8] Ning Jiping, He Zhihong, Liu Hongwei, et al. Study of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(8): 678-683. (in Chinese)
- [9] Chen Yihong, Cheng Ruihua, Shen Hongwei, et al. Doped Nd quartz single-mode fiber 1.088 μm continuous fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1990, 19(11): 664-789. (in Chinese)
- [10] Qin Dajia. Double-clad fibers increase the linear output power of fiber lasers [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 1996(2): 36. (in Chinese)
- [11] Cong Zheng. The bright future of fiber laser systems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1998, 35(10): 6-9. (in Chinese)
- [12] Ming Hai, Yang Bao, Dong Xiaopeng, et al. Study on pump wavelength and spectral characteristics of Nd³⁺ double-clad fiber [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997(4): 365-368. (in Chinese)
- [13] Yin Hongbing, Li Shiyu, Cheng Shuling, et al. Preparation of Yb³⁺ doped quartz fiber and its laser performance [J]. *Study on Optical Communications*, 1999(5): 23-26. (in Chinese)

- [14] Lv Kecheng, Liu Weiwei, Lv Fuyun, et al. Cladding pumping fiber laser [J]. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 1999, 13(5): 288-292. (in Chinese)
- [15] Chen Bai, Chen Lanrong, Lin Zunqi, et al. LD pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(2): 101-104. (in Chinese)
- [16] Ning Ding, Fu Chengpeng, Ding Lei, et al. Experimental study of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(4): 442-445. (in Chinese)
- [17] Sun Diechi, Hu Yimei, Liang Jianzhong, et al. Research on Yb doped double clad fiber laser [J]. *Study on Communications*, 2000(5): 40-42. (in Chinese)
- [18] 常国庆. 激光引导人生——访《光电产品与资讯》前主编楼祺洪先生[EB/OL]. 中国激光杂志社公众号, (2020-04-27)[2023-02-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/IEAD7VhdOmWRdx4xWx-x3A>.
- [19] Lou Qihong, Zhou Jun, Li Tiejun, et al. 4.9 W ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A29(4): 306. (in Chinese)
- [20] Lv Kecheng, Su Hongxin, Li Yigang, et al. Wattage all-fiber doped Yb double-clad fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(7): 604. (in Chinese)
- [21] Zhang Qiang, Fan Wande, Fu Shenggui, et al. Study on Yb³⁺-doped double-clad fiber laser with double-clad fiber Bragg grating as back cavity mirror [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, 39(1): 67-69. (in Chinese)
- [22] Li Chen, Yan Ping, Chen Gang, et al. The continuous output power of fiber lasers using domestic ytterbium-doped double-clad fibers exceeds 700 W [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(6): 738-738. (in Chinese)
- [23] Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang, et al. A continuous-wave 714 w fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1119-1120. (in Chinese)
- [24] Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen, et al. The output power of high-power fiber lasers exceeds 1.2 kW [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 930. (in Chinese)
- [25] Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi, et al. The output power of high-power fiber laser exceeded 1 kW [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 890. (in Chinese)
- [26] Zhou Pu, Leng Jinyong, Xiao Hu, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2000001. (in Chinese)
- [27] Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3708-3710.
- [28] Zhang L, Cui S, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [29] Liu J, Shi H, Liu K, et al. 210 W single-frequency, single-polarization, thulium-doped all-fiber MOPA [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13572-13578.
- [30] Xu Y, Fang Q, Qin Y, et al. 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9419-9421.
- [31] Xiao Q, Yan P, Wang Y, et al. High-power all-fiber superfluorescent source with fused angle-polished side-pumping configuration [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8): 1164-1169.
- [32] Xu J, Ye J, Hu X, et al. In-band pumping avenue based high power superfluorescent fiber source with record power and near-diffraction-limited beam quality [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(3): 6.
- [33] Song R, Hou J, Chen S, et al. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1529-1531.
- [34] Yan F. High Power Raman Fiber Lasers: Recent Progress[C]// *Frontiers in Optics*, 2015: FTh2F.1.
- [35] Ma Y, Wang X, Leng J, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [36] Lou Qihong. High Power Fiber Laser and Its Applications[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. (in Chinese)
- [37] 上海光学精密机械研究所. 中国激光杂志社在慕尼黑上海光博会举办系列活动[EB/OL]. (2012-03-26)[2023-02-10]. https://www.cas.cn/hy/xshd/201203/t20120327_3518580.shtml.
- [38] Admin. 国际高功率光纤激光技术研究及应用研讨会[EB/OL]. (2012-02-17)[2023-02-10]. <https://www.portalaser.com.cn/html/fair/zhnews/1378.html>.
- [39] Aconf. 第二十二届全国激光学术会议[EB/OL]. (2016)[2023-02-10]. https://www.aconf.org/conf_73094.html.
- [40] Zhou Jun, Wang Pu, Zhou Pu. Foreword to the topic "High Power Fiber Laser Technology" [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201000. (in Chinese)
- [41] Chen X, Yao T, Huang L, et al. Functional fibers and functional fiber-based components for high-power lasers [J]. *Advanced*

- Fiber Materials*, 2022, 5(1): 59-106.
- [42] Zhou Pu. Fundamentals of high-average-power fiber laser technology: (ii) oscillation cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(10): 100202. (in Chinese)
- [43] Tao R, Wang X, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0903319.
- [44] Jiang M, Wu, H, An Y, et al. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect [J]. *PhotonIX*, 2022, 3(1): 1-27.
- [45] Li Fengyun, Li Yue, Song Qinghua, et al. Nationwide optical fiber material devices achieve a high SRS rejection ratio of 20.88 kW output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2116002. (in Chinese)
- [46] Xiao Hu, Pan Zhiyong, Chen Zilun, et al. Based on self-developed optical fiber and device, the stable output of 20 kW high beam quality laser is realized [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1616002. (in Chinese)
- [47] Yi Yongqing, Liu Jun, Shen Yize, et al. Homemade 20 kW Yb-doped double-cladding fiber for tandem pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0706002. (in Chinese)
- [48] Lin Aoxiang, Xiao Qirong, Ni Li, et al. Domestic YDF active fiber achieves single-fiber 20 kW laser output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0916003. (in Chinese)
- [49] Zhang Lei, Lou Fengguang, Wang Meng, et al. Yb-doped triple-clad fiber for nearly 10 kW level tandem-pumped output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1315001. (in Chinese)
- [50] Sun J, Liu L, Han L, et al. 100 kW ultra high power fiber laser [J]. *Optics Continuum*, 2022, 1(9): 1932-1938.
- [51] Wang Xiaolin, Lv Pin, Zhang Hanwei, et al. Fiber Laser simulation software see fiber laser and fiber laser tool collection SFTool [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0506002. (in Chinese)
- [52] Zhou Pu, He Bing. Preface to the column "Fiber Laser Beam Synthesis" [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 1. (in Chinese)
- [53] 江澄. 《2021中国激光产业发展报告》发布[EB/OL]. (2021-04-06)[2023-02-10]. https://www.cas.cn/yx/202104/t20210402_47-83655.shtml.
- [54] 武汉文献情报中心. 武汉文献中心在线直播发布《2022中国激光产业发展报告》[EB/OL]. (2022-04-01)[2023-02-10]. https://www.whb.cas.cn/xw/gzdt/202204/t20220401_6417983.html.
- [55] IPG Photonics. IPG Photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB/OL]. (2009-06-15)[2023-02-10]. https://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf
- [56] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[C]//SPIE Conference on Fiber lasers VII. 2010, 7580: 758016.
- [57] Wan P, Yang L M, Liu J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29854-29859.
- [58] Yigit, Ozan, Aydin, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers. [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [59] Agrawal G. Nonlinear Fiber Optics [M]. 6th ed. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2019.
- [60] Agrawal G. Nonlinear Fiber Optics[M]. 5th ed. Translated by Jia Dongfang, Ge Chunfeng. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [61] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse Mode Instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [62] Turitsyn S K, Bednyakova A E, Fedoruk M P, et al. Inverse four-wave mixing and self-parametric amplification in optical fibre [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(9): 608-614.
- [63] Wright L G, Sidorenko P, Pourbeyram H, et al. Mechanisms of spatiotemporal mode-locking [J]. *Nature Physics*, 2020, 16(5): 565-570.
- [64] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers [J]. *Science*, 2017, 358(6359): 94-97.
- [65] Turitsyna E G, Smirnov S V, Sugavanam S, et al. The laminar-turbulent transition in a fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(10): 783-786.
- [66] Peng J, Zhao Z, Boscolo S, et al. Breather molecular complexes in a passively mode-locked fibre laser [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(7): 2000132.
- [67] Liu M, Wei Z, Li H, et al. Invisible the "invisible" soliton pulsation in an ultrafast laser [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(4): 1900317.
- [68] Ding Y, Xiao X, Liu K, et al. Spatiotemporal mode-locking in lasers with large modal dispersion [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 093901.
- [69] Ye J, Ma X, Zhang Y, et al. From spectral broadening to recompression: dynamics of incoherent optical waves propagating in the fiber [J]. *PhotonIX*, 2021, 2(1): 1-15.

- [70] Liu W, Ma P, Zhou P. Unified model for spectral and temporal properties of quasi-CW fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2021, 38(12): 3663-3682.
- [71] Ter-Mikirtychev V V. Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers [M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2019.
- [72] Bale B G, Okhitnikov O G, Turitsyn S K. Modeling and Technologies of Ultrafast Fiber Lasers[M]/Fiber Lasers. Berlin: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012: 135-175.
- [73] Khajavikhan M, Leger J R. Modal Theory of Coupled Resonators for External Cavity Beam Combining[M]. Berlin: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [74] Dong L, Samson B. Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [75] Binh L, Ngo N. Ultra-Fast Fiber Lasers: Principles and Applications with MATLAB Models [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [76] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [77] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [78] Glebov A L, Leisher P O, Platonov N, et al. 1.5 kW linear polarized on PM fiber and 2 kW on non-PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier[C]/SPIE, 2017, 10085: 100850M.
- [79] Shcherbakov E, Fomin V, Abramov A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]/Advanced Solid State Lasers: Applications II, 2013: Ath4A.2.
- [80] Goodno G D. Linewidth narrowing of a high power polarization maintaining fiber amplifier using nonlinear phase demodulation[C]/2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2021: SM4K.1
- [81] 周朴. 当人工智能遇见激光[C]/第十七届全国激光技术与光电子学学术会议 (LTO2022), 2022.

Review on the discipline of high power fiber laser in China

Zhou Pu

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

Abstract:

Significance High power fiber laser is one of the hot topics in the laser field, and fast development and significant milestones have been achieved in China recently. Although there have been plenty of review papers of high power fiber laser published, most of them focus on the scientific achievements. It is to be noted that, the discipline construction, which includes (but not limits to) education and training, basic and applied research, academic communication, practical application and so on, lays the foundation for the field of high power fiber laser.

Progress The development of discipline of high power fiber laser in China could be summarized into four stages. In the 1990s, the basic investigation on fiber laser was initiated. In the 2000s, high power fiber lasers based on double clad fiber dominates the field of high power fiber laser, and more than 1 kW output power was achieved by several independent groups. From 2010 to 2017, fast progress was made in the discipline of high power fiber laser, the layout of scientific research was optimized, and different research groups began to focus on key components, high performance fiber laser, fiber laser technology and system integration, respectively, and leading results in single frequency fiber laser, Raman fiber laser, fiber supercontinuum and coherent beam combining, were achieved. Since 2018, the discipline of high power fiber laser develops steadily, high power fiber laser with more than 20 kW output power and multimode fiber laser system with more than 100 kW were

developed, which promotes the fast development of advanced manufacturing. However, there are still several challenges for the discipline of high power fiber laser in China. For example, as the most representative result of high power fiber laser, 10 kW single mode fiber laser was still under development, also, the performance lacks in the field of mid-infrared fiber laser and ultrafast fiber laser. In addition, it also lacks in original theoretical results such as transverse mode instability and multimode nonlinear fiber optics, the communication between the academic community and application community could be further enhanced.

Conclusions and Prospects Discipline of high power fiber laser in China has been developed in a fast and stable way in the past few decades, from the current state that includes scientific research, education, academic communication and application. It is suggested that, cooperation in multidiscipline, education, training and course material, and high-quality communication could be enhanced to ensure further development.

Key words: high power; fiber laser; discipline