

高平均功率电能激光器研究进展

吴武明, 冷进勇, 周 朴, 吴慧云, 许晓军

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 高平均功率电能激光器在工业加工和定向能量传输、国防军事、激光钻井等领域具有重要的应用前景, 而且有效率高、结构紧凑灵活、热管理方便、后勤保障容易等优点。广泛关注了近几年来国外高平均功率电能激光器的研究进展, 包括固体激光器、光纤激光器、液体激光器、自由电子激光器、碱金属蒸汽激光器、二氧化碳激光器及基于固体和光纤、半导体激光器的相干合成、非相干合成、光谱合成。在介绍了各种激光器工作原理和关键技术的基础上, 详细分析了高平均功率电能激光器面临的技术挑战及未来的发展趋势。

关键词: 电能激光器; 高平均功率; 相干/非相干合成; 固体激光器; 光纤激光器

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)02-0203-07

Research progress of high average power electric-energy laser

Wu Wuming, Leng Jinyong, Zhou Pu, Wu Huiyun, Xu Xiaojun

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

Abstract: High average power electric-energy laser possesses some advantages such as high conversion efficiency, compact configuration, convenient heat management and advantageous logistic services. Therefore, considerable attention has been paid to the technology because of potential applications in laser material processing, orient power transmission, national military, laser drilling etc. Firstly, the research progress of high average power electric-energy laser were summarized, which included solid-state laser, fiber laser, liquid laser, free-electron laser, alkali-vapor laser, carbon dioxide laser. Secondly, coherent beam combinations of solid-state laser, fiber laser, diode laser were discussed. Meanwhile, incoherent and spectral beam combinations multiple laser beams were also investigated. Finally, based on the different principles and key technologies of high average power electric-energy laser, the technical challenge and development tendency of high average power electric-energy laser were analyzed.

Key words: electric-energy laser; high average power; coherent/incoherent beam combination; solid-state laser; fiber laser

收稿日期: 2010-05-02; 修订日期: 2010-07-26

基金项目: 装备预研基金支持项目(513260102)

作者简介: 吴武明(1981-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事高能激光技术方面的研究。Email: treewwm@yahoo.com

0 引言

化学激光器体积庞大,且需要向外排出有害的废气,再加之所需的维护和后勤支援任务繁重,难于集成在小型机动的平台上。相对应化学激光器,电能激光器具有效率高、体积小、使用寿命长、结构紧凑等优点。所以,美国高平均功率的激光器研发工作已大部分转向了电能激光器,包括固体激光器、光纤激光器、液体激光器、碱金属蒸汽激光器、自由电子激光器、二氧化碳激光器。其中也包括当前高平均功率激光器研究的热点:固体和半导体相干合成激光器、光纤相干和非相干合成激光器等。

每一种激光器都有各自的优缺点,分析其研究动态和技术挑战具有较大的参考价值,基于此,文中总结了国外高平均功率电能激光器的研究进展,分析了每一种电能激光器的工作原理及存在的技术问题,最后给出了未来的发展方向。

1 固体激光器

高平均功率固体激光器实现的途径有多种,按增益介质形状分,主要有圆棒激光器、板条激光器、薄片激光器等。另外,相干合成技术和热容技术也成为目前获得高功率输出的有效技术手段。比如美国的“联合高功率固体激光器”(JHPSSL)计划,第一和第二研发阶段的竞选方案是选用单晶激光增益介质的3种固体激光器:Nd:YAG激光器、固体热容激光器(SSHCL)和Yb:YAG激光器。第三发展阶段是选用诺格公司研制的Nd:YAG激光器和达信公司研制的陶瓷Nd:YAG激光器,计划用3年时间分别研制出100 kW的固体激光器^[1]。

1.1 相干合成固体激光器

诺·格公司的相干合成固体激光器是利用外差法来实现的,其结构如图1所示。一个单频主振荡器注入光纤放大器后分束,一路进入频移系统作为参考光,其余支路进入多路光纤调制器,再经光纤预放后进入主放链路。每路主放包含4个Nd:YAG板条介质和一套波前检测系统,通过倾斜镜和变形镜对波前进行矫正以保证单链路激光的光束质量。在输出端由探测器阵列测量放大后的各路信号与参考光间的相位差,反馈信号控制各支路调制器实现各支路间的锁相。

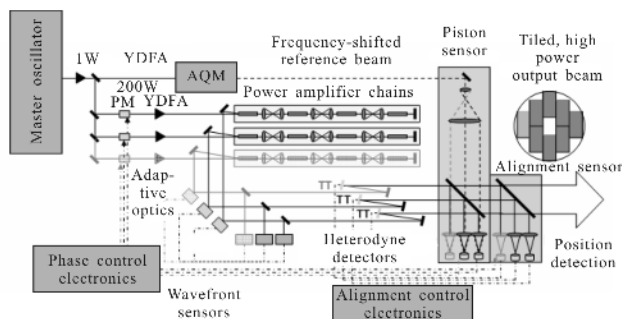


图1 相干合成固体激光器结构

Fig.1 Structure of the coherently combined solid-state laser system

该公司在JHPSSL计划阶段内取得的进展如表1所示,虽然诺格公司2009年利用7路全固态激光相干合成产生了105.5 kW的最高功率输出,其电光效率达到了19.3%,激光器从启动到最大功率输出不到0.6 s^[2]。但是从表1不难看出,随着合成激光数目的增多,其合成光束主瓣内的功率(第一衍射亮环直径内)占总功率的比例越来越少。对于105 kW激光的比例为11%,其效果与一台12 kW的单模固体激光器差不多。因此,其相干合成的效果并不理想,其优势也不明显。

表1 诺·格公司固体激光器项目进展

Tab.1 Project progress of solid-state laser project

Time	Chain	Power /kW	Beam quality	Power encircled in the main lobe
2005-09	2	19	1.73	33%
2007-12	1	15	1.58	40%
2008-07	2	30	2.15	22%
2009-03	7	105	<3	11%

如果需要获得更高功率的输出,就要增大合成路数,但这会增加光束控制系统的复杂性和相干技术的困难。

1.2 固体热容激光器

固体热容激光器(SSHCL)将固体激光器的激光发射与介质冷却过程分离,工作时将废热储存在工作介质内,停止工作后再对介质进行强制冷却。这种热管理方式优点是使介质的抽运功率受介质断裂极限限制较小,同时有效地避免了工作过程中介质冷却不均匀造成的各种热效应。SSHCL能够有效解决固体激光热管理问题,是实现固体激光高功率输出的技术途径之一^[3]。

2001年利弗莫尔国家实验室(LLNL)利用闪光灯泵浦9块长度为 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的钕玻璃片,激光输出为 13.5kW 。2005年,LLNL把激光介质更换为Nd:YAG陶瓷,平均功率输出为 $45\text{kW}^{[4]}$ 。但是在美国JHPSSL阶段的竞标中,LLNL的SSHCL被淘汰出局,与诺·格公司的Nd:YAG相干合成激光器相比,SSHCL在光束质量和运行时间上存在严重不足。

在这种情况下,LLNL认为SSHCL是以重频脉冲的形式进行工作,在输出相同的平均功率的情况下,即使较短的运行时间($<10\text{s}$)也能够实现很好的损伤效果。所以LLNL在美国能源部的支持下继续从事SSHCL的研究,在2006年取得了突破性进展,输出能量达到 $67\text{kW}^{[5]}$,光束质量没有测量,由于泵浦不均匀及热效应的影响,光束质量较差。

SSHCL采用了单孔径设计,功率定标通过增大介质的数量和板条面积来实现,避免了采用诺·格公司的Nd:YAG相干合成激光器设计需要解决的复杂相位控制,但SSHCL为了使激光器长时间高光束质量工作,采用了更换激光介质的方法,即把新介质放入激光腔内,使工作后的介质脱机冷却。而每次更换需要几分钟,在此期间不能输出激光。这无法与诺·格公司Nd:YAG激光器可持续工作几分钟相比。所以,对于SSHCL而言,将来要解决的主要技术问题在于使光束质量在较长的运行时间内保持不变。

1.3 薄片激光器

薄片激光器的主要优点是允许非常高的泵浦功率密度,但在晶体内不会有太高的温升。在纵向泵浦的平顶泵浦光束作用下,这种结构可以产生垂直于圆盘表面、几乎均匀的轴向一维热流,能减小热透镜效应,还可以有效去除增益介质的热沉积,在获得高功率激光输出,同时,保持高效率和高光束质量。

2008年6月,波音公司利用10块Yb:YAG薄片激光介质,在数秒的持续时间内,激光器的输出功率达到 27kW ,其结构如图2所示^[6]。出光过程中利用中继成像和相位校正技术来减少热效应导致的相差。

波音公司称其光束质量优良,可用于战术武器。通过近期实验,将多个薄片激光器集成到一个系统中,基于同样的结构和技术,激光器输出功率将达到 100kW 。同时,晶体薄片加工、晶体焊接存在的技术困难以及晶体变形等新的热效应问题都极大限制了薄片激光器高平均功率高光束质量输出。

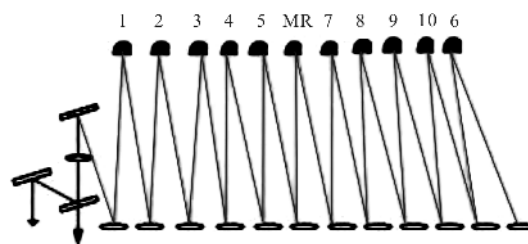


图2 10块Yb:YAG薄片的激光器结构图

Fig.2 Oscillator construction of ten Yb:YAG disks

1.4 陶瓷激光器

新型激光陶瓷是继单晶和玻璃之后又一种优秀的激光介质,它不仅具备良好的材料和光学特性,而且具有强大的制备优势,还可以实现多层、多功能的复合结构,为高性能固体激光器提供了前所未有的高性价比和便捷灵活的设计。

薄锯齿形结构可以有效缓解热管理问题,陶瓷Nd:YAG有更大的尺寸、较好的介质均匀性和较高的热力学特性。达信公司将薄锯齿形激光器光学结构与最新开发的陶瓷Nd:YAG材料相结合,成功研制了 1kW 、 5kW 和 15kW 的连续波陶瓷激光器,研制出 100kW 的(串联6个双板条组件)陶瓷激光器不存在难题^[7]。

LLNL的热容激光器就是采用 Sm^{3+} 包边Nd:YAG的复合结构实现了 200Hz 的 67kW 激光输出。 Sm^{3+} 掺杂包边的设计方案有效地抑制了自发辐射放大。

激光陶瓷具备良好的材料和光学特性,而且具有强大的制备优势,可以实现多层、多功能、大尺寸的制备,必将引领未来固体激光工程发展的革新性飞跃!

1.5 低温冷却激光器

Yb:YAG激光器在室温条件下能够高效率产生高平均功率输出,但准三能级系统和非线性热畸变限制了其功率和光束质量,而低温冷却激光介质的方式可以在实现输出高平均功率的同时保持高光束质量,是实现高能固体激光器的途径之一,特别适合应用在航天空间低温环境中。

2009年隶属于美国定向能协会的课题组选用放大器结构,利用 300W 的种子光,通过两组放大器(4个晶体)串接放大后获得了 2.3kW 、光光效率为 63% 、 M_2 为1.2左右的激光输出,如图3所示^[8]。这是迄今为止低温冷却激光器获得的最大功率。

低温冷却Yb:YAG激光器显示出了较好的实现

高平均功率和超高光束质量输出的能力,具有阈值低、光学畸变低、效率高等突出优点,而且能定标放大,是固体激光器减小热效应、提高光束质量的有效途径。但是其低温要求对冷却技术提出了很高的要求,且系统复杂,通常只能应用在特定的环境下。

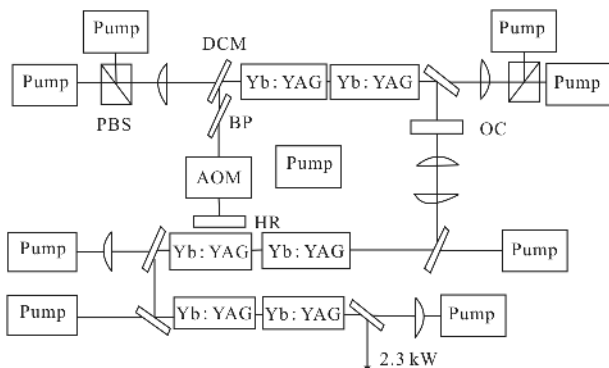


图 3 2.3 kW Yb:YAG 激光放大器结构图

Fig.3 Structure of the 2.3 kW Yb:YAG laser amplifier system

2 光纤激光

2.1 光纤激光器

光纤激光器与传统的激光器相比具有低阈值、高效率、全固化、结构紧凑等优点。源于半导体激光器泵浦技术和双包层光纤制作工艺的发展,近几年来,光纤激光器的输出功率有了明显的提高^[9]。美国 IPG 光子技术公司的多模连续光纤激光器输出功率可达 50 kW,电光转化效率高于 25%。

2.1.1 单模最大功率输出

2009 年 6 月 16 日,IPG 宣布成功研制新的 10 kW 单模光纤激光器,创造了生产用激光器的世界记录。这款激光器通过一根光纤实现 9.6 kW 的单模输出功率,电光效率超过 23%。

它采用一个主振-放大器结构,放大器是一个纤芯为 30 μm 、长 15 m 的掺 Yb 光纤,由 45 个波长为 1 018 nm、功率为 300 W 的光纤激光器泵浦,体积如一台冰箱,功率为 50 kW。利用 1 018 nm 激光器做泵浦光,不仅降低了输出 1 070 nm 激光器的热耗散,而且由于泵浦光优异的光束质量,降低了输出激光的发散角^[10]。

2.1.2 光纤激光器输出功率上限

2008 年美国 LLNL 的 Dawson 等人认为,按照目前的材料和条件,衍射极限连续光纤激光器或放大器的输出功率不会超过 36 kW。考虑各种物理因素,包

括热限制、非线性光学影响、输出端限制和泵浦功率(不包括多光束激光结构,如相干光耦合)等,并根据各种光纤激光参数的可测量值,提出了一些假设和近似,将石英作为激光材料,改变各种不同的参数,包括芯直径、光纤长度、光纤弯曲半径、泵浦波长、掺杂浓度等,对于宽带光纤激光器,输出衍射极限激光的功率上限为 36.6 kW,对于窄带宽光学激光器,输出上限则是 18.6 kW。随着技术的发展,这些数值会改变,如光纤对受激布里渊散射(SBS)的抑制作用^[11]。

由于非线性效应和热效应等的限制,单根光纤激光器的输出功率毕竟有限,将多个高功率光纤激光器的输出进行相干,则可以获得更高功率的激光输出。从相干的原理上来讲,相干可分为非相干合成和相干合成两种。

2.2 相干合成光纤激光器

光束相干合成有潜力将多个光纤激光器通路组合在一起,美国计划在 4 年内实现 2 kW 输出,8 年内实现 100 kW 输出。

2009 年美国空军实验室的研究人员将每路经过多次放大到 145 W,然后 5 路光纤激光采用多抖动法相干合成并束,实现了 725 W 的最高光纤激光器相干合成输出^[12]。

由于主动相位控制相干合成要求各路光束单频和线偏振的特性,而受限于 SBS 等因素的影响,单路单频光纤放大器的输出功率未超过 500 W,窄线宽(~ 10 GHz)光纤放大器最大功率为千瓦量级。因此,现在的技术水平将单频偏振光纤放大器作为合成模块,要达到高功率输出需要合成很多路激光,同样也会增加系统的复杂性。

2.3 非相干合成光纤激光器

光纤激光的非相干合成是将各个光纤激光的输出通过一些光学元件组合为一束,由于对合成的激光束的相位、谱宽和偏振态等没有任何要求,只需要把各光束控制指向指定的位置,其基本原理如图 4 所示。

2008 年,Sprangle 等对 IPG4 路 2 kW 的光纤激光进行了非相干合成实验,在中等强度的大气湍流环境中传输至 1.2 km 处,获得了高于 90% 的传输效率。同年,美国海军水面作战中心也利用 6 个 RCOS 公司商用的 20 inch(50.8 cm)口径望远镜发射 6 路 5.5 kW 光纤激光的非相干合成实验^[13]。

由于不需要控制各个光纤激光之间的相位,光束控制系统较简单,可以使总的激光功率提高,但相对于单根光纤激光来讲,变差较多。

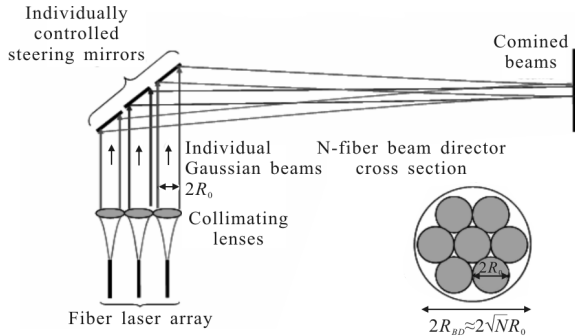


图4 光纤激光非相干合成系统结构图

Fig.4 Schematic of the incoherently combined laser system

2.4 光谱合成光纤激光器

除了相干和非相干合成以外,多光纤激光器输出的光谱合成也是增强光纤激光器功率、维持近衍射极限光束质量的有效方法。其原理是利用色散原件使不同入射方向的单元激光束在空间重叠。

2007年美国佛罗里达大学光电子学院的研究人员报道了利用PTR玻璃中的反射布拉格光栅(VBG),在波长1064 nm附近0.5 nm频谱间隔的5个随机偏振光纤激光器的频谱组合。系统的最大输出功率是773 W,相应的组合效率是91.7%。在高功率运行过程中VBG没有引入严重的光束失真。2008年底,Jena大学Limpert课题组实现了4路大功率光子晶体光纤谱合成,合成后的光束质量 $M^2 < 2$,功率超过2 kW。

光谱合成的技术难点在于耐高功率激光辐照的光栅色散原件的制作工艺。随着路数的增多,其合成效率也会随之下降。

3 半导体相干合成激光器

半导体激光器作为一种新型的激光光源具有高电光效率、体积小、质量轻、寿命长等优点。其相位可以由电流或电压直接控制,无需额外复杂的相位控制器件。因此,基于主动相位控制的半导体相干合成引起了研究人员的关注。原麦道公司于2000年实现了100路、400路和900路半导体放大器相干合成。900路的合成系统结构如图5所示,其总的输出功率为36 W^[14]。这种结构的特点是系统在初始化完成后,各路放大器相位在较长时间内都不会变化,从而简化了系统。

单管半导体激光在功率和光束质量等方面没有优势,但是可以通过大数目合成的方式来实现高平均功率输出,在军事和工业加工领域有广阔的应用前景。美国国防预先研究局近年来开展了多个半导体激光相干合成项目,以达到100 kW量级的高功率激光。

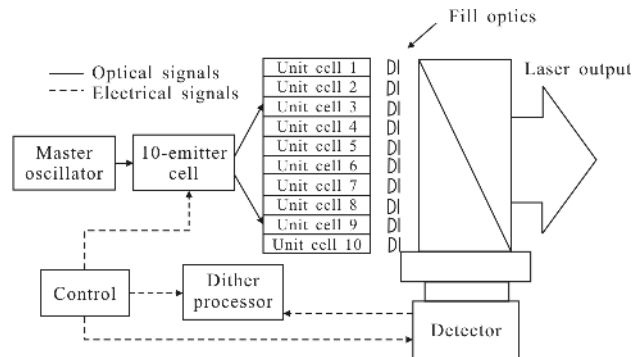


图5 900路半导体放大器相干合成实验结构图

Fig.5 Schematic of the coherently combined 900 array semiconductor laser amplifiers

4 高能液体激光器

高能液体激光器的工作原理是用LD抽运溶解有稀土离子的无氢液体,而液体介质的流动依靠由一个泵和一个热交换器组成的闭合回路循环系统完成。无机液体的流动循环可以实现对增益区被加热激光介质的快速更换,其冷却效率理论上高于表面冷却方式,是一种比较有效的热管理方法。

高能液体激光区域防卫系统(HELLADS)是由美国国防部高级研究计划局、通用原子公司及达信公司等共同开发的,技术指标为输出功率150 kW,质量功率比小于5 kg/kW^[15]。系统原计划采用液体激光器,但是由于液体激光器在高功率运行时,热效应严重,光束质量较差。现在通用公司的设计是利用固体薄片激光放大器浸在冷却液中(另一种液体激光器的概念),系统包括两套75 kW的激光器模块。而达信公司的设计将采用3套50 kW的板条放大器模块,板条也直接放在液体中冷却。HELLADS计划于2009年进行飞行打靶实验^[15]。但是,至今还未报道,可以看出:此系统还面临功率定标、武器化和集成的挑战。

5 自由电子激光器

自由电子激光器(FEL)能提供强烈的激光束,这些激光束可调至精确的波长。相对于传统的激光器,FEL能更精确地控制,从而产生高精度、强大功率的激光。

美国海军研究办公室(ONR)中期阶段目标是实现功率达 100 kW 的自由电子激光器。美国能源部杰斐逊实验室的研究表明:FEL 的效率已从 1% 提高到 10%。2006 年 10 月 FEL 在 1.6 μm 波长(人眼安全)产生了 14.2 kW 的激光输出,创造了可调波长激光器的新记录^[16]。

2009 年 6 月 9 日,雷声公司获得了 ONR 一份为期 12 个月的合同,将为美国海军初步设计一种 100kW 的自由电子激光器。该初步设计是 ONR 创新海军样机计划 3 个阶段中的第一步。

高平均功率 FEL 面临许多技术和工程上的严峻挑战,如提高电子束的亮度和质量,研制高磁场的振荡器,开发能耐受高功率的反射镜和整个系统小型化等问题。

6 碱金属激光器

半导体激光抽运碱金属蒸汽激光器(DPAL)可以提供高功率、高效率、近衍射极限的近红外连续激光输出,与半导体抽运固体激光器(DPSSL)相比,具有较突出的优越性:极高的量子效率、高的增益特性、气体介质具有小的折射率扰动、良好的热管理特性和好的性价比。

DPAL 组合半导体激光抽运和气体介质良好的热管理等优越性能有效地将发射带宽较宽、光束质量较差(M^2 因子接近 1 000)的高功率半导体激光转化为带宽仅为十分之几纳米、光束质量有极大提高的近红外激光,其光光转换效率可高达 50% 以上,激光输出功率有可能达到兆瓦量级。在最新的文献报道中,LLNL 获得 100 W 的激光输出是碱金属蒸汽激光器的最高功率输出。美国计划在 4 年内实现 4 kW 输出,8 年内实现 20 kW 输出。

但是 DPAL 的研究还仅仅处于起步阶段,要真正实现高功率的半导体激光抽运,对半导体激光器的中心波长和线宽要求比较苛刻,而且需要相当高的抽运功率。另外,对抽运耦合技术、金属蒸汽源的构造和蒸汽的冷凝、激光腔的设计等问题还需要进行详细的探讨。

7 CO₂ 激光器

CO₂ 激光器系统具有很多突出的优点,如无化学毒害和污染,制作简便,发射波长为 10.6 μm ,正处于大气窗口,可输出连续、脉冲高功率激光等,在激光加工、推进、化学、医学以及军用激光仪器中应用广泛,在高平均功率激光器的发展中占有极其重要的地位。高功率电能

CO₂ 激光器按照气体流动、放电、光轴方向的相互位置不同,可分为横向流动(TE)和轴向流动 CO₂ 激光器两大类,此外,还有采用了比对流冷却能输出功率更高且体积更小的扩散型冷却板条 CO₂ 激光器^[17]。

连续电能 CO₂ 激光器主要应用于工业加工领域。国外 TEA CO₂ 激光器最大输出功率达到了 30 kW;而具有较高电光效率的快速轴流 CO₂ 激光器在国外已发展得相当成熟,已形成 1~20 kW 系列产品;对于具有结构简单、光束质量高、无气体流动等优点的扩散冷却板条 CO₂ 激光器而言,自从 1992 年 Hall 等人首次报道了千瓦级输出的射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器以来^[18],在单通道波导基础上,为进一步提高激光输出功率和改善光束质量,研究者提出了折叠腔技术和波导阵列技术。现在德国 Rofin-Sinar 公司可以提供 1~5 kW 的商品化产品。

电能 TEA CO₂ 激光器容易实现高频率、高平均功率运行,所以,在激光推进、光电对抗中具有重要的地位,如今其平均功率可以达到 100 kW 的水平,美国的 PLVTS 是气体封闭循环的 TEA CO₂ 激光器,最大单脉冲输出能量 1 200 J,平均功率 10 kW,重复频率 1~30 Hz,脉宽 2.5~35 μs ,连续工作时间 20 s;而工作气体开放流动型的脉冲 CO₂ 激光器,由于不受风机及制冷设备的限制,可以得到更高的平均功率。2002 年,俄罗斯的 Rodin 报道了他们的开放流动型的脉冲 CO₂ 激光器,最大平均功率可达 100 kW^[19]。

电能 CO₂ 激光器相比于其他高功率激光器,波长较长,由于衍射效应,在长距离传输中光斑扩散较大。如果脉冲 CO₂ 激光器要达到可用于光推进的有关指标:(1) 平均功率大于 100 kW;(2) 单脉冲能量大于 1 kJ;(3) 重复频率高于 20 Hz;(4) 脉宽小于 50 μs ,实际中需要解决高脉冲和高频率放电技术、激光脉冲压缩技术、高功率激光谐振腔技术等很多问题。

8 结论与展望

目前,美国拥有庞大的高平均功率电能激光器研制计划,计划涵盖了固体、液体、自由电子、气体等各种激光器及基于固体和半导体、光纤激光相干和非相干合成激光器,各项计划正在如火如荼地进行,力求在保持高平均功率输出的同时,使高光束质量在较长的运行时间内保持不变。目前功率最高的是诺·格公司的利用固体激光相干合成输出的方案,但是其光束

质量也未达到计划要求,且合成输出效果并不理想。2010年美国国防部提出了“耐用电子激光器倡议”(RELI)。它包括通用原子航空电子公司、洛克希德·马丁公司、雷声公司和诺格公司4个方案。通用原子航空电子公司的计划是提高原来HELLADS项目中150kW激光器使用的分布倍增激光器的效率。洛克希德·马丁公司是将多束光纤激光合成一束强激光,将采用1kW光纤模块对25kW进行实验室验证。雷声公司将进行平面波导高能激光的开发,其本质上是一维光纤放大器,表面积大,有利于增加制冷能力和功率载荷并提高效率。而诺格公司计划采用基于光纤激光器相干合成,而不是JHPSSL所采用的板条激光器。

其他方案也具有自身的优点和应用的需求,如低温冷却激光器和热容激光器比较适合在空间环境实现高功率输出,自由电子激光具有波长可调的特性,低温冷却激光器和碱金属激光器的光光转换效率高。特别是光纤激光器具有光束质量好、热管理方便、体积小等优点,应当是下一代高平均功率、高光束质量电能激光器的主流发展方向。而可以实现高频率、高平均功率输出的CO₂激光器在激光推进中具有重要地位。为了达到高平均功率、高光束质量的要求,下一步会将各方案进行组合,发挥各自优势。所以这些技术及其在新领域中的应用都非常值得关注。

参考文献:

- [1] Sharon Weinberger. Defense Technology International: Solid-State Lasers; 100 Kilowatts or Bust; Rivals Vie To Develop Next Generation of Lasers[EB/OL]. http://www.textrondefense.com/news/in_the_news/05_22_06.htm, 2007-02-22.
- [2] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined slab MOPAs [C]//Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, CLEO/QELS 2009. Conference on, 2009: 1-2.
- [3] Wang Chao, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun, et al. Experimental investigation on 8.7 kW laser-diode pumped solid state heat capacity laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 77-78. (in Chinese)
王超,周寿桓,唐晓军,等. LD泵浦8.7kW固体热容激光器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 77-78.
- [4] Paul Rincon. Record power for military laser[EB/OL].<http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/6380789.stm>, 2006-05-22.
- [5] Yamamoto R M, Bhachu B S, Cutter K P, et al. The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid state laser [C]//ASSP, 2008.
- [6] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S. Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD), 2009: CThA2.
- [7] Hecht J. Photonic frontier: laser weapons-pumping up the power [J]. *Laser Focus World*, 2007, 43(5): 18-21.
- [8] Brasseur J K, Abeeluck A K, Awtry A R, et al. 2.3 kW cryogenically cooled Yb:YAG laser [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD), 2009: CThR1.
- [9] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 230-232. (in Chinese)
楼祺洪,周军,朱健强,等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 230-232.
- [10] Richardson P J, Nisson J, Clarkson W A. High power fiber laser: current status and future perspectives[J]. *J Opt Soc Am B*, 27(11): B63- B91.
- [11] 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[J]. *Optics Express*, 16(17): 13241-13266.
- [12] Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, et al. High power phase locking of a fiber amplifier array[C]//SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [13] Sprangle P, Penano J, Hafizi B, et al. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy applications [EB/OL].<http://www.stormmedia.us/25/2542/A25425.html>, 2009-12-09.
- [14] Levy J L, Roh K. Coherent array of 900 semiconductor laser amplifiers[C]//SPIE, 1995, 2382: 58-69.
- [15] Wilmington M A. Textron defense systems awarded funding for the DARPA HELLADS Program [EB/OL]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hellads.htm>, 2008-10-03.
- [16] William S Jr, Defense science board Washington DC. Defense science board task force on Directed energy weapons [R]. Office of the Under Secretary of Defense, 2007.
- [17] Li Zhiming, Xin Jianguo. Power output characteristic of RF excited all metal slab waveguide CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 230-232. (in Chinese)
李志明,辛建国. 射频激励金属板条波导CO₂激光器的功率输出特性[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 230-232.
- [18] Colley D, Baker H J, Hall D R. Planar waveguide, 1 kW CW, carbon dioxide laser excited by a single transverse RF discharge[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(2): 136-1387.
- [19] Rodin A V, Nanmov V G, Nastoyashchii A F, et al. High-energy pulsed repetitive-laser for lightcraft experiments [C]// Beamed Energy Propulsion: First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2003, 664: 612-619.