

高能激光技术进展与面临的挑战

苏毅[†]

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 文章分析和比较了几种高能激光器技术发展现状和面临的挑战,以及各自可能适用的范围.特别对二极管抽运固体激光器和光纤激光器的几种束相干合成方法和光束质量评价方法进行了分析和讨论.二极管抽运固体激光器和光纤激光器近十年来异军突起,被人们看作是继化学激光器后的第二代高能激光器.光纤激光器进展要比二极管抽运固体激光器滞后5到10年.对几十万瓦以上的激光器来说,在相当长的时间内仍然要靠化学激光器.

关键词 高能激光,相位测量,光束相干合成,光束质量

New challenges for high energy laser technology

SU Yi[†]

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Recent developments in high energy laser technology and new challenges that have arisen are analyzed. Possible applications for these lasers are reviewed. In particular, the technique of coherent beam combination for diode-pumped solid-state and fiber lasers is discussed, and various beam quality evaluation methods are compared. These lasers have witnessed significant progress in the last decade, and are considered to be the next generation of high energy lasers following chemical lasers. However, fiber laser lags behind solid-state laser technology by five to ten years. Chemical lasers will still be the mainstay for output powers in the hundred kilowatt range for a long time to come.

Keywords high energy laser, phase measurements, coherent beam combination, beam quality

1 引言

自1960年梅曼发明世界上第一台红宝石激光器以来,激光技术获得了突飞猛进的发展,在工业、医疗、信息科学、生物技术和军事上得到广泛应用.激光器发明之初,人们就把它与一个古老的概念“死光”联系起来.用光作为武器,早就出现在中外古老神话中.《封神演义》中有哼哈二将郑伦、陈奇和散仙陆压使用光武器的描述.古希腊科学家阿基米德是最先设想用光作为武器的人.在科学幻想小说中更有火星人用“看不见的热剑”攻击地球上的人类的描写.由于没有高能相干光源,古人对光武器仅是幻想和趣谈.只有在激光问世之后,光武器才有了科

学基础,并随著相关技术的发展,使光武器成为可能.

高能激光是指平均功率大于1千瓦,持续时间达数秒,激光能量在数万焦耳以上.一般认为,高能激光武器用激光器输出功率的最低要求是10千瓦.

美国和前苏联早在上世纪60年代就开展了激光武器的研究.激光器发明后仅仅3年,美国国防部就组织召开了激光技术会议,研究激光技术的发展和潜在的军事应用.此后开展了一系列的激光武器研究和试验项目^[1].首先研制出了数10千瓦的二氧化碳气动激光器,并装在飞机上进行打飞行导弹试验.建成兆瓦级中红外氟化氙激光器(简称MIR-

2010-09-16 收到

[†] Email: suyi@caep.ac.cn

ACL)和氟化氢激光器(简称 Alpha),后者原准备用于天基激光武器.美国和以色列合作研制出数十万瓦氟化氙车载战术高能激光武器 THEL.最大的激光武器研制项目是美国用兆瓦级氧碘化学激光的机载激光武器(ABL),2010年初已进行了飞行试验,摧毁了80km外飞行的助推段弹道导弹^[2].基于数万瓦氧碘化学激光的机载先进战术激光武器,进行了飞行中对地面目标打靶试验.近年来,二极管抽运固体激光器和光纤激光器取得重大进展,特别是在“联合高功率固体激光器(JHPSSL)”计划支持下,二极管抽运固体激光器已超过10万瓦,正进行激光器与跟踪瞄准发射系统的集成,准备开展外场试验.此外,美国正在实施的战术应用的激光武器研究计划还有“高能激光技术演示器(HEL-TD)”、“高能液体激光区域防御系统(HELLADS)”、“海上激光演示系统(MLD)”、“大型飞机电力激光器(ELLA)”等.

从国外激光武器技术的发展可以看出,高能激光器的输出激光波长逐步从长波长向短波长发展.高能激光器最初是长波红外的二氧化碳激光器,随后是中波红外的氟化氙/氟化氢激光器,现在是短波红外的氧碘化学激光器和二极管抽运固体激光器.这是由于光波的衍射极限发散角与波长成正比,波长越短,聚焦远场光斑越小,光斑能量密度越高.

虽然经过几十年的努力,高能激光器及其武器技术取得了长足的进步,毁伤能力也得到试验验证,但高能激光至今仍未成为实战化的武器,主要是激光系统过于庞大,在后勤保障和环境适应性等方面都达不到实战化水平.

本文分析比较几种高能激光器技术发展现状和面临的挑战,以及各自可能适用的范围.特别对二极管抽运固体激光器和光纤激光器的几种束相干合成方案和光束质量评价方法进行分析和讨论.

2 几种高能激光器的比较

对武器用高能激光器的主要要求,首先是波长、功率和光束质量,还有工程化和实战化要求,如小型化以及能源和后勤保障的可承受性,环境的适应性,并应适合于多种作战平台.氧碘化学激光器(COIL)、二极管抽运固体激光器(DPSSL)、光纤激光器和自由电子激光器(FEL)的波长都为 $\sim 1\mu\text{m}$,适合高能激光武器应用.自由电子激光器可产生 $1.61\mu\text{m}$ 激光,并且波长在较大范围内可调,更适合

用作海面激光武器.

氧碘化学激光器是现在唯一达到MW级的短波长激光器.美国机载激光武器的MW级氧碘化学激光器光束质量接近衍射极限,可以满足武器要求.由于化学激光器是利用原料化学反应的化学能产生激光,不需要大功率电源,只需要为控制、真空和原料循环系统提供电源,能源不是问题.COIL激光器的激光介质是流动气体,运行中产生的热量随废气排放而被带走,系统的热管理相对简单.COIL激光器的最大问题是需要大量的化学原料,要有复杂的原料储备和转注等后勤保障系统,原料的准备问题限制了激光器的出光时间,再加上需要很大的排除废气的压力恢复系统,使整个激光器系统变得庞大.比如ABL约1MW的COIL激光器的质量接近80吨,功率质量比 $\sim 80\text{kg/kW}$,对于武器应用,需要进一步减轻重量.因此COIL激光器面临的主要问题是使系统轻量化、小型化,比如尽量用塑料代替钢材,简化碘蒸汽/碘原子和单态氧($\text{O}_2(^1\Delta)$)的制备工艺.采用低温吸附压力恢复系统可以减小体积和质量,并且不直接向外部排除废气,避免了污染、噪声和振动影响.美国先进战术激光武器装在C-130H运输机上的COIL激光器即采用密封式低温吸附压力恢复系统.但是,低温吸附压力恢复系统通常只适用于数十万瓦以下的激光器,功率再高会使低温维持和制冷剂用量达到不能承受的水平.

二极管抽运固体激光器在输出功率和光束质量上取得突破.在“联合高功率固体激光器(JHPSSL)”计划支持下,诺斯罗普·格鲁曼公司采用MOPA结构的板条激光器,经7路放大器链的输出光束相干合成,合成功率已超过100kW,光束质量为3倍衍射极限,可连续出光5min.也是在该计划的支持下,达信防务系统公司采用薄之字形(ThinZag)激光器专利技术,激光介质是Nd:YAG陶瓷板条.在激光器的设计中,光学谐振腔内串接6个板条,激光沿之字形光路通过各板条,每个板条模块可输出17kW,谐振腔输出达到100kW.在国防高级研究计划局(DARPA)的“高能液体激光区域防御系统”项目支持下,通用原子公司正在研制薄片激光放大器模块.薄片浸在冷却液中(因而保留了最初项目名称中的“液体激光”),一个模块输出75kW,在一个谐振腔内插入2个模块,预计输出达到150kW.DARPA对该系统的小型化提出非常苛刻的要求,激光器的质量限定在750kg内,质量功率比只有 5kg/kW ,计划在2012年建成并进行地面试验.从目前情况看,这项计划难以按时完成,特别是质

量功率比的要求很难达到。

光纤激光器由于其高效、小型、稳定和热管理较容易,越来越受到人们的重视.有相当多的研究机构和公司在进行光纤激光器的研究,但大多都是针对工业加工应用.已有 IPG 公司研制出 10kW 单模光纤激光器的报道,但进一步提高功率非常困难,保偏性和相位噪声也达不到用于多路光束相干合成的要求.诺斯罗普·格鲁曼公司在 DARPA“光纤激光器革命(RIFL)”计划合同下,已完成第一阶段指标,可用于光束相干合成为目标,研制出 1kW 单模光纤放大器,光束质量为 1.2 倍衍射极限,电光效率 30%,偏振消光系数为 50:1,只有极低的相位噪声,满足多路光束相干合成要求.该公司正在进行实现第二阶段目标的研究,即在其他指标不变的条件下,将激光功率提高到 3kW.以后再通过多个光纤放大器的光束相干合成,实现该计划最终目标 100kW 激光输出.

二极管抽运固体激光器和光纤激光器虽然相对化学激光器有明显的优点,但随功率的提高系统会变得愈来愈复杂和庞大,特别是抽运驱动电源和热管理系统在体积和重量上占激光器的主要部分,而又难以小型化.对几十万瓦以上的激光器来说,在相当长的时间内仍然要靠化学激光器.

自由电子激光器研究方面,美国杰菲逊实验室已产生波长 $1.61\mu\text{m}$,功率 14.2kW 的自由电子激光.美国海军和国防部分别与波音公司、雷声公司签订了自由电子激光武器研制合同,要求激光器输出功率达到 100kW.自由电子激光的波长范围和可调谐能力是其他激光器做不到的.由于其波长可处于海面水蒸汽的高透过率窗口并可调,可适应多种海面大气条件,所以自由电子激光最适合海面应用,在其他应用上还难以与化学激光器和固体激光器竞争.

3 激光束相干合成技术

单路二极管抽运固体激光器和光纤激光器,由于激光介质和光学器件的功率负载能力的限制,在高功率下的非线性效应和热效应,使其输出功率有限.为满足军事应用对高能激光的要求,需要把多束激光相干合成为一束光,获得高功率、高光束质量激光束.要实现光束的相干合成就要使各光束的相位一致.如对多路 MOPA 激光器输出光束进行相干合成时,一个主振荡激光器(MO)分光输入到多路

激光功率放大器(PA),对每路激光实施相位控制,使各路输出激光束(称为子光束)的相位一致,再把各子光束像马赛克一样拼接在一起,经聚焦系统聚焦在焦平面上产生相干合成焦斑.相位控制量是由测量各放大器输出光束间的相位差信息得到,转换为电信号来控制放大器前的相位调制器,通过反馈闭环控制使所有光束相位一致.除了主动相位控制实现光束相干合成,人们正在探索被动相干合成方法.诺斯罗普·格鲁曼公司用衍射光学元件实现了低功率光束的相干合成.

要得到好的相干合成效果,首先要做好各路子光束的工作,子光束应满足以下几点要求:

(1)各路子光束的光束质量应优于对总输出光束质量的要求,近场光强分布应均匀.合成束的光束质量不可能高于子光束,子光束的波面畸变会严重影响合成效果.这就对各子光束应用自适应光学技术进行闭环校正,以得到高光束质量.诺斯罗普·格鲁曼公司 15kW 的单路放大器链输出光束质量达到 1.5 倍衍射极限(DL),7 路放大链相干合成获得 100kW 输出,但光束质量仅为 3DL,还没能达到合同要求的 2DL.

(2)各路子光束应有高偏振消光比及其高稳定性,应是窄带线偏振光,并且各路子光束偏振态一致,要使主振荡器、分光光路和功率放大器保偏.这就是诺斯罗普·格鲁曼公司使单路放大器输出光束的偏振消光系数要做到 50:1 的原因.

(3)各路子光束应有低的相位噪声及其高稳定性,才能保证相位测量和闭环控制的效果,否则会对测量和控制的动态范围和闭环带宽提出难以实现的要求,产生较大的相位校正残差.

光束相干合成要对各光束相位闭环控制,由于相位调制器是较成熟的器件,所以研究的主要问题是如何获得相位调制器的控制量.一类方法是如上所述,即测量子光束间相位差得出使相位差为零的各路调制器的控制量.现在较成熟的相位测量方法是外差法^[3]和 RF 射频标记法^[4].另一类方法是直接用远场光斑的最佳化作为获得控制量的选择判据,不需要进行相位测量.首先对各相位调制器施加随机扰动电压,由远场光斑变化经计算机产生新的扰动量,直到获得最佳远场光斑.与原有的爬山法不同之处在于采用新的远场评价函数和高速随机并行梯度下降算法(SPGD),简化了电子学系统,关键在于算法的快速收敛.

外差法测量相位原理如图 1 所示.主振荡器输

出分光后进入功率放大器,单独有一路作为参考光束,用移频器(FS)将其作一射频范围的频移 $\Delta\omega$. 通过相位测量系统,各路子光束分光后分别通过透镜聚焦到光电探测器上,与参考光重叠产生频率为 $\Delta\omega$ 的拍频光,各光电探测器分别测量出各路拍频信号. 用参考光移频器的驱动电源信号作为参考信号,提取出拍频信号与参考信号的相位差,转换为电压作为放大器前相位调制器的控制信号,形成对各子光束相位的闭环控制,使所有子光束相位一致.

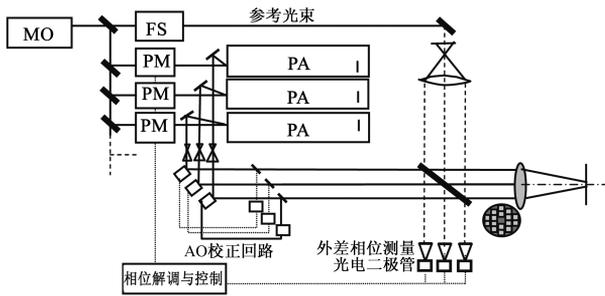


图1 外差法光束相干合成示意图(图中MO为主振荡器,PA为功率放大器,PM为相位调制器,AO为自适应光学,FS为移频器)

外差法需要单独的参考光束,分别测量各子光束的拍频信号,要用与子光束相同数量的光电探测器. 在要合成的子光束非常多时,系统变得复杂而不适用. 一种叫做射频标记法的相位测量方法可以克服外差法的这些缺点.

射频相位调制标记法原理如图2所示. 不用单独的参考光束,而是用合成子光束中的一路作为参考光束,因此也称为自参考相位锁定. 在各放大器前的相位调制器上加不同频率的射频源进行相位调制,参考光束不加射频相位调制. 各子光束通过分束镜分光后,用一块透镜把所有子光束聚焦并叠加到一个探测器上. 探测器测量到的光信号是各子光束与参考束以及子光束间相干结果的叠加. 由于已对各子光束做了射频相位调制的标记,就可以采用锁相放大器等电子学方法提取出各子光束与参考光的相位差,从而为相位调制器提供控制信号. 射频标记法简化了相位探测光路,仅用一个光电探测器,是用电子学方法检出各路光的相位差. 外差法是用机械方法分离各子光束光路,子光束间距不能太小,限制了束合成的填充因子. 从一定意义上可以说,射频标记法把光学的困难转交给了电子学. 由于射频标记法在相位探测光路中只用一个聚焦镜和一个探测器,因而对较多的子光束合成来说,射频标记法相对外差法更有优势.

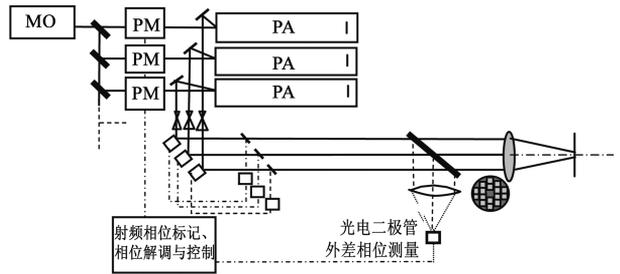


图2 射频相位调制标记法原理图

4 关于光束质量评价方法的比较

有多种激光光束质量评价方法,针对不同的光束种类和应用目的,对光束质量评价方法有光束质量因子 β 、斯特列尔比 SR 、 M^2 因子、环围功率比 BQ 等,所有方法都是以理想光束为评价标准. 在能激光的军事应用中,人们最关心的是打到靶上的激光功率密度,即在有效损伤尺度内的功率.

斯特列尔比 SR 定义为实际光束焦斑峰值功率与理想光束焦斑峰值功率之比,它比较直观地反映了激光在远场的峰值强度,不能说明光斑主瓣所占能量,而且未考虑整体倾斜的影响. M^2 因子能较好地反映光束质量的实质,但只适合高斯光束质量的评价. 光束质量因子 β 定义为测量的实际光束的远场发散角与同样尺度的理想光束的远场发散角之比. 实际光束的远场发散角是指焦斑中一个环围的角半径,其环围内功率与总功率之比等于理想光束焦斑半径内的环围功率比(即理想光束衍射极限角内环围功率占总功率的份额). 这是一个非常直观的量,对已知功率和口径的激光束,测出光束质量因子 β ,很容易计算焦斑尺度和功率密度. 环围功率比 BQ 是理想光束的环围功率比与实际光束焦斑在理想衍射角内的环围功率比相比较得到的量. 环围功率比与 β 因子的区别在于: β 因子是先定出功率百分比再测量其相应半径,并与理想光束比较后得出的;环围功率比则是先定出角半径,再测量其中功率百分比,与理想光束比较后得到的. 在 BQ 实际测量中,光斑半径的选取是个固定值,可用一个小孔遮拦光束,测量小孔后的激光功率即可得出 BQ 值;而在 β 因子的测量中,一定功率比下的焦斑半径会产生较大的误差. 由于实际光束的焦斑半径总要大于理想光束的光斑半径, BQ 测量的环围尺度要小于功率比 β 因子测量的环围尺度,所以对较小尺度的靶,更适合用 BQ 计算靶上功率密度.

在能激光的军事应用中,采用卡塞格林光学

系统发射激光,要求激光是环形束.高能激光器就要采用非稳腔,或者在光束相干合成时采用拼接法拼出环形束.在环形光束的光束质量测量中,往往是以有相同遮拦比的理想环形束作为评价标准.遮拦比严重影响焦斑主瓣能量,遮拦比越大,主瓣能量越少.对不同遮拦比的环形束给出同样光束质量时,实际的聚焦能力是不同的.这样的光束质量只表明系统的技术水平,不能反映系统的打靶能力.需要用一个与遮拦比无关的评价标准,如果都用理想实心束作为评价标准,给出环形束光束质量,就可以很方便地比较系统的打靶能力.这样,对于光束合成的子光束和合成束,就可应用一样的光束质量判据.从实用的角度出发,采用以理想实心束作为评价标准的光束质量因子 β 比较适合.

5 结束语

高能激光技术取得突破性进展.氧碘化学激光器已达到 MW 级,面临的主要挑战是如何使系统轻量化、小型化以及简化对后勤保障的要求.二极管抽运固体激光器和光纤激光器近十年来异军突起,被人们看作是继化学激光器后的第二代高能激光器.

但对几十千瓦以上的激光器来说,在相当长的时间内仍然要靠化学激光器.二极管抽运固体激光器经光束相干合成已达到 100kW,但仍然需要解决合成束光束质量退化、热管理和电源问题.光纤激光器已研制出 10kW 单模光纤激光器,但可用于光束相干合成的单模光纤放大器只有 1kW,正在研究把其功率提高到 3kW.光纤激光器进展仍然比二极管抽运固体激光器滞后 5 到 10 年.100kW 级的二极管抽运固体激光器和光纤激光器需要走光束合成的道路.为此,首先要做好单路激光放大器的工作,每路子光束都要实现高光束质量,窄带线偏振,高偏振消光比及其高稳定性,低的相位噪声及其高稳定性,才能用于实现光束相干合成.

参考文献

- [1] Schneider W. Jr. Defense science board task force on directed energy weapon systems and technology applications [R]. Washington DC, 2007, 5—32
- [2] Wartishak M. Airborne laser set for second antimissile test tonight. <http://www.globalsecuritynewswire.org/gsn/nw-20100817-8021.php>
- [3] Marmo J, Injeyan H *et al.* Proc. of SPIE, 2009, 7195: 1—6
- [4] Shay T M, Benham V *et al.* Proc. of SPIE, 2006, 6102: 1—5