

基于量子系统的超高亮度光纤激光 合成体系概念与构想

许晓军 杨子宁 王红岩 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 讨论了单口径光纤激光的优势与局限,分析了目前主要采用的基于信息系统的几种光纤激光合成技术的高功率定标放大能力,提出了基于量子系统的光纤激光合成的概念,对未来的光纤激光量子合成系统进行了构想和展望,认为这一系统在百千瓦甚至兆瓦级超高亮度激光领域具有巨大的发展潜力。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 碱金属蒸气激光器; 光束合成; 量子系统; 掺镱光纤

中图分类号 O431.2; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0801001

Concept and Prospect of Quantum System Based Fiber Laser Beam Combination with Super High Brightness

Xu Xiaojun Yang Zining Wang Hongyan Lu Qisheng

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The advantages and disadvantages of single aperture fiber lasers are discussed; the high power scaling ability of some sophisticated fiber laser combining technologies is analyzed. A new concept of fiber laser combining technology based quantum system is proposed; the future development of such system is forecasted, and this new combination concept is thought to be greatly potential in scaling to extremely high brightness laser operation.

Key words fiber optics; fiber laser; alkali vapor laser; beam combination; quantum system; Yb-doped fiber

OCIS codes 060.2310; 060.3510; 140.3298; 140.3615; 270.1670

1 引 言

基于双包层光纤^[1,2]及大功率半导体激光抽运源在输出功率和亮度上的不断提升^[3],高功率高亮度光纤激光器在近年来得到了迅猛的发展,其输出功率正以平均每年 1.7 倍的速度不断提升^[4],远高于采用块状增益介质的传统固体激光器的发展速度。截至目前,美国 IPG 公司已经成功实现商品化的单模高光束质量($M^2 < 1.3$)10 kW 光纤激光输出^[5],是高功率光纤激光发展的又一新的里程碑。光纤激光之所以能够吸引人们的极大兴趣,并在工业、医疗等领域得到广泛应用,除了输出功率的不断提升外,还极大地依赖于其特有的物理和结构方面的优势,正是这些特点将光纤激光与传统固体激光区别开来,并使其得到极大发展。这些优势主要包

括:1) 波导结构能够提供良好的限模能力和热管理特性,易于实现高功率下的高光束质量基模输出;2) 稀土离子掺杂的增益介质普遍具有较宽的增益带宽(约 20 THz),能够实现较宽范围的波长调谐;3) 光纤结构易于实现较高的增益,适合于主振荡功率放大(MOPA)结构,目前商用千瓦级光纤激光普遍采用 MOPA 结构;4) 具有极高的光-光(约 70%)和电-光(约 30%)转换效率;5) 模块化结构,紧凑灵活且易于调节,对外界环境扰动不敏感,并具有极高的可靠性和使用寿命。

虽然光纤激光器具有上述诸多优越的特性,但类似于传统单发射口径固体激光器,单口径光纤激光器在高功率定标放大方面也存在诸多局限因素,并最终限制其输出功率的不断提升。这些限制因素

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-04-06

作者简介: 许晓军(1973-),男,博士,研究员,主要从事气动光学、自适应光学和光纤/固体激光相干合成等方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

主要包括:1) 材料的破坏阈值,石英材料的破坏阈值普遍认为在 $10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$,虽然 IPG 公司宣称能够实现 $100 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ 的纤芯破坏阈值,以其目前实现的最高 10 kW 单模光纤激光来计算(有效模面积 $500 \mu\text{m}^2$)^[6],在破坏阈值限制范围内其功率提升仍然达不到一个量级;2) 热管理特性,目前普遍采用的低折射率光纤涂覆层(氟化丙烯酸酯)虽然具有良好的光学特性,但其较差的热稳定性(可靠工作温度低于 $80 \text{ }^\circ\text{C}$)和较低的热导率[$0.24 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$]使其难以在高功率下工作^[7],虽然全玻璃结构^[8]或采用低折射率玻璃作为涂覆层能够解决热负载对涂覆层的损伤,但这些方案也存在各自的局限并都需要进一步的研究;3) 非线性效应的影响,光纤结构本身决定了大功率条件下非线性效应[受激布里渊散射(SBS)或受激拉曼散射(SRS)]将会十分显著并限制其功率的进一步提升;4) 热引导效应的限制,对于不同的光纤长度和模面积,当功率导致热引导效应出现时,其光纤长度与模面积的比例将会是确定的,这意味着进一步提升纤芯尺寸以产生大模场光束将无法有效消除受激布里渊散射(或其他三阶非线性效应)的影响,在这一限制因素下,单口径衍射极限输出的光纤理论极限输出功率为 36.6 kW ^[9]。虽然目前单口径衍射限输出的光纤激光还没有达到这一理论极限功率,但基于上述限制因素,为了进一步提升光纤激光至百千瓦甚至兆瓦功率量级,对光纤激光进行合成成为必要和现实的途径。

由于各种合成方案对合成子束的要求、体系结构复杂性、可定标放大能力等方面的差异,究竟哪种方案能够最终在更高的功率量级下得以成功还有赖于进一步的研究和论证。通过对光纤激光发展现状

的分析以及其合成技术的对比,本文提出了一种新的光纤激光合成概念——基于量子系统的光纤激光合成,并认为基于该概念的光纤激光合成体系有望能够最终实现超高功率的高亮度激光输出。

2 基于信息系统的光纤激光合成技术及其可定标放大能力分析

光束合成本身并不是一个新的课题,早在 1964 年,Enloe 等^[10]就实现了两路 He-Ne 激光器的相干合成,之后人们对于化学激光器、半导体激光器以及传统固态激光器的光束合成技术都进行过大量而深入的研究^[11]。而相比于其他类型的激光器,光纤激光以其低成本、模块化设计、高可靠性、易于散热、高效率、高光束质量以及高可控性(非常适合于 MOPA 结构)等诸多优点尤其适合于进行光束合成,具有非常良好的发展前景。光束合成可以分成两个层次:1) 单纯提高功率,比如单纯的空间拼接型非相干合成,该方法可以有效提升总的激光功率,但不能提高亮度,能够满足工业应用,并且在军事的短程定向能应用领域具有一定潜力^[12],目前 IPG 公司采用该方法实现输出功率 50 kW 光束质量 $M^2 < 33$ 的多模激光输出^[13]。2) 为了提高亮度,如相干合成、偏振合成、脉冲时序合成和光谱合成等。以下主要讨论第二层次的光束合成,即提高亮度型光束合成。

从总体上说,提高亮度型光纤激光的合成均是针对子光束的某些已知的物理特性,即 $\mathbf{E}(r, \varphi, \omega, t)$ 或者 $I(r, \varphi, \omega, t)$ 中的某些物理量,采取相应的手段进行合成控制(见表 1)以提高亮度,均属于基于信息系统的光束合成范畴。

表 1 提高亮度型光纤激光合成方法比较

Table 1 A comparison of different fiber laser beam combining techniques

Methods	Parameters	Principle
Polarization combination	Single aperture and polarization	$I_p(r, \varphi, \omega, t) + I_s(r, \varphi, \omega, t)$
Pulse timing combination	Single aperture and timing	$\sum_{i=1}^N I_i(r, \varphi, \omega, t_i)$
Spectrum combination	Single aperture and spectrum	$\sum_{i=1}^N I_i(r, \varphi, \omega_i, t)$
Coherent combination	Multi-subaperture and phase	$\sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i(r_i, \varphi_i, \omega, t)$

偏振合成由于单次只能进行两路激光的合成,定标放大能力差,因此在高功率光纤激光合成领域难以采用。脉冲时序合成则通过控制多路脉冲激光

的时序,实现更高的占空比,增加单一孔径内激光平均功率而提高亮度。该方案要求合成光束是低占空比的脉冲激光,并且对最后的合成光学元件的耐强

激光能力要求很高。光谱合成是将多路光束质量相近而具有不同波长的光纤激光通过衍射光学元件合成一束激光,从而有效提高合成光束的亮度,并且仅要求各子光束的波长不同,且受子光束性能的影响较小,即使部分激光单元出现损坏,整体系统也可以正常运行,具有较高的系统稳定性和可靠性。但在高功率定标放大方面,该技术同样也存在局限因素:1) 衍射光学元件对高强度高功率激光的可承受能力有限;2) 衍射光学元件的频谱范围有限,决定了谱合成方案在理论上不可能无限扩展。目前中佛罗里达大学 CREOL 实验室的基于体光栅(VBG)的谱合成方案已实现最高大于750 W激光输出^[14],并且 Aculight 公司还为美国国防部高能技术联合办公室和美国海军提出了输出功率为 10 kW 的解决方案^[15,16]。

相干合成则是采用多孔径自适应光学技术,控制各单元(孔径)激光器输出光束的相位达到锁相输出,以实现光束的相干合成。该方案能够在保持高光束质量的同时提高输出功率,从而有效实现亮度的提高。从相位控制的方式上,相干合成可以分为被动相位控制(光信号反馈)和主动相位控制(电信号反馈)两种方案。被动相位控制也即自组织相干合成,其本质是通过谐振腔的设计使不同子光纤相互耦合,最终形成一个能够同时存在于不同子光纤内的具有高光束质量的超模,从而有效提高合成光束的亮度。自组织相干合成易于实现,无需复杂的外部反馈回路,但各个子光纤激光器的相位不具备可控性,外界环境、抽运源功率不稳定等因素产生的随机变化以及各路光束的偏振特性等都会影响其合成效率^[17,18],因此其定标放大能力还需要进一步的研究。相比之下,主动相干合成是通过外界控制各子光束相位以实现相干合成的。通常基于 MOPA 结构的主动相位控制方案主要有 4 种:外差法、单抖动法、多抖动法以及优化算法。Northrop Grumman 公司于 2009 年采用外差法实现了 7 路光纤主振板条放大结构固体激光相干合成,总输出功率达到了 105 kW,光束质量 BQ 为 3,成为高功率固体激光发展的又一新的里程碑^[19]。2010 年,国防科学技术大学光电科学与工程学院采用单抖动法成功实现 9 路百瓦级光纤放大器相干合成,总输出功率 1082 W,光-光转换效率为 75%,达到了全光纤结构相干合成的同期最高水平^[20]。在高功率定标放大方面,基于 MOPA 结构的主动相位控制方案具有良好的可扩展性,只要能够实现高功率光纤激光器的相位控制,该方案就可以

方便地扩展到多束激光的相干合成。基于此,美国空军实验室提出了具备级联放大特性的光纤激光相控阵结构的设想,这一新颖的激光系统体系结构在实现百千瓦甚至更高功率的高光束质量激光输出方面极具潜力^[21]。

然而,就目前的技术发展水平来看,主动相位控制相干合成在功率定标放大方面仍然存在一些局限性。首先,主动相位控制方案要求各链路激光单频、线偏振输出^[22],而受制于 SBS 等因素的影响,单链路光纤激光输出功率受限,至今单频掺镱光纤放大器的输出功率没有突破 500 W^[23]。因此,为了实现百千瓦甚至更高功率输出需要合成几十甚至上百链路的子光束。而主动相位控制方案要求各链路波前误差控制在 $\lambda/10$ 波长量级^[24],因此合成路数的提高无疑会大大增加系统的复杂性和相位控制难度,以至于影响最终的合成效果。其次,宽谱相干合成虽然能够较好解决上述问题,但由于激光相干长度的减小同样需要对各路激光进行高精度的调节,且其复杂性会随着路数的增多而更加明显。再者,相干合成方案的稳定性较差,如部分单元激光器损坏、外界存在严重的干扰(如剧烈的振动、抖动)、激光器单元的输出光束特性偏离期望值等都会大大影响合成效果。

3 基于量子系统的光纤激光合成

通过前面的分析可以看出,目前的各种光束合成方案在高功率定标放大方面都存在各自的优势和不足。单就其实验效果来看,只有 Northrop Grumman 公司的 7 路光纤板条放大链路合成达到了 100 kW,但其光束质量仍然不理想,除国防科学技术大学实现的 9 路百瓦光纤放大器合成超过 1 kW 功率外,其他的合成方案均在百瓦量级。而与此同时,IPG 公司近年来实现的 10 kW 高光束质量光纤激光输出则成为光纤激光乃至整个高能激光领域发展的新亮点。下面首先对 IPG 公司的技术方案进行简要回顾,并在此基础上提出基于量子系统的光纤激光合成的概念,最后对该合成体系的结构和未来发展提出设想和展望。

3.1 基于量子系统的光纤激光合成的概念

IPG 公司的 10 kW 单模光纤激光采用了级联抽运的方案,其系统结构如图 1 所示。主振荡级为掺镱光纤激光器,输出 1 kW 具有高光束质量的 1070 nm 种子光注入至放大级;放大级增益并不是由通常的半导体激光直接抽运获得,而是先由 975 nm 半导体激光器抽运掺镱光纤激光器产生

300 W 的 1018 nm 光纤激光,再将 45 路各 300 W 的光纤激光进行合束,以总计 13.5 kW 的功率对放大级进行抽运,最终产生 10 kW 的 1070 nm 激光输

出。这种由半导体激光抽运光纤激光器,再由多路光纤激光合束进一步抽运增益光纤以实现最终激光输出的抽运方式就是所谓的级联抽运。

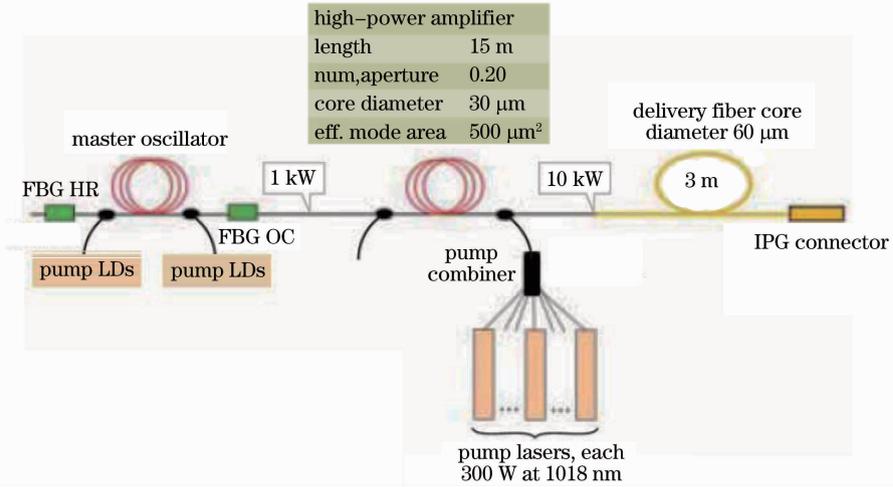


图 1 IPG 公司 10 kW 单模光纤激光系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of IPG's 10 kW single mode fiber laser system

级联抽运方案具有非常多的优越特性,是目前高功率光纤激光领域备受关注的热点,也将是未来高功率光纤激光发展的主要趋势之一。其一,相比于半导体激光器,采用光纤激光器作为抽运源大大提高了抽运亮度,从而能够大大增加同等纤芯尺寸下抽运传导光纤可以容纳的功率;其二,高亮抽运源允许被抽运光纤采用较小的内包层尺寸,从而可以增加抽运光与纤芯的重叠因子以缩短抽运吸收长度,进而抑制了非线性效应;其三,采用同带抽运方案可以使抽运波长与激光波长相近,从而提高了量子效率(1018 nm→1070 nm,量子效率大于 95%),大大提高了系统的总体效率同时减轻了热负载。由此可见,高亮度大功率抽运源和极高的量子效率是 IPG 公司 10 kW 高光束质量光纤激光得以成功实现的根本原因。

从上述方案不难看出,45 路独立的互不相干的光纤激光通过吸收和受激发射的量子过程最终以极高的效率转化为一束具有高相干性的激光,实现了体系从无序到有序,从高熵值到低熵值的转化。相比之下,传统的各种光束合成方案也是为了提高激光体系的有序度,其本质均是实现多路激光系统的熵减这一转化过程。因此,IPG 的级联抽运方案本质上也是一种光纤激光的合成手段,相比于前面提到的基于信息系统的合成,这一方案属于基于量子系统的光纤激光合成的范畴。确切地讲,所谓基于量子系统的光纤激光合成,是指对于多路独立的光

纤激光,通过微观的原子、分子等量子合成元件的吸收和转化,最终实现具有高相干性的激光输出。在 IPG 的方案中,其量子合成元件为镱离子或者更具体地说是掺镱光纤放大器。

3.2 基于量子系统的超高功率光纤激光合成体系构想

虽然 IPG 公司以光纤放大器作为其量子合成元件仍然无法超越单口径光纤的理论功率极限,但其里程碑式的成功无疑证明了光纤激光量子合成系统的突出优势和巨大潜力。为了实现百千瓦甚至兆瓦级超高功率的高质量激光输出,对光纤激光量子合成系统可能的未来发展进行了初步的构想和展望。

3.2.1 量子合成元件

作为光纤激光量子合成的核心,量子合成元件需要具备两个主要特点:1) 要有很高的量子效率,这对于提高量子合成体系的总体效率和降低废热至关重要;2) 其结构要有利于散热,虽然高量子效率本身会降低废热的产生,但在超高功率下热管理问题仍然十分突出。基于上述两点,以下一些介质将有望成为未来高功率光纤激光量子合成体系的核心量子部件:

i) 镱离子掺杂薄片介质

相比于其他稀土离子,镱离子的能级结构[见图 2(a)]决定了其作为高能激光增益介质的诸多优势。1) 镱离子能级结构简单,仅具有 $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 两个能带,因此无论在抽运还是激光波长内都不存在

受激态吸收跃迁; 2) $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 能隙较大, 即使掺杂于声子能量较大的硅材料中也不会出现由 $^2F_{5/2}$ 到 $^2F_{7/2}$ 能带的多声子跃迁过程, 同时也不会出现掺杂浓度猝灭效应, 允许高浓度掺杂; 3) 其能级结构允许使用与激光波长相近的抽运光, 即所谓的同带

抽运, 它能够大大提高量子效率, 如 IPG 公司的方案中 (1018 nm \rightarrow 1070 nm) 量子效率高达 95% 以上; 最后, 镱离子的吸收和发射谱很宽 [见图 2(b)], 因此允许对抽运源进行较为灵活的选择。

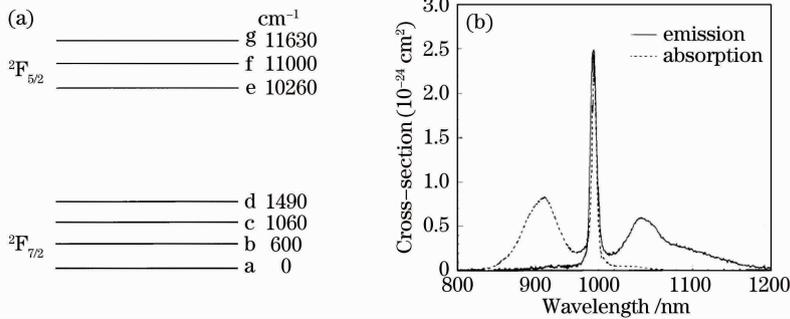


图 2 (a) 镱离子能级结构简图; (b) 锗硅酸盐中掺杂镱离子的吸收和发射谱

Fig. 2 (a) Yb^{3+} energy level structure; (b) absorption and emission cross sections of for Yb^{3+} doped in a germanosilicate host

正是基于这些优势, 掺镱光纤在高功率激光领域得到了巨大发展。事实上, 自 1999 年后的功率提升都是采用镱掺杂的光纤, 如图 3 所示。基于掺镱光纤已经取得的巨大发展, 在百千瓦甚至兆瓦级的更高功率下, 采用具有良好散热结构的掺镱薄片介质作为光纤激光的量子合成器件自然成为可能的未来发展方向之一。

碱金属蒸气激光器以其独特的优势引起人们的极大关注并得到了快速的发展^[26,27]。首先, 碱金属原子为典型的三能级结构 (见图 4), $^2S_{1/2}$ 为基能级, $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 为由于自旋-轨道相互作用产生的激光和抽运上能级, 由于 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 之间的能隙很小, 碱金属原子具有极高的量子效率 (钾 99.5%, 铷 98.4%, 铯 95.2%); 再者, 作为气体介质可以进行流动散热, 具有良好的热管理特性。因此碱金属蒸气从物理特性上是十分理想的量子合成元件。目前阶段, 鉴于可获得的大功率抽运源, 人们主要考虑的是半导体激光抽运碱金属激光器的方案 (DPAL), 实际操作中还需要充入小的烃类分子 (甲烷或乙烷等) 以促进 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级间的非辐射弛豫, 以及惰性气体 (氦气等) 对 D_2 吸收线进行碰撞加宽以实现与线宽压窄后的半导体激光抽运源的光谱匹配, 从而提高抽运吸收效率。

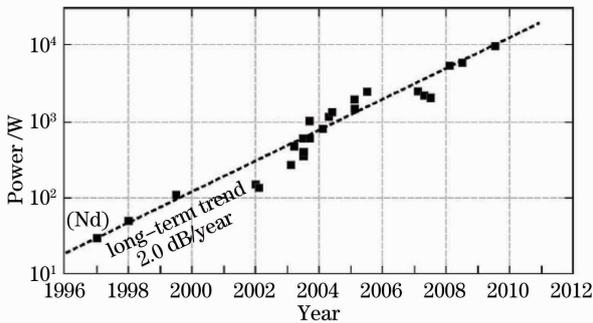


图 3 衍射极限或近衍射极限高功率光纤激光器输出功率发展趋势

Fig. 3 Progress in output power from diffraction-limited and near-diffraction-limited fiber lasers

ii) 基于新材料的大模场掺镱光纤

单口径光纤的功率极限主要是由目前光纤材料的基本物理特性所决定的^[9]。如果随着材料科学的进一步发展, 能够出现新的具有更加良好光学和热学性能的基底材料, 从而大大突破这一理论极限, 则基于这种材料的新型大模场掺镱光纤 (例如光纤棒) 必将在光纤量子合成领域中展现出巨大的优势。

iii) 碱金属蒸气介质

自 2003 年第一台铷蒸气激光器问世以来^[25],

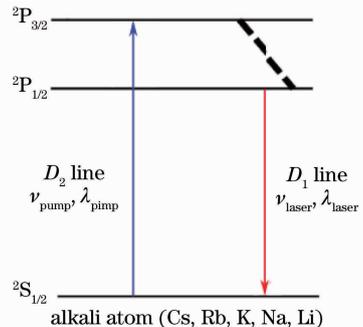


图 4 碱金属原子能级结构简图

Fig. 4 Level structure of alkali atoms

作为量子合成器件的碱金属蒸气, 既可以采用体状流动增益结构^[28], 也可以采用波导结构 (如空

心光纤结构^[29]),这些都是未来的可能发展方向。

3.2.2 用于量子合成的光纤激光器

定位于超高功率和良好光束质量的激光输出,量子合成元件必须具有极高的量子效率,这都在如上所述的三能级(镱离子)或准三能级(碱金属原子)增益介质中实现,而这些量子合成器件的一个共同特点就是都具有很高的抽运阈值。如果采用低亮度的半导体激光器(直接或光纤耦合)进行抽运,则需要复杂的光束整形和聚焦器件,其功率提升也会极大受限于抽运源的空间配置,且由低亮度所导致的短焦深也会严重影响抽运的效果;而采用具有高亮度的光纤激光作为抽运源则很容易实现这一点。再者,光纤激光的高亮度也便于合束,在相同纤芯尺寸下传导光纤能够容纳更高的功率,便于提高总的抽运功率,其固有的灵活、紧凑和高可靠性等特点也非常利于器件的空间安排。这也是采用基于光纤激光器的量子合成系统的重要原因和突出优势。

相比于传统的信息合成系统,量子合成系统对于光纤激光器的要求要弱得多,除了亮度上的要求容易得到满足外,主要是对波长和线宽的要求。这对于掺镱量子合成元件已经得到满足;对于碱金属蒸气介质,则需要未来进一步发展能与之波长(钾 766 nm,铷 780 nm,铯 852 nm)和线宽(0.1~0.4 nm)相匹配的光纤激光。

综上所述,本文提出了光纤激光量子合成的概念,并对未来可能的超高功率光纤激光量子合成系统进行了初步的设想。实际上,光纤激光的量子合成元件及其合成方式可能是多种多样的,仅仅预测了其中几种可能的方案,但基于量子系统的光纤激光合成系统必会在未来的高能激光领域得到进一步的发展和占有重要的一席之地。

4 结 论

讨论了大功率条件下单口径光纤激光的优势与局限,指出光纤激光合成的重要性,并对基于信息系统的几种光纤激光合成方案的高功率定标放大能力进行了分析,论述了每种方案各自的优势和不足。基于 IPG 公司采用同带抽运方案成功实现的万瓦级高光束质量光纤激光的启发,提出了基于量子系统的光纤激光合成的概念;对其在高功率定标放大方面的优势进行了分析,对未来可能的百千瓦甚至兆瓦级光纤激光量子合成系统结构进行了设想,并认为这是未来高能激光领域可能发展的重要方向。

参 考 文 献

- 1 J. D. Kafka. Laser diode pumped fiber laser with pump cavity [P]. U. S. Patent, 4,829,529, 1989
- 2 E. Snitzer, R. Tuminelli. SiO₂-clad fibers with selectively volatilized soft-glass cores[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(14): 757~759
- 3 M. L. Osowski, W. Hu, R. M. Lammert *et al.*. Advances in high-brightness semiconductor lasers[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68761E
- 4 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[Invited][J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 5 E. Stiles. New developments in IPG fiber laser technology[C]. 5th International Workshop on Fiber Lasers, Dresden, Germany, 2009
- 6 J. Hecht. Fiber lasers ramp up the power[J]. *Laser Focus with Fiberoptic Technology*, 2009, **45**(12): 53~57
- 7 M. A. Lapointe, S. Chatigny, M. Piché *et al.*. Thermal effects in high-power CW fiber lasers[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951U
- 8 K. Furusawa, A. Malinowski, J. H. V. Price *et al.*. Cladding pumped ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 714~720
- 9 J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13240~13266
- 10 L. H. Enloe, J. L. Rodda. Laser phase locked loop[J]. *Proc. IEEE*, 1965, **53**(2): 165~166
- 11 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 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[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2221~2234
- 12 P. Sprangle, A. Ting, J. Penano *et al.*. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(2): 138~148
- 13 J. Hecht. Fiber lasers ramp up the power [J]. *Laser Focus World*, 2009, **45**(12): 53~57
- 14 A. Sevan, O. Andrusyak, I. Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 384~386
- 15 A. Brown. Spectrally beam combined lasers for high-brightness, high power applications[OL]. <http://www.down-breaker.com/virtual2004>
- 16 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 413~416
周朴,侯静,陈子伦等.光纤激光相干合成与谱合成的比较[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 413~416
- 17 Jianqiu Cao, Qisheng Lu, Shengping Chen *et al.*. Effect of polarization controlling on coherent beam combining of two-fiber laser arrays of interferometric configuration[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 133~135
- 18 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 276~280
周朴,刘泽金,许晓军.光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 276~280
- 19 S. J. McNaught, H. Komine, S. B. Weiss *et al.*. 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]. *CLEO*, 2009
- 20 Y. Ma, X. Wang, J. Leng *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 951~953
- 21 P. F. McManamon, T. E. William. New technologies and

- architectures for laser systems revolutionary fiber amplifiers[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 1~14
- 22 J. Limpert, F. Roser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 23 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single frequency ytterbium doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 24 T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared[C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 157~164
- 25 W. F. Krupke, R. J. Raymond, V. K. Kanz *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(23): 2336~2338
- 26 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051405
杨子宁, 王红岩, 陆启生等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(5): 051405
- 27 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, R. J. Knize. Scaling of diode pumped Cs laser: transverse pump, unstable cavity, MOPA[C]. *SPIE*, 2010, **7581**: 75810F
- 28 S. Mani, D. Rigdon, K. B. Hewett *et al.*. Weight scaling model for a high power DPAL system[C]. *SPIE*, 2010, **7686**: 76860Y
- 29 S. A. Payne, R. J. Beach, J. W. Jawson *et al.*. Diode pumped alkali vapor fiber laser[P]. U. S. Patent, 7,082,148 B2, 2006