

高功率光纤激光相干合成的研究进展与分析

刘泽金*, 周朴, 许晓军, 王小林, 马阎星

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073

* E-mail: zejinliu@vip.sina.com; zhoup203@163.com

收稿日期: 2012-11-15; 接受日期: 2013-05-07

国家自然科学基金(批准号: 11274386)资助项目



摘要 光纤激光器与其他类型的激光器相比具有转换效率高、结构紧凑、热管理方便、光束质量优良等突出优势, 在工业、国防等领域有广泛的应用前景, 近年来成为了高能激光技术领域的研究热点。本文介绍了高功率光纤激光相干合成的发展现状, 重点分析了单束相干合成激光、多束激光相位控制以及光束合成等关键技术, 对高功率相干合成光纤放大器、光束合成、实际大气传输与闭环控制等 3 个方面的发展进行了展望。

关键词
光纤激光
相干合成
单频
窄线宽
相位控制

1 引言

光纤激光器是指采用掺杂光纤作为增益介质的激光器, 通过在光纤基质中掺杂不同的稀土离子, 可以获得不同波段的激光输出。与其他类型的激光器相比, 光纤激光器具有转换效率高、结构紧凑、热管理方便、光束质量优良等突出优势, 在工业、国防等领域有广泛的应用前景, 近年来成为了高能激光技术领域的研究热点^[1, 2]。随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和高亮度泵浦源技术的发展, 光纤激光器的输出功率以惊人的速度迅速提高。目前, 美国 IPG Photonics 公司和德国 Rofin 公司分别实现了全光纤结构单模光纤激光器 10.5 和 2 kW 功率输出^[3, 4], 国内外亦有多家单位实现了全光纤结构光纤激光器千瓦级功率输出^[5-12]。

由于非线性效应、热损伤及泵浦源亮度等因素的

影响, 单根光纤激光输出功率存在极限。以目前输出功率最高的掺镱光纤激光器为例, 理论研究结果表明, 其宽谱、严格单模输出时的极限功率约为 13 kW^[13-16], 单频、严格单模输出时的极限功率在 1 千瓦量级^[16, 17]。由此, 单根光纤激光器不能满足百千瓦(以上)级高功率输出的应用要求^[18-20]。为实现更高功率输出的同时保持光束质量, 一种重要的技术途径是采用相干合成的方法, 即激光器采用多模块结构, 控制各单元(孔径)激光器输出光束的相位达到锁相输出, 使其彼此相干, 等效于一束大口径光束^[21, 22]。一方面, 在保持光束质量的同时提高了输出光束的功率, 实现了亮度的提高。另一方面, 模块化的结构分散了热效应, 有利于克服“热”造成的高能激光平均亮度下降。基于相干合成的高能激光系统同时解决了亮度和热管理两个难题, 已经成为高能激光系统发展的重要方向^[23-25], 如美国高能激光技术联合办公室发

布的鲁棒电驱动激光器项目中^[26], 诺斯罗普·格鲁曼公司(下文简称诺格公司)就计划利用多路激光相干合成的方式获得 25 kW 以上高光束质量激光^[27].

2 研究现状

近十年光纤激光相干合成技术得到了飞速发展^[28], 其原因除了光纤激光器本身的独特优势、紧凑的结构特别适合相干合成和百千瓦使用的需求, 市场推广的几种器件(即光纤熔锥耦合器、多芯光纤、带尾纤的相位调制器与声光移频器等)起到了至关重要的作用. 光纤熔锥耦合器、多芯光纤使得基于激光能量注入耦合和倏逝波耦合的被动相位控制十分便利^[29~31], 带尾纤的相位调制器与声光移频器使得主动相位控制能够具备 MHz 量级的控制带宽, 可以用于控制大功率条件下的相位起伏, 实现锁相输出^[32~34]. 自 1999 年俄罗斯 Kozlov 等人^[30]首次报道 2 路光纤激光相干合成的实验结果(毫瓦级)后, 国际上有 10 多个国家的 40 多个研究单位开展了相关研究, 具有代表性的研究成果如表 1 所示^[35~49], 到 2012 年, 已经有多家单位实现了千瓦级高功率输出.

截至目前, 最具有代表性的研究成果当属 2011 年美国麻省理工学院报道的 8 路光纤放大器相干合成实现 4 kW 功率输出, 图 1 为该实验的主要结果, 即 8 束激光相干合成后的远场光强分布与单束激光的远场光强对比, 8 束激光相干合成后的远场轴上光强达到了单束激光的 50 倍.

据不完全统计, 目前光纤激光相干合成的实现方案超过了 20 种^[21~24]. 但实现百瓦级以上功率输出的大都基于图 2 所示的系统结构实现. 种子激光被分

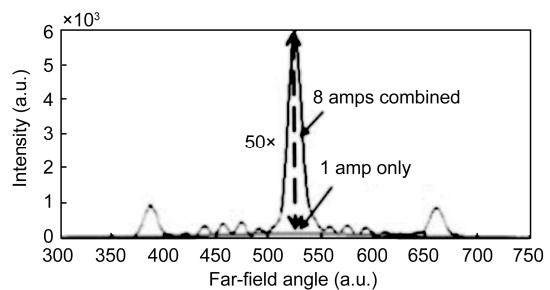


图 1 8 路激光相干合成实验结果^[46]

作 N 路, 每一路激光与一个电光相位调制器连接, 经过相位调制器后的激光再通过多级级联放大后经由准直系统和光束合成系统后传输到自由空间, 反射镜将绝大部分激光能量反射, 另一小部分透射的激光经过透镜聚焦到光电探测器上, 光电探测器将光信号转换为电信号, 传递到相位控制系统. 根据傅里叶光学原理, 此时光电探测器上接收到的光强分布是阵列激光的远场强度分布. 在系统开环, 未对各路激光实施相位控制时, 外界环境和放大器本身会引起各路激光相位随机起伏, 从而引起远场光强分布的随机变化. 此时光电探测器转换的电信号可反映出光强的变化规律, 蕴含了各路激光的相位变化信息. 相位控制系统从电信号中解算出对每一路激光施加的相位控制信号, 并作用到电光相位调制器上. 整个系统形成闭环后, 各路激光的相位彼此相同(即彼此相干), 而由反射镜反射的输出阵列光束即为期望得到的相干合成光束.

由图 2 可以看出, 光纤激光相干合成系统主要由①光源子系统、②相位控制子系统以及③光束合成子系统等 3 个关键部分组成, 当前的研究也主要围绕上

表 1 光纤激光相干合成代表性研究成果

Time	Institutions	Output power (W)	Laser channels	Ref.	Remarks
2003	Northrop Grumman	8	4	[35]	
2003	MIT	20	2	[36]	
2006	AFRL	100	9	[37]	
2006	Northrop Grumman	470	4	[38]	
2007	Lockheed Martin	710	4	[39]	
2009	AFRL	725	5	[40]	
2010	QinetiQ	600	4	[41]	
2011	NUDT	1080	9	[42]	
2011	AFRL	1400	16	[43]	
2011	SIOM	1060	4	[44]	
2011	MIT	4000	8	[45]	
2012	NUDT	1800	9	[46]	
2012	XIOPM	925	4	[47]	
2012	MIT	1900	5	[48]	Single aperture
2012	Northrop Grumman	600	15	[49]	Single aperture

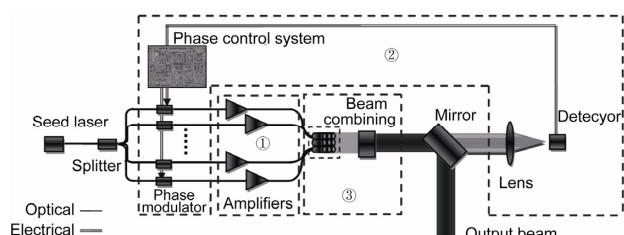


图 2 光纤激光相干合成系统结构图

述 3 个部分展开,下面分别予以介绍.

2.1 光源子系统

高功率光纤放大器是相干合成系统获得高功率输出的前提. 在相干合成研究的初期, 研究人员普遍认为主动相位控制相干合成要求各路单元光束单频输出(一般谱宽小于或等于受激布里渊增益谱线宽度级, 如小于 100 MHz)^[50, 51]. 单频光纤放大器的研究进展如表 2 所示^[52-65], 可以看出, 受限于受激布里渊散射(SBS)效应, 单频掺镱光纤放大器的输出功率多年来一直停留在 500 W 级^[55], 且大都采用空间结构实现, 存在稳定性不足的缺陷, 致使光纤激光相干合成系统的输出功率迟迟没有突破千瓦级.

近年来, 研究人员一方面将系统结构改为全光纤结构, 提升了放大器的稳定性; 另一方面, 通过相位调制等方式对激光线宽进行一定程度的展宽, 由原来的单频激光变为窄线宽激光, 保证放大器输出光束可相干合成的同时提高了输出功率. 2009 年, 美国 Nufern 公司实现了商品化的千瓦级全光纤结构光纤放大器, 激光线宽约为 7 GHz, 后又经优化将线宽

压缩至 3 GHz^[66, 67]; 2010 年, 美国 IPG Photonics 公司为 Northrop Grumman 公司提供了一台输出功率达 1.4 kW 的光纤放大器, 激光线宽约为 25 GHz^[68]. 需要说明的是, 尽管激光线宽远高于单频激光器或放大器, 但还是窄于常规光纤激光器的输出线宽(数纳米级, 对应的线宽在 THz 以上).

本课题组自 2009 年来开展了全光纤结构高功率窄线宽光纤放大器的理论与实验研究. 先后实现了单频光纤激光 80 和 168 W 功率输出^[69, 70]. 2010 年底和 2011 年初, 分别实现了 275 和 334 W 功率输出, 激光线宽小于 0.1 GHz^[71, 72]; 2012 年初实现了 666 W 功率输出, 激光线宽小于 0.5 GHz^[73]; 2012 年 7 月, 实现了 GHz 线宽的全光纤结构光纤放大器 1.01 kW 输出^[74, 75]. 千瓦级可相干合成光纤放大器的实现, 使得万瓦级(以上)高功率相干合成系统的研制成为可能.

2.2 相位控制子系统

相位控制子系统控制相干合成系统中激光的相位, 使得各路激光相位差恒定. 依照相位控制的原理, 相位控制方案可以分为被动相位控制和主动相位控制两大类. 虽然被动相位控制目前已实现 25 路激光同相输出, 但系统输出功率普遍较低, 且在物理机制上存在合成效率随着激光数目增多而下降的不足^[76-79], 因此本文不作详细讨论. 目前高功率光纤激光相干合成的实验大都采用主动相位控制方案^[80-86]. 依照相位控制机理, 主动相位控制法主要可分为外差法、随机并行梯度下降(简称 SPGD)算法、多抖动法、单抖动法等. 麻省理工学院利用 SPGD 算

表 2 单频光纤放大器代表性研究成果一览

Time	Institutions	System configuration	Power (W)	Seed linewidth	Beam quality	Ref.	Remarks
2003	Jena	Bulk	100	2-3 kHz	$M^2=1.1$	[52]	Linear polarized
2005	ORC	Bulk	264	60 kHz	$M^2=1.1$	[53]	Linear polarized
2005	ORC	Bulk	151	1 MHz	$M^2=1.1$	[54]	Er-Yb doped
2007	ORC	Bulk	511	60 kHz	$M^2=1.6$	[55]	
2007	Corning	Bulk	502	3 kHz	$M^2=1.4$	[56]	
2008	OFS	All fiber	194	25 kHz	$M^2=1.2$	[57]	
2010	SIOM	Bulk	128	20 kHz	Near single mode	[58]	Linear polarized
2011	AFRL	Bulk	494	~10 kHz	$M^2=1.3$	[59]	Linear polarized
2011	AFRL	All fiber	203	100 kHz	N.A.	[60]	Linear polarized
2012	LZH	All fiber	300	1 kHz	$M^2=1.15$	[61]	
2012	NUDT	All fiber	310	20 kHz	$M^2=1.3$	[62]	
2012	LZH	Bulk	246	1 kHz	N.A.	[63]	Linear polarized
2013	SIOM	All fiber	170	1 kHz	$M^2=1.02$	[64]	Linear polarized
2009	Northrop Grumman	Bulk	608	5 MHz	$M^2=1.05$	[65]	Tm-doped

法实现了低功率条件下 48 路光纤激光和 21 路半导体激光的相位控制^[80, 81], 本课题组也开发了基于 SPGD 算法的 16 路光纤激光相位控制系统^[82], 并利用该算法实现了 9 路光纤放大器相位控制千瓦级功率输出^[83](可拓展到 16 路或更多路, 仅受限于放大器的数目). 美国空军研究实验室开发了基于多抖动法的 32 路光纤激光相位控制系统^[84], 利用多抖动法实现了 16 路光纤激光相位控制千瓦级功率输出. 多抖动法在向大数量光束相干合成扩展时至少存在两个困难, 一是随着路数的增多占用的频率资源也越来越多, 直到电路不能实现; 二是由于每束光需要单独的控制回路, 随着控制路数的增多, 所需的控制电路会越来越多, 成本和系统复杂性也随之增加. 为了缓解这些困难, 本课题组提出了单抖动法相干合成方案^[85], 有力的缓解了多抖动法对频率资源的需求和控制电路的难度, 目前已经开发了基于单抖动法的 16 路光纤激光相位控制系统, 利用单抖动法实现了 9 路光纤激光相位控制千瓦级功率输出(可拓展到 16 路或更多路, 仅受限于放大器的数目).

2.3 光束合成子系统

当前, 光束合成方案大都是对准直输出的光束阵列采用几何光学的方法简单拼接后直接输出. 由于光纤激光器输出的光束近似呈高斯分布, 因此, 采用几何拼接的方式无法获得高占空比阵列光束, 导致输出光束远场激光能量向旁瓣分散, 降低了能量集中度, 导致光束质量退化, 影响了相干合成的效果. 目前, 虽已有多家单位报道了千瓦级相干合成试验结果, 但是远场光束质量不佳. 针对此问题, 国内外研究人员提出了幅相转换、光束整形、光束截断、衍射光学、相干偏振合成和自成像波导等 6 种方案^[87~94], 其中后 3 种已经实现百瓦级功率输出.

衍射光学的方法由美国诺格公司提出, 采用衍射光学元件(Diffractive Optics Element, 简称 DOE) 实现若干路相位锁定的光束共轴输出的基本原理如图 3 所示. 2008 年, 该公司开展了低功率条件下的 5 路锁相激光共轴输出^[90]. 2011 年, 该公司分别与麻省理工学院和美国空军研究实验室合作, 利用 DOE 实现了高功率的激光输出^[48, 49]. 在与麻省理工学院的合作实验中, 采用了 5 路 500 W 级宽谱、单模、保偏光纤放大器, 输入功率为 2500 W, 输出功率为 1930 W, 光束质量因子 $M^2=1.1$; 在与美国空军研究实验室的

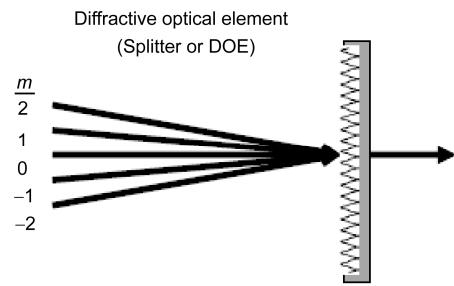


图 3 基于衍射光学元件光束合成的基本原理^[90]

合作实验中, 采用了 15 路(排成 3×5 的阵列)百瓦级单频保偏光纤放大器, 输入功率为 684 W, 输出功率为 600 W, 光束质量因子 $M^2=1.1$.

相干偏振合成方法由美国洛克西德·马丁(下文简称洛马)公司于 2010 年提出^[91]. 它的基本原理如图 4 所示, 利用相位锁定的方法将参与合成的两路正交偏振光的相位差锁定为 $n\pi$, 使得合成后的光束为线偏光, 通过偏振态旋转装置后又可以和另一束与其偏振方向垂直的线偏振光进行合成, 由此级联下去, 亦可实现合成光束共轴输出. 2010 年, 洛马公司对该方案进行了低功率的实验验证, 并在同年实现了 4 路激光相干偏振合成共轴输出, 输出功率为 25 W^[95]. 本课题组于 2011 年开展了相干偏振合成技术的研究, 目前已经实现 8 路低功率激光相干偏振合成和 4 路高功率激光相干偏振合成, 输出功率达 60 W^[96, 97].

自成像波导方法由美国洛马公司于 2007 年提出, 是一种基于多模波导自成像效应的合成方案^[92]. 本课题组理论研究结果表明该方法可有效保持合成后的光束质量^[98]. 2007 年, 洛马公司 Christensen 等人进行了 4 路低功率激光合成的验证性实验, 2010 年, Christensen 等人进行了 4 路高功率锁相光纤激光自成像波导合成实验, 输出功率大于 100 W, 合成后光束质量因子 $M^2<1.25$ ^[99].

2.4 其他研究动向

以往进行的光纤激光相干合成研究大都针对连

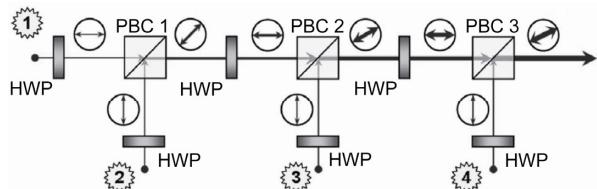


图 4 相干偏振合成基本原理^[91]

续激光开展。近两年来, 对脉冲光纤激光相干合成获得高峰值功率或大能量激光输出也成为了人们关注的热点^[100~106]。法国 Office National d'Études et Recherches Aérospatiales(ONERA)通过对两路飞秒脉冲激光进行主动相位控制, 获得了 7.2 W 的平均功率输出^[101]; 法国 Amplitude Systems 公司通过对两路脉冲激光进行被动相干合成, 获得了 650 μJ 脉冲能量和 105 W 平均功率的飞秒脉冲输出^[102]; 德国 Friedrich-Schiller 大学对两路飞秒激光进行主动相位控制, 先后获得了 0.5 mJ 的单脉冲能量^[103]和 5.4 GW/3 mJ 的峰值功率/脉冲能量激光输出^[104]。本课题组近年来也开展了纳秒脉冲激光主动相干合成研究, 实现了 5 路纳秒脉冲激光相干合成, 合成后峰值功率达到 21.5 kW^[105, 106]。需要说明的是, 与连续激光相位控制的情形不同, 系统中光电探测器转换的电信号的变化不再单纯蕴含各路激光的相位信息, 激光的脉冲运行体制也会造成电信号随时间的变化, 因此相位控制系统还需要具备对脉冲激光引起的时变信号的滤波功能。

值得注意的是, 在光纤激光领域, 中红外光纤激光器是掺镱激光器之外的另外一个研究热点。目前, 输出波长在 2 μm 附近的掺铥光纤激光输出功率已经突破了 kW^[107], 不同运行体制(连续、调 Q、锁模)下的 3 μm 光纤激光也已经陆续报道^[108~112], 对中红外光纤激光进行相干合成是进一步提升系统功率的有效方式。本课题组于 2010 年采用不同的相位控制方式实现了 2 路掺铥光纤激光相干合成^[113], 美国诺格公司的 Goodno 等人^[65, 114]也实现了对 600 W 级掺铥光纤放大器的主动相位控制。

3 发展分析

由前分析可以看出, 光纤激光相干合成主要涉及高功率窄线宽光纤放大器、多束激光相位控制以及光束合成等几项关键技术。从目前的发展水平看, 多束激光的相位控制技术已经基本成熟, 采用 SPGD 算法、多抖动法、单抖动法均已实现多路数百瓦级光纤放大器相干合成, 获得千瓦级功率输出。对单路激光的相位噪声特性的实验分析结果表明, 十瓦级和千瓦级光纤放大器的相位噪声特性差别不大^[65, 114], 特别是对相干合成效果有严重影响的、必须进行校正的低频段相位噪声主要集中在百赫兹以下, 目前的技

术手段已经可以满足多路千瓦级光纤放大器相干合成的需求。因此, 多路激光相位控制是目前光纤激光相干合成系统中最为成熟的一项技术。但是需要说明的是, 当前技术虽已满足要求, 不能排斥具有更高相位控制能力的新技术的探索研究。高功率光纤激光相干合成系统的未来发展, 需要从以下几个方面予以重点关注。

3.1 高功率可相干合成的光纤放大器

目前已有多家单位研制出千瓦级光纤放大器, 但若基于此构建百千瓦级高能光纤激光系统, 则系统单元路数偏多, 增加了系统的复杂度。2009 年, 美国 DAPRA 启动 RIFL(Revolution in fiber laser)项目, 用于研制数千瓦、单模、单频光纤放大器, 项目的主要承研单位是美国诺格公司, 最终目标是在 2014 年之前实现输出功率为 3 kW, 光束质量优于 1.6 倍衍射极限^[115]。受限于 SBS 效应, 目前全光纤结构的严格单频光纤放大器的最大输出功率纪录是 310 W^[62], 离 3 kW 的目标还有量级上的差距。适当放宽对激光线宽的要求, 虽已实现千瓦级功率输出, 但从目前的实验结果分析, 进一步提升功率可能会受到半导体泵浦源亮度的限制。因此, 还需要在以下几个方面进一步深入开展高功率可相干合成光纤放大器的研究。

1) 探索 SBS 效应的有效抑制方法。目前单频大功率光纤放大器大都基于石英基质的掺镱光纤研制的。与石英基掺镱光纤相比, 磷酸盐光纤具有更高的掺杂浓度^[116], YAG 晶体(或陶瓷)光纤以及蓝宝石光纤具有更低的 SBS 增益系数^[117], 理论上可以输出更高功率的单频激光^[15]。我们建立了不同基质条件下单频激光的极限功率模型^[118], 得到了不同光纤的功率提升限制因素和极限功率, 计算结果如图 5 所示, YAG 晶体(或陶瓷)光纤和蓝宝石光纤其极限输出功率可达 10 kW 以上。

从 SBS 产生的物理机制可知, 参与 SBS 效应的是声学声子, 掺杂基质的响应时间决定了声子的寿命, 这就意味着激光脉冲变短会减弱 SBS 效应, 特别是当脉冲短于声子寿命时, SBS 效应有可能最终停止发生^[119]。需要指出的是, 由于变换极限的限制^[22, 120], 当脉宽较窄(如小于 10 ns)时, 输出激光的线宽有所展宽, 这也在一定程度上提升了 SBS 的抑制效果。综上, 探索新的掺杂基质和应用短脉冲激光是抑制 SBS 的有效方式, 有望进一步提升放大器的输出功率。

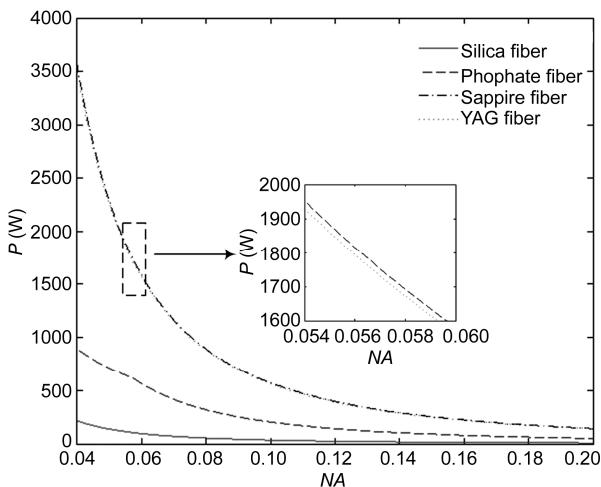


图 5 不同基质掺杂光纤单频极限输出功率与纤芯数值孔径的关系

2) 攻克泵浦源亮度。目前实现千瓦级高功率输出的方案大都采用半导体激光直接泵浦的方式。尽管 Nufern 公司早在 2009 年就公布了采用半导体激光泵浦实现 3 kW 光纤放大器的实现方案, 但至今尚未有后续实验报道。受限于半导体激光器的亮度, 目前 3 kW 以上单模光纤激光器都是采用 1018 nm 光纤激光同带泵浦实现的, 其系统结构如图 6 所示^[22, 121], 采用放大器结构, 利用 47 只 270 W、中心波长为 1018 nm 的光纤激光器泵浦掺杂光纤, 将 1 kW 的种子激光放大至 10 kW 功率输出。

本课题组已经实现了近单模 1018 nm 光纤激光器百瓦级功率输出^[122~124]。1018 nm 光纤激光器的亮度比当前常规半导体激光器高两个量级, 在一定程度

上解决了泵浦源亮度的问题。但掺镱光纤对 1018 nm 激光的吸收能力远低于 915/975 nm 半导体激光器, 在实际中需要很长的掺杂光纤才能吸收, 而光纤长度的增加又降低了 SBS 等非线性效应产生的阈值, 因此还需兼顾 SBS 效应的问题。

3) 探索其他波段实现大功率的可行性。近年来, 随着光纤材料和泵浦源亮度的提升, 石英基掺铒、掺铥和掺钬光纤激光器(放大器)得到了迅猛发展^[125], 目前掺铥光纤放大器和掺钬光纤放大器^[126]都已经实现千瓦级功率输出。由于石英基掺铒光纤、掺铥/钬光纤输出激光的中心波长分别在 1.5 和 2.0 μm 左右, 因此单模输出对应的非线性效应阈值更高^[107], 更有利于单频高功率输出。2009 年, 美国诺格公司报道了 608 W 单频掺铥光纤放大器^[65], 一举超过了之前所有单频掺镱光纤放大器的输出功率。最近, 本课题组建立了单频掺钬光纤激光极限输出功率理论模型^[127]并进行了数值计算, 如图 7 所示, 结果表明, 单频掺钬光纤激光的极限输出功率有望突破 2 kW。

4) 偏振控制问题。从理论上说, 为获得理想的相干合成效果, 一般要求各路激光线偏输出, 且偏振态和相位完全一致。但是严格偏振保持器件(如保偏光纤、保偏隔离器)等成本较高。Goodno 等人^[68]通过偏振控制的方式, 使得 IPG Photonics 公司为其研制的 25 GHz 线宽、1.4 kW 的非保偏光纤放大器输出光束消光比达到了 12 dB, 为后续研究奠定了良好的基础。因此, 研究偏振控制的基本原理与关键技术, 采用非保偏放大器件实现线偏激光输出, 是下一步需要重点关注的问题。

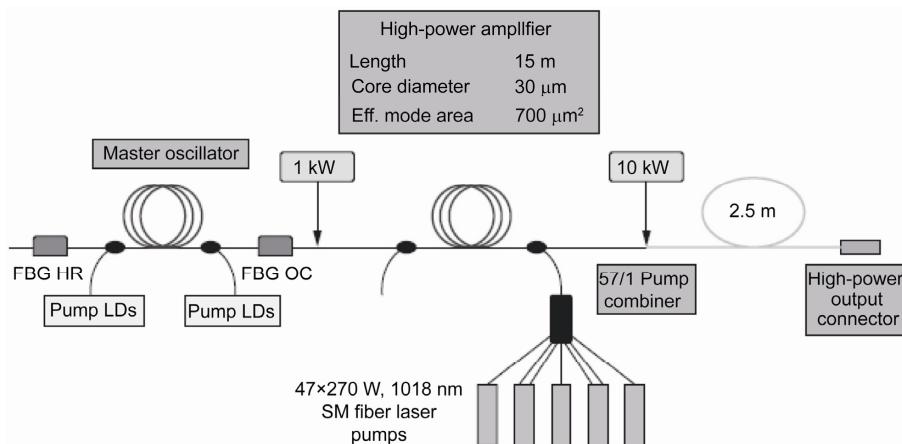


图 6 同带泵浦万瓦级功率输出系统结构^[22]

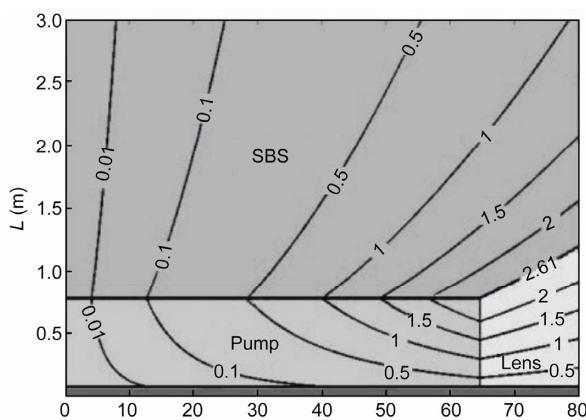


图 7 $2 \mu\text{m}$ 单频掺钛光纤放大器输出极限功率与影响因素的等高线图

5) 单元光束相干特性的测试与评估。当前, 虽然已有多家单位实现了千瓦级窄线宽激光输出, 但是这种千瓦级高功率放大器应用于相干合成的效能则较少得到关注。诺格公司是为数不多的进行过相关研究的单位之一。实验结果表明, 从 608 W 单频掺钛光纤激光中取样并与瓦级低功率激光锁相时, 远场条纹可见度超过 95%。而对 25 GHz 千瓦级光纤激光锁相时, 远场条纹可见度约为 90%。虽然对于两束光而言差别不大, 但是拓展到更多路数时, 不排除存在退化相干合成效果的可能性。因此, 在研制单束高功率光纤激光时, 必须及时开展相应的相干特性的测试与评估, 并及时反馈至单束激光的研制过程, 确保扩展到多束激光时相干合成的效果。

3.2 光束合成

光束合成的效果是影响最终到靶激光功率密度的关键因素。目前国内外研究人员已经提出多种方案, 部分方案已经开展了千瓦级条件下的实验验证。但当前提出的各种方案各自还存在不足之处。美国诺格公司的 DOE 虽已实现千瓦级合成输出, 并保持了良好的光束质量, 但是该器件对激光存在较大的损耗, 约 20%^[48]。如进一步增加功率, 则损耗激光产生的热效应势必会造成光束质量的退化, 甚至有可能造成 DOE 的损坏。自成像波导器件也面临着与 DOE 类似的问题(当前损耗约 20%^[49]), 如何大幅度降低器件的损耗是上述两种方案能否实现万瓦(以上)级更高功率输出的关键。采用相干偏振合成技术已实现百瓦级功率输出, 系统中的核心器件——偏振合束

器的功率承受阈值可达 MW/cm^2 , 且对入射线偏激光的损耗不大, 但高功率激光辐照会使得偏振合束器形成新的温度场和应力场分布, 会造成光束质量和偏振态的退化, 从而影响下一级合束的效率, 最终影响系统的输出功率和光束质量。另外, 由于大功率单链路光纤放大器往往采用大模场面积光纤, 不一定保持严格单模输出, 其输出光束偏振态也将呈现不同的空间分布^[128], 如图 8 所示, 这也会最终影响偏振合束的效果。

综上所述, 需要对上述几种合成方案进行深入的理论和实验研究, 遴选出最具有大功率输出潜力的方案。另外, 由于当前的几种技术方案均不成熟, 还迫切需要提出新的思路和方法。

3.3 实际大气传输与闭环控制

当前的光纤激光相干合成研究都是在实验室环境中进行。在实际应用环境中, 大气不可避免地会影响激光合成与传输的效果。美国陆军研究实验室已经开展了百毫瓦功率条件下 7 km 大气传输合作目标闭环控制实验, 本课题组开展了模拟大气湍流环境下百瓦级高功率激光阵列非合作目标闭环控制实验, 验证了相干合成在实际应用环境中的效能^[129-131]。接下来需要深入开展光纤激光相干合成大气传输与闭环控制的理论与实验研究。除此之外, 在走出实验室、走向实际应用的过程中, 还存在一系列的工程技术问题, 需要在下一步的研究工作中予以解决, 如各路激光的时、空对准问题。当前在实验室研究中, 一般采用手动或计算机辅助调节的方式, 调节各路激光的光程差和光轴方向, 将光程差控制在相干长度之内, 保证各路光束的光轴方向, 便于诊断相干合成的远场效果并从中提取相位控制信号。在实际应用过程中, 环境温度、机械振动等因素会给光程差、光

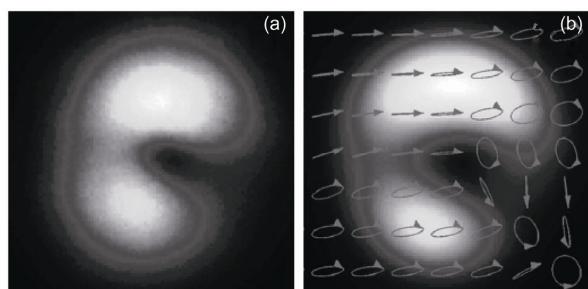


图 8 大模场面积光纤输出激光模式

(a) 强度分布; (b) 偏振态分布^[128]

轴方向引入随机误差, 手动或计算机辅助调节的方式已经不能满足实际需要。美国诺格公司已经于今年相继开发出两套自动控制系统^[132, 133], 用于工程实际中光程差、光轴方向的自动闭环控制。

4 结语

光纤激光相干合成是实现高平均功率、高光束质量激光输出的有效方式, 经过近 10 年的发展, 科研人员在单束可相干合成激光、多束激光相位控制以及光束合成等方面开展了深入研究, 并相继取得了突破性进展, 已经获得了数千瓦级相干合成功率输出。

但我们还应清醒地看到: 多路光纤激光相干合成的总输出功率和光束质量至今尚未超越万瓦这个单束光纤激光的最高值。究其原因, 主要在于可相干合成激光的输出功率还停留在千瓦级, 且应用多路激光相干合成的效果还有待评估, 提出的多种光束合成方案究竟能否适用于万瓦(以上)级功率还有待理论分析和试验验证。因此, 进一步提升单路可相干合成激光的输出功率, 并研判出一条真正适合与大功率激光的光束合成方案是未来几年工作的重点。光纤激光相干合成研究过程中攻克的关键技术和积累的经验还可以应用到其他类型高功率激光相干合成系统的研制中。

参考文献

- 1 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–B92
- 2 Andrew M R, Berdine R W. Introduction to high power fiber laser. Directed Energy Professional Society, 2009
- 3 Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology. Proceeding of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009
- 4 Ruppik S, Becker F, Grundmann F, et al. High power disk and fiber lasers—a performance comparison. *Proc SPIE*, 2012, 8235: 82350V-1–82350V-19
- 5 Yu H, Kliner D, Liao K, et al. 1.2-kW single-mode fiber laser based on 100-W high-brightness pump diodes. *Proc SPIE*, 2012, 8237: 82370G-1–82370G-7
- 6 Jenoptik A G. Products datasheet. <http://www.jenoptik.com>
- 7 Corelase. Products datasheet. <http://www.corelase.fi>
- 8 SPI Lasers. Products datasheet. <http://www.spilasers.com>
- 9 Fan Y, He B, Zhou J, et al. Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA. *Opt Express*, 2011, 19: 15162–15172
- 10 马阎星, 肖虎, 周朴, 等. 全光纤激光器实现 kW 级功率输出. 强激光与粒子束, 2011, 23: 1137
- 11 闫平, 肖起熔, 付晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器. 中国激光, 2012, 39: 0416001
- 12 中国科学院西安光机所. 我国大功率全光纤激光器输出功率突破 1000 W. 传感器世界, 2009, 11: 39
- 13 Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers. *Opt Express*, 2008, 16: 13420–13266
- 14 Zhu J, Zhou P, Ma Y, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber laser and amplifiers. *Opt Express*, 2011, 19: 18645
- 15 Dawson J W, Messerly M J, Heebner J E, et al. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials. *Proc SPIE*, 2010, 7686: 768611-1–768611-12
- 16 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
- 17 Zhu J, Zhou P, Wang X, et al. Analysis of maximum extractable power of single-frequency Yb³⁺-doped phosphate fiber sources. *IEEE J Sel Top Quant*, 2012, 48: 480–484
- 18 National Academies Press. Review of directed energy technology for countering rockets, artillery, and mortars (RAM). http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12008
- 19 梅遂生. 向 100 kW 进军的固体激光器. 激光与光电子学进展, 2008, 45: 16
- 20 任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向 100 kW. 激光与红外, 2006, 35: 617
- 21 Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high radiance sources. *IEEE J Sel Top Quant*, 2005, 11: 567–577
- 22 Injeyan H, Goodno G D. High Power Laser Handbook. USA: The McGraw-Hill company, 2011
- 23 Augst S J, Ranka A K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24: 1707–1715
- 24 IEEE Photonics Society. Special issues on laser beam combining and fiber laser system. <http://www.ieee.org/portal/site/leos>

- 25 Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, Sabourdy D, et al. Coherent combining of fiber lasers. *C R Physique*, 2006, 7: 244–253
- 26 Don S. High energy laser joint technology office electric laser initiatives. *OFC*, 2009
- 27 Northropgrumman Corporation. Robust Electric Laser Initiative (RELI). www.as.northropgrumman.com/products/reli/index
- 28 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, 37: 2221
- 29 Lyndin N M, Sychugov V A, Tikhomirov A E, et al. Laser system composed of several active elements connected by single-mode couplers. *Quantum Electron*, 1994, 24: 1058–1061
- 30 Kozlov V A, Cordero J H, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers. *Op Lett*, 1999, 24: 1814–1816
- 31 Cheo P K, Liu A, King G G. A high-brightness laser beam from phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array. *Photonics Tech Lett*, 2001, 13: 439–441
- 32 EO Space. Electro-Optical integrated circuits (ICs) and components. <http://www.eospace.com>
- 33 Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers. *Opt Lett*, 2004, 2: 474–476
- 34 Brimrose. Acousto-Optic components. <http://www.brimrose.com>
- 35 Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array. *Proc of SPIE*, 2003, 4974: 1–6
- 36 Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining of ytterbium fiber laser amplifiers. In: Conference on Lasers and Electro-Optics. USA: Technical Digest, 2003
- 37 Shay T M, Benham V, Spring L J, et al. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 61020V-1–61020V-5
- 38 Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high power fiber arrays. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 61020U-1–61020U-5
- 39 Loftus T H, Thomas A M, Norsen M, et al. Four-channel, high power, passively phase locked fiber array. *OSA/ASSP conference*, 2008
- 40 Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, et al. High power phase locking of a fiber amplifier array. *Proc SPIE*, 2009, 7195: 71951M-1
- 41 Jones D C, Turner A J, Scott A M, et al. A multi-channel phase locked fibre bundle laser. *Proc SPIE*, 2010, 7580: 75801V-1–75801V-8
- 42 Ma Y, Wang X, Leng J, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique. *Opt Lett*, 2011, 36: 951–953
- 43 Flores A, Shay T M, Lu C A, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime. *Proc CLEO*, 2011
- 44 Xue Y, He B, Zhou J, et al. Passive phase locking of four yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop. *Chin Phys Lett*, 2011, 28: 054212-1–054212-4
- 45 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
- 46 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
- 47 赵保银, 段开棕, 赵卫, 等. 2×2 全光纤激光器阵列部分相干合成的实验研究. *红外与激光工程*, 2012, 41: 58
- 48 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
- 49 Thielen P, Ho J, Burchman D, Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600-W beam. *Opt Lett*, 2012, 37: 3741–3743
- 50 Limpert J, Röser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers. *IEEE J Sel Top Quant*, 2007, 13: 537–545
- 51 Crystal Fibre A/S. Towards 100 kW fiber laser systems. <http://www.crystalfiber.com>
- 52 Liem A, Limpert J, Zellmer H, et al. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier. *Opt Lett*, 2003, 28: 1537–1539
- 53 Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power. *Opt Lett*, 2005, 30: 459–461
- 54 Jeong Y, Sahu J K, Soh D B S, et al. High-power tunable single-frequency single-mode erbium:ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source. *Opt Lett*, 2005, 30: 2997–2999
- 55 Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W. *IEEE J Sel Top Quant*, 2007, 13: 546–551
- 56 Gray S, Liu A, Walton D T, et al. 502 W, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier. *Opt Express*, 2007, 15: 17044–17050
- 57 Mermelstein M D, Brar K, Andrejco M J, et al. All-fiber 194 W single-frequency single-mode Yb-doped master-oscillator power-amplifier. *Proc SPIE*, 2008, 6873: 683702-1–683702-6
- 58 漆云凤, 刘驰, 周军, 等. 128 W 单频线偏振光纤放大器特性研究. *物理学报*, 2010, 59: 3942

- 59 Robin C, Dajani I, Chiragh F. Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single frequency output. Proc SPIE, 2011, 7914: 79140B-1–79140B-8
- 60 Zeringue C, Vergien C, Dajani I. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition. Opt Lett, 2011, 36: 618–620
- 61 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
- 62 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
- 63 Karow M, Basu C, Kracht D. TEM00 mode content of a two stage single frequency Yb-doped PCF MOPA with 246 W of output power. Opt Express, 2012, 20: 5319–5324
- 64 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
- 65 Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier. Opt Lett, 2009, 34: 1204–1206
- 66 Khitrov V, Farley K, Leveille R, et al. KW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining. Photonics West, 2010, 7686: 76860A-1–76860A-8
- 67 Nufern. NukW: Kilowatt laser amplifier platform. <http://www.nufern.com/kilowatt-amp.php>
- 68 Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg E J, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier. Opt Lett, 2010, 35: 1542–1544
- 69 Chen H, Chen S, Wang X, et al. 80 W all-fiber single-frequency MOPA. In: Proc Photonics Global Conference. Singapore: IEEE, 2010
- 70 Xiao H, Dong X, Zhou P, et al. A 168 W high-power single-frequency amplifier in all-fiber format. Chin Phys B, 2012, 21: 034207-1–034207-4
- 71 王小林, 冷进勇, 杜文博, 等. 275 W MOPA 结构全光纤窄线宽掺镱光纤激光器. 中国激光, 2011, 38: 0308001.
- 72 杜文博, 肖虎, 王小林, 等. 主振荡功率放大结构窄线宽全光纤激光器 334 W 高功率输出. 强激光与粒子束, 2011, 23, 1996
- 73 王小林, 周朴, 肖虎, 等. 窄线宽全光纤激光器实现 666 W 高功率输出. 强激光与粒子束, 2012, 24: 1
- 74 刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 光纤激光相干合成技术. 国际高功率光纤激光器及应用研讨会, 成都, 2012
- 75 刘泽金, 许晓军. 高功率窄线宽光纤放大器及相干合成的最新研究进展. 激光技术前沿论坛, 北京, 2012
- 76 Glova A F. Phase locking of optically coupled lasers. Quantum Electron, 2003, 33: 283–306
- 77 Glova A F, Lysikov A Y, Musena E I. Phase locking of 2D laser arrays by the spatial filter method. Quantum Electron, 2002, 32: 277–278
- 78 Napartovich A P. Phase-locking of laser arrays: Problems and solutions. Proc SPIE, 2000, 4065: 748–758
- 79 Bochov E J, Shakir S A. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system. IEEE J Sel Top Quant, 2009, 15: 320–327
- 80 Kansky J E, Yu C X, Murphy D V, et al. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optics phased array with high-fiber count. Proc SPIE, 2006, 6306: 63060G-1–63060G-11
- 81 Montoya J, Augst S J, Creedon K, et al. External cavity beam combining of 21 semiconductor lasers using SPGD. Appl Opt, 2012, 51: 1724–1728
- 82 周朴, 王小林, 马阎星, 等. 随机并行梯度下降算法实现 16 路光纤激光相位锁定. 中国激光, 2010, 37: 367
- 83 Wang X, Zhou P, Ma Y, et al. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm. Opt Lett, 2011, 36: 3121–3123
- 84 Pilford B N. Locset Phase Locking: Operation, Diagnostics, and Application. Dissertation of Doctoral Degree. New Mexico: Univiersity of New Mexico, 2011
- 85 Ma Y, Zhou P, Wang X, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique. Opt Lett, 2010, 35: 1308–1310
- 86 Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers. Opt Express, 2011, 19: 17053–17058
- 87 Khajavikhan M, Hoyer-Leitzel A, Leger J R. Efficient conversion of light from sparse laser arrays into single-lobed far field using phase structures. Opt Lett, 2008, 33: 2377–2379
- 88 Lachinova S L, Vorontsov M A. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators II-analysis of atmospheric compensation efficiency. J Opt Soc Am A, 2008, 25: 1960–1973
- 89 Brosnan S J, Wichham M G, Komine H. Method and apparatus for optimizing the target intensity distribution transmitted from a fiber coupled array. US patent 7283702, 2007
- 90 Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, et al. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array. Opt Lett, 2008, 33:

354–356

- 91 Überna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination. *IEEE J Quantum Elect*, 2010, 46: 1191–1196
- 92 Christensen S, Koski O. 2-Dimensional Waveguide Coherent Beam Combiner. CLEO, 2007
- 93 周朴, 王小林, 马阁星, 等. 孔径填充——光纤激光阵列相干合成中的关键技术. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 021401
- 94 闫爱民, 刘立人, 刘德安, 等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展. 激光与光电子学进展, 2008, 45: 33
- 95 Überna R, Bratcher A, Tiemann B G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination. *Appl Opt*, 2010, 49: 6762–6765
- 96 Ma P, Ma Y, Zhou P, et al. Coherent polarization beam combining of four high-power fiber amplifiers using single-frequency dithering technique. *Photonics Tech Lett*, 2012, 24: 1024–1026
- 97 Ma P, Zhou P, Su R, et al. Coherent polarization beam combining of eight fiber lasers using single-frequency dithering technique. *Laser Phys Lett*, 2012, 9: 456–458
- 98 Tao R, Si L, Ma Y, et al. Coherent beam combination of fiber lasers with a strongly confined waveguide: Numerical model. *Appl Opt*, 2012, 51: 5826–5833
- 99 Überna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide. *Opt Express*, 2010, 18: 13547–13553
- 100 Liu H, He B, Zhou J, et al. Coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers by an all-optic feedback loop. *Opt Lett*, 2012, 37: 3885–3887
- 101 Dianault L, Hanna M, Lombard L, et al. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers. *Opt Lett*, 2011, 36: 621–623
- 102 Zaouter Y, Dianault L, Hanna M, et al. Passive coherent combination of two ultrafast rod type fiber chirped pulse amplifiers. *Opt Lett*, 2012, 37: 1460–1462
- 103 Seise E, Klenke A, Breitkopf S, et al. 88 W 0.5 mJ femtosecond laser pulses from two coherently combined fiber amplifiers. *Opt Lett*, 2011, 36: 3858–3860
- 104 Klenke A, Seise E, Demmler S, et al. Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy. *Opt Express*, 2011, 19: 24280–24285
- 105 Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Active coherent beam combination of two high-power single-frequency nanosecond fiber amplifiers. *Opt Lett*, 2012, 37: 497–499
- 106 Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array. *Opt Lett*, 2012, 37: 3978–3980
- 107 Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass tm: Fiber laser. *Proc SPIE*, 2010, 7580-16: 7580-16-1
- 108 Faucher D, Bernier M, Caron N, et al. Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 m. *Opt Lett*, 2009, 34: 3313–3315
- 109 Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 m. *Opt Lett*, 2011, 36: 3642–3644
- 110 Li J F, Hu T, Jackson S D. Dual wavelength Q-switched cascade laser. *Opt Lett*, 2012, 37: 2208–2210
- 111 Li J F, Hudson D D, Liu Y, et al. Mode-locked fiber laser operating at 2.87 μm. *Opt Lett*, 2012, 37: 3747–3749
- 112 Gorjan M, Petkovšek R, Marinček M, et al. High-power pulsed diode-pumped Er: ZBLAN fiber laser. *Opt Lett*, 2011, 36: 1923–1925
- 113 Zhou P, Wang X L, Ma Y X, et al. Active and passive coherent beam combining of thulium-doped fiber lasers. *Proc SPIE*, 2010, 7843: 784307-1–784307-9
- 114 Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Narrow linewidth power scaling and phase stabilization of 2-m thulium fiber lasers. *Opt Eng*, 2011, 50: 111608-1–111608-10
- 115 Business of Optics. Solid-state beats chemicals for laser gun. <http://optics.org/news/1/2/14>
- 116 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
- 117 Dragic P, Hawkins T, Foy P, et al. Sapphire-derived all-glass optical fibres. *Nature Photon*, 2012, 6: 627–633
- 118 张汉伟, 周朴, 王小林. 不同基质掺 Yb³⁺光纤的单频极限输出功率分析. 2013(已接受)
- 119 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics. Singapore, 2006, ISBN: 978-0-12-369516-1
- 120 Geng J H, Wang Q, Jiang Z, et al. Kilowatt-peak-power, single-frequency pulsed fiber laser near 2 μm. *Opt Lett*, 2011, 36: 2293–2295
- 121 Laser Focus World. System configuration of tandem pumped 10 kW fiber laser. <http://www.laserfocusworld.com.cn/Detc.asp?id=25>
- 122 Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. High power 1018nm monolithic Yb³⁺ doped fiber laser and amplifier. *Laser Phys Lett*, 2012, 9: 748–753
- 123 Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. Experimental investigation on 1018-nm high-power Ytterbium-doped fiber amplifier. *IEEE Photonics*

- Tech Lett, 2012, 24: 1088–1090
- 124 Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. High power 1018 nm Ytterbium doped fiber laser with an output power of 309 W. *Laser Phys Lett*, 2013 (in press)
- 125 Jebali M A, Maran J N, LaRochelle S. Highly Efficient In-Band Cladding-Pumped 1593 nm All-Fiber Erbium-Doped Fiber Laser. *CLEO*, 2012
- 126 Directed Energy Society. Event proceedings. <http://www.deps.org>
- 127 朱亚东, 周朴, 张汉伟, 等. 2 μm 硅基掺钦光纤激光器极限功率分析. 2013, 33, 0614004-1–0614004-6
- 128 Flamm D, Schmidt O A, Schulze C. Measuring the spatial polarization distribution of multimode beams emerging from passive step-index large-mode-area fibers. *Opt Lett*, 2010, 35: 3429–3431
- 129 Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path. *Opt Lett*, 2011, 36: 4455–4457
- 130 Ma Y X, Zhou P, Tao R M, Coherent beam combination of 100-W level fiber laser array based on scattering surface target. *Opt Lett*, 2013, 38: 1019–1021
- 131 Tao R M, Ma Y X, Si L, et al. Target-in-the-loop high power adaptive phase-locked fiber laser array using single-frequency dithering technique. *Appl Phys B*, 2011, 105: 285–291
- 132 Weiss S B, Weber M E, Goodno G D, et al. Group delay locking of coherently combined broadband lasers. *Opt Lett*, 2012, 37: 455–457
- 133 Goodno G D, Weiss S B. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking. *Opt Express*, 2012, 20: 14945–14953