

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0617-06

二极管抽运固体激光器迈向 100kW

任国光, 黄裕年

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 美国各军种已联合演示验证了平均输出功率超过 25kW 的固体激光器, 并将在 2008 年研制出用于战术战场的 100kW 激光器。概述了 25kW 和 100kW SSL 的技术指标, 评论和分析了 Nd YAG, SSHCL 以及 Yb YAG 激光器的技术特点与结构, 讨论了 SSHCL 和 Yb YAG 激光器存在的问题以及研制 100kW Nd YAG 激光器面临的挑战。然后介绍了 100kW 级高能激光技术演示器计划, 最后给出了几点看法。

关键词: 战术激光武器; Nd YAG 激光器; 固体热容激光器; Yb YAG 激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Diode Pumped Solid-State Laser Stride Forward 100kW

REN Guo-guang, HUANG Yu-nian

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: U. S. all services have demonstrated jointly a solid-state laser with the average output power of greater than 25kW and will development 100kW laser for the tactical field by 2008. The technology characteristics of 25kW and 100kW SSL are outlined. The technology features and architectures of Nd YAG, SSHCL and Yb YAG laser are reviewed and analyzed. The problems of SSHCL and Yb YAG laser and the challenges of developing 100kW Nd YAG laser are discussed. Subsequently, the program of a 100 kilowatt-class High Energy Laser Technology Demonstrator is described. Finally, the several views are presented.

Key words: tactical laser weapon; Nd YAG laser; SSHCL; Yb YAG laser

1 引言

高功率二极管抽运固体激光器有许多独特的优点, 特别适合用作机动战术激光武器的光源。为了加速固体激光器 (SSL) 用于战场, 美国国防部高能激光联合技术办公室 (HEL - JTO) 集中了各军种和一些军事机构的人力和财力, 于 2002 年 9 月开始实施“联合高功率固体激光器”(JHPSSL) 计划, 其目的是在 2007 年 (现推迟到 2008 年) 演示验证平均功率 100kW 的 SSL。为了在战术作战有意义的 10km 射程内对目标造成硬破坏, 至少需要 100kW 功率的 SSL。

这项由陆军空间与导弹防御司令部、空军研究实验室、国防部 HEL - JTO 和海军研究办公室联合

投资一亿多美元的计划, 是要发展一种具有高束质的小型、轻量、高平均功率、高脉冲能量的 SSL。用于执行地面短程防空和反导任务、军舰自卫 (反巡航导弹) 和机载平台的精确打击任务。因为高功率激光器小型化的难度大, 所以初期的应用可能集中在地面战车、舰船和大型飞机, 随着激光器装置的缩小, SSL 将装备喷气战斗机和无人机。

JHPSSL 计划分三个阶段。第一阶段 14 个月, 由海军管理。将探索降低同时获得高功率和高束质激光所需技术的风险, 通过开展建模和模拟、分析、

作者简介: 任国光 (1938 -), 男, 研究员, 主要从事激光技术发展战略研究。

收稿日期: 2006-04-18

设计以及进行实验等一系列的工作,探寻降低风险的途径和技术,为建立大功率运行机制打下扎实的技术基础。第二阶段 12 个月(延长了 12 个月),由空军管理。将利用这些技术研制平均输出功率 25kW 的 SSL,而且支持这种激光器的技术和体系结构应能定标放大到 100kW。第三阶段 36 个月(到 2008 年),由陆军管理。目标是将 25kW SSL 定标放大到 100kW,并能最终集成进作战平台。

到 2005 年底,第一和第二阶段的工作已经结束,4 种不同的技术和方案经过激烈的竞争,最终诺·格公司的 Nd YAG 激光器和达信公司的陶瓷型 Nd YAG 激光器胜出,分别获得 5670 万和 1000 万美元合同,从 2006 年开始研制 100kW SSL,期限 3 年^[1]。达信公司还有 3 个选择,如果实施的话将使合同金额增至 3000 万美元。

为了演示验证一些与作战有关的技术问题,陆军空间与导弹防御司令部计划实施一项 100kW 级高能激光技术演示计划,目的是要在 2013 年底前演示高能激光器与各种目标交战,并将其摧毁的能力。陆军打算最晚在 2009 年初从计划第三阶段的两个候选者中,选出一种 SSL 作为演示计划的激光器。

本文只讨论参加了第一和第二阶段工作的 Nd YAG 激光器、固体热容激光器 (SSHCL) 和 Yb YAG 激光器,对于高功率陶瓷激光器,我们将在另一篇文章中专门讨论。

2 JHPSSL 计划第二和第三阶段的主要技术指标

在 JHPSSL 计划的第一、第二阶段中,采用了多种技术和方案开发 25kW SSL,最后将选出两个优胜者进入第三阶段。最初参加竞争的包括陆军与能源部利弗莫尔国家实验室合作研制的 SSHCL,空军(包括海军和海军陆战队)与诺·格公司和雷声公司合作分别研制 Nd YAG 和 Yb YAG 激光器^[2],原计划在 2004 年底演示和鉴定 25kW 的激光器,表 1 给出了主要的技术指标。最主要的鉴定指标是输出功率、光束质量和工作时间,其中特别强调了光束质量。因为激光器的武器应用需要在远场产生高的功率密度,所以光束必须能聚集成小的光斑或必须以最小的发散传输较远的距离,可以说没有好的光束质量就作不成激光武器。在高平均功率系统中,由热引起的光学畸变特别严重。包括热透镜,由热引起的双折射和消偏振,因此对 SSL 的功率定标来说,

热管理就成为最关键的问题。

由于三个承包商研制的 25kW SSL 到期未达标,所以演示鉴定工作推迟到 2005 年底。其间达信公司的陶瓷型 Nd YAG 激光器异军突起,在 2005 年 5 月成为第 4 个竞争者,获得 500 万美元合同,开发 15kW 陶瓷型 Nd YAG 激光器。达信公司采用完全不同的技术在 2005 年 10 月研制出了平均功率输出 5kW 的陶瓷型 Nd YAG 激光器,持续工作时间为 10s^[3]。陶瓷激光器被认为是 SSL 的一次真正的革命,它具有单晶激光器的性能,但却像制造玻璃那样容易。达信公司的激光器系统连续超越了几个技术里程碑,同时又保持了紧凑、成本低和可定标的特性,特别适合用于战斗机^[4]。达信公司将与诺·格公司各研制一台新的 100kW 激光器,3 年后将选出一种激光器用作各军种通用的 100kW 激光武器的光源,或者这两种技术都继续发展,用于不同的目的。表 2 给出了 JHPSSL 计划 100kW SSL 的主要技术指标,比较表 1 与表 2 可以看出,除运行时间和启动时间外,平均输出功率、光束质量、总效率和比重量都有明显的提高。

表 1 25kW 固体激光器的主要技术指标

输出功率 $\geq 25\text{kW}$	光束质量 $< 1.5 \times \text{DL}$
系统插头效率 $> 10\%$	启动时间: 1s
工作时间 $\geq 300\text{s}$	光束抖动 $< 5\%$ 远场瞬时束直径
平均输出功率/质量比: 20W/kg	环境温度: $5 \sim 35^\circ\text{C}$ (工作), $-20^\circ \sim -40^\circ$ (储存)

表 2 100kW 固体激光器的主要技术指标

平均输出功率 $> 100\text{kW}$	光束质量 $= 1.2 \times \text{DL}$
总效率 $> 20\%$	运行时间: 300s
启动时间: 1s	比重量: 50W/kg

3 大功率 Nd YAG 激光器

3.1 诺·格公司 25kW SSL 的技术特点和结构

诺·格公司的 SSL 采用了一般二极管抽运 Nd YAG 板条激光器的方案,中、低功率的这种激光器,技术已经很成熟。为了在单束线中提取较高能量的脉冲,它采用了大板条。他们利用自己开发的高温扩散连接法将几个板条连接在一起,所得大板条材料的光学特性与单板条相同。激光器采用主动和被动冷却方式,器件内部是水冷,外部利用通过吊

舱的空气冷却。另外吊舱内还采用了类似蜡的物质,它吸收了来自激光器的热量而变成液体。这样的冷却方式,使激光器能持续长时间的工作,而不像 SSHCL 那样受热管理的限制只能间隙地工作。

诺·格公司的设计采用了主控振荡器-功率放大器(MOPA)结构(如图1),它采用单个主振荡器抽运并联的功率放大器,每个功率放大器链路包括串联4个二极管抽运的之字形Nd:YAG板条,能产生12.5kW平均功率。对之字形板条来说,由于在激光介质中心面上的热分布是对称的,所以激光介质表面的平均热应力为零;同时由于激光在介质中走的是之字形光路,所以在波阵面上每一点所经受的温度梯度都相同。另外,较长的曲折光路均化了输入抽运的不均匀性,这些都有助于减小光学畸变。

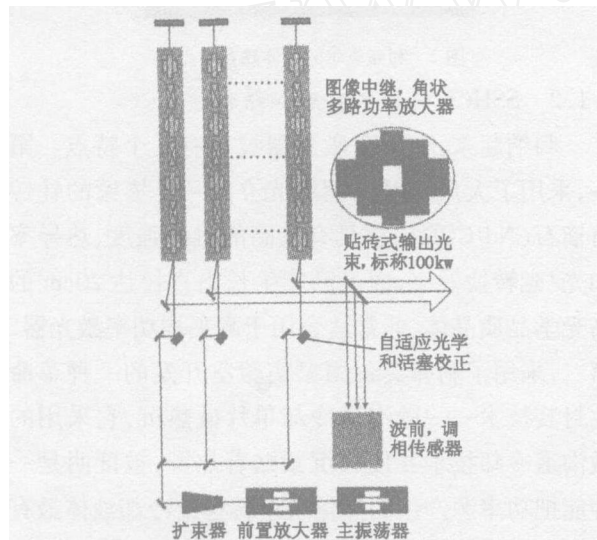


图1 诺·格公司 Nd:YAG 激光器的体系结构示意图

为了实现第二阶段平均功率 25kW 的目标,它采用两个放大链路并联工作,再把它们的输出送进两个相邻的孔径。通过诺·格公司具有专利权的光束合成技术,对每个放大链路进行定相,将两束光相干合成为一束光。他们在每个输出孔径处,利用自适应光学对每个放大链路调整主振荡器的输入相位,以保持所有放大链路的输出同相,从而获得高的输出功率^[5]。因此诺·格公司的激光器属于利用光束合成的多孔径激光器。

3.2 诺·格公司取得的成就

2005年11月,诺·格公司研制的 Nd:YAG 激光器获得了超过 27kW 的平均输出功率,运行时间达到 350s^[6],这已超过了 JHPSSL 计划第二阶段对功率和运行时间提出的要求,并获得了好的光束质

量。激光器在输出功率 19kW 时,达到 2 倍衍射极限的光束质量,这说明光束能聚焦到目标上。这些成就使诺·格公司的激光器成为迄今演示的最亮,运行时间最长的 SSL。同时也证明了诺·格激光器的结构可以定标放大到 100kW 的功率。

从演示试验的结果来看,诺·格公司的 SSL 并未实现另一项重要的指标,即光束质量 $M^2 = 1.5 \times DL$ 。在诺·格公司以往开发的高功率 SSL 系统中,采用了先进的相位共轭技术,利用受激布里渊散射池校正系统中的光学畸变,同时具有高的反射率和仿真度,早在 1988 年他们就演示了 1.25 倍衍射极限的 1kW 激光器,紧接着又演示了 1.5 倍衍射极限的 3kW 激光器。这次 JHPSSL 计划把光束质量作为重点考核指标,结果所有的竞争者竟都未达标。这充分说明在提高输出功率的同时要保持高的光束质量难度很大,但这又是开发激光武器必须要迈过的坎。

3.3 开发 100kW Nd:YAG 激光器的途径及其面临的挑战

诺·格公司设计的激光器采用了可定标放大的结构,主要通过增加并联放大链路定标放大功率。在第二阶段演示的 27kW SSL 中,并联了两个放大链路,对于 100kW 的激光器,他们将并联 8 个放大链路,每个链路由 4 个串联的二极管抽运 Nd:YAG 板条组成,然后相干合成 8 个放大链路的输出光束。为了避免产生新的物理和定标问题,每个放大链路都类似于在 27kW 激光器中采用过的放大链路。

从理论上讲,SSL 要达到 100kW 应该不成问题,因为从单晶有效口径可获得的最大光强是饱和光强,它由 $I_{sat} = h / \tau$ 给出,这里 τ 是激发寿命时间, h 是截面。对 Nd:YAG 激光器来说 $I_{sat} = 2.5 \text{ kW/cm}^2$,因此要从单口径产生 100kW 的功率需要 7.2cm 的束径,这并不难做到。

研制 100kW SSL 面临的主要问题,第一,仍然是热处理问题,即要在提高输出功率和长发射时间里保持高的光束质量。第二阶段对光束质量的要求(1.5 倍衍射极限)至今未达到就是证明。许多年来固体激光器的输出功率在稳步地提高,但光束质量还不能满足远距离传输的要求。而要在 3 年内,使持续发射 5min 的 100kW 激光保持 1.2 倍衍射极限的光束质量风险非常大。第二,诺·格公司开发的

SSL是多口径激光器,虽然它采用主振荡器驱动并联的放大级不会对放大器元件造成沉重的负担,但它要采用复杂的锁相技术把 8 个链路的高功率输出光束相干地合成也决非易事。第三,激光器的小型化问题。在第二阶段的演示中并不考核比重量指标,只是要求承包方说明采用什么技术途径实现这项指标,所以诺·格公司的 25kW 激光器较大,在它用于战场之前,可能还需要缩小 10 倍^[7]。对第三阶段的激光器,比重量又有提高并将进行考核,从历史的经验来看,这在工程上也是一大难题。对演示系统而言,主要的障碍是高效二极管激光器阵列,高功率光学镀膜和大功率陶瓷材料。

按照计划,诺·格公司将在 2006 年对 100kW SSL 进行综合研究,并完成与战术地面战车相容的 SSL 系统的详细系统工程设计。2007 年将对现有防空目标的拦截能力作出评估。

4 高功率固体热容激光器和 Yb YAG 激光器

4.1 SSHCL 激光器的技术特点与存在的问题

4.1.1 SSHCL 的工作模式与失利的主要原因

SSHCL 采用了一种独特的工作模式,它把激光器的激射功能与冷却功能分开,有可能解决 SSL 工作时在增益介质上产生的高温梯度问题,从而避免和减轻了产生的热应力与光学畸变,甚至损坏光学元件,使激光器输出的平均功率只受激光抽运源功率的限制。与其它的 SSL 相比它的平均功率要高出几倍^[8],而有可能成为能获得最大功率的 SSL。事实上,早在 2004 年中期 SSHCL 就获得了 30kW 的平均功率输出^[9],运行时间为 1s,看来它的功率定标不成问题。到 2005 年底运行时间增加到 10s 后,功率输出为 25kW。

为了使激光器能长时间工作,他们采用了更换晶体板条的方法,即把新板条放入激光通道,而使工作后的热板条脱机冷却。一般激光器工作 10s 后,板条温度升至 100℃,就要更换板条,然后通过嵌入式热沉使热板条的温度在 1min 内降至 20℃。但每次更换板条需 1~2min,在此期间系统不能发射激光,这就意味着激光器在 1~2min 内只能持续发射激光 10s,最多也就能杀伤两个目标,它根本无法与诺·格公司 Nd YAG 激光器可持续工作时间达 350s 相比,这不能不说是 SSHCL 的一大软肋。另外,对要求持续工作 300s 的指标来说,它必须更换

增益介质板条 30 次,这样频繁地更换板条可能会影响到激光器稳定可靠的工作,而复杂的更换装置也对激光器的小型化不利。

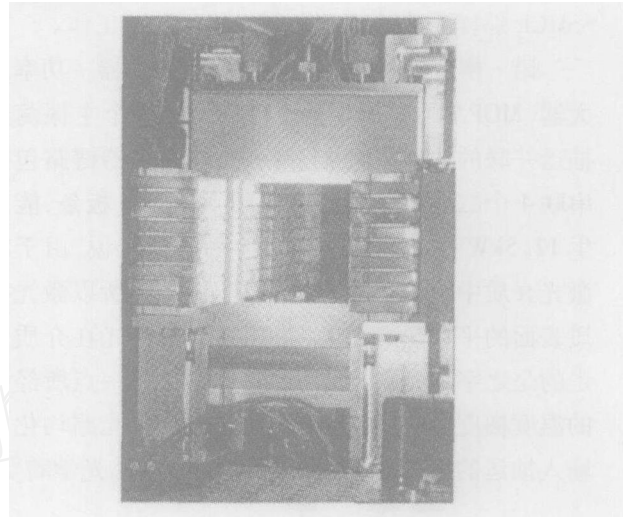


图 2 利弗莫尔的固体热容激光器

4.1.2 SSHCL 的技术特点和结构

归纳起来,SSHCL 激光器技术有 3 个特点。第一,采用了大尺寸的新型激光介质——掺钕的钕石榴石(Nd GGG),它具有较高的机械强度、热导率和光/电转换效率,而且已能生长出直径达 20cm 的高光学品质晶体,非常适合用于高平均功率激光器。第二,采用了利弗莫尔国家实验室开发的一种革命性封装技术——微沟道冷却单片硅热沉,它采用的微沟道冷却技术并使热沉紧贴着热源,被证明是一种能把功率源产生的热量迅速转移给冷却液体最有效和最紧凑的方法。这种封装技术能产生高密度的二极管阵列,其亮度很高(超过 $1\text{ kW}/\text{cm}^2$)。第三,采用腔内自适应光学校正畸变。为了获得好的光束质量,SSHCL 的光腔采用了非稳腔,预计可获得 3~4 倍衍射极限的光束,再利用腔内自适应光学对光束进行“净化”,达到 1.5 倍衍射极限。激光器采用了利弗莫尔实验室自己开发的自适应共振腔,它能自动检测波前畸变,通过腔内的变形镜校正光学畸变,达到近衍射极限的光束质量。利弗莫尔已将自适应光学系统装入腔内并作了测量,但至今未公布校正的结果。至少,在腔内采用自适应光学校正光学畸变比在腔外采用相位共轭技术校正畸变更难,图 2 为利弗莫尔实验室研制的一台固体热容激光器。

25kW 的 SSHCL 采用了 MOPA 结构,它用单个

振荡器驱动三个串联的功率放大器。每个放大器有 4 个 10mm × 12mm × 2mm 的 GGG 板条,它们装在一个长 1m 的容器里。每个板条由 4 个 720 条的二极管阵列抽运,每个阵列长 15cm。每个二极管条输出 100W 的光功率,每个阵列输出 72kW 峰值功率。SSHCL 的功率定标将通过增加放大器的数量和板条面积来实现。对于 100kW SSL 的设计,放大器的数量将由 3 个增至 9 个,板条的面积将由 10 × 12cm² 增至 13 × 13cm²[10]。

SSHCL 激光器采用了单孔径设计,这就避免了采用多束(如诺·格公司的 Nd YAG 激光器)设计要遇到的复杂锁相问题。

4.2 雷声公司 Yb YAG 激光器的技术特点与存在的问题

4.2.1 Yb YAG 激光器的技术特点

雷声公司为了支持获得适合用作武器的小型、高效激光器,主要开展了 Yb YAG 增益介质和控制光束质量的研究工作。Yb YAG 增益介质具有优良的物理与光学特性,特别是它的吸收峰(941nm)靠近发射峰(1029nm),它产生的百分比热量几乎比 Nd YAG 增益介质低 4 倍,被证明在所有单晶介质中它产生的热效应最小。因此 Yb YAG 激光器效率更高,结构更紧凑,更适合用于像喷气机和无人机这样的小型平台。而且 Yb YAG 有较宽的发射带和长的荧光寿命时间,使它在激光性能、可靠性和成本方面都明显优于 Nd YAG。从理论上讲,Yb YAG 更适合高平均功率、连续波或高重复频率的脉冲应用。在控制光束质量方面,Yb YAG 激光器的主振荡器采用了能产生高品质光束的低功率激光器(0.1 ~ 1km, TEM₀₀, 衍射极限的 Yb YAG 棒),同时利用热四波混合池相位共轭(PC)技术,校正从放大器中产生的光学畸变,因此雷声的系统有可能产生近衍射极限的光束。可以认为将 Yb YAG 增益介质与先进的 PC-MOPA 激光器体系结构相结合,是获得具有近衍射极限束质的高平均功率激光器的有效途径。

4.2.2 Yb YAG 激光器的结构与失利的主要原因

雷声公司的设计也采用了 MOPA 结构,但它完全不同于 Nd YAG 激光器,却类似于 SSHCL 激光器。它由一个主振荡器驱动一系列的功率放大器(图 3),将主振荡器产生的高束质信号直接输入到串联的三个功率放大器,然后进入包括作为非线性

元件的热四波混合池(装有热的丙酮)和一对放大器回路,该回路反馈一个与输入束相位共轭的信号到功率放大器进行再次放大,这时功率放大器输出的就是经相位共轭“净化”过的光束了。

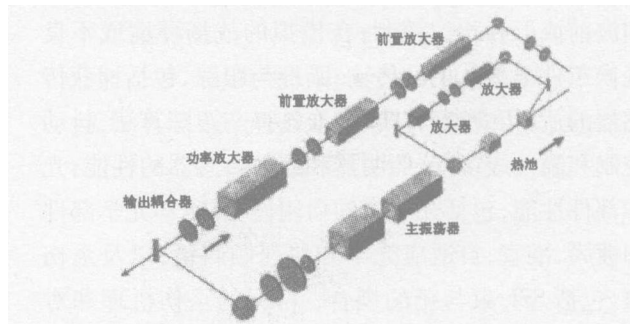


图 3 雷声公司 Yb YAG 激光器的体系结构示意图

雷声公司一直从事 Yb YAG 激光器的研发工作,早在 2002 年它就向机载激光计划交付了高束质的 1kW Yb YAG 激光器,作为机载激光的跟踪照明激光器^[11]。同时雷声公司也演示了高束质的 2.6 kW Yb YAG 激光器。但是近两年多来,输出功率未见提高。我们分析可能是功率定标出了问题,因为它的结构是用一个主振荡器去驱动串联的多极放大器,而功率定标是靠串联新增加的放大级来实现,这必将增加末级功放元件的负担,有可能承受不了而损坏或性能降低。

人们不禁要问,既然 Yb YAG 激光器的体系结构与 SSHCL 相似,为何 SSHCL 能定标到 25kW 呢?我们认为最主要的原因是 SSHCL 的持续工作时间很短,另外,GGG 增益介质的尺寸比 Yb YAG 增益介质的尺寸大,而且断裂极限应力高,因此不致造成末级功放元件负载太大而损坏或性能降低。

5 100kW 级高能激光技术演示器

为了支持陆军未来的采购计划,陆军空间与导弹防御司令部计划研制,集成和试验 100kW 级高能激光技术演示器(HELTD)^[12]。HELTD 计划的目的是要在 2013 年底前演示用高能激光与目标交战,并将其摧毁的能力。这些目标可能包括火箭、追击炮弹、大炮炮弹、精确制导弹药、地对空导弹和无人机。在 JHPSSL 计划第三阶段中正在实验室开发的两个候选的 SSL,将在 2008 年底前演示至少 100kW 的平均输出功率。陆军空间和导弹防御司令部打算最晚在 2009 年初,从两个候选者中选出一个 SSL 子系统作为 HELTD 的激光器及未来战术激光武器的光源。

HELTD 由 SSL 子系统;束控子系统(BCS);作

战管理、指挥、控制和通信 (BMC³) 子系统;热管理子系统以及集成到机动混合型电动战术车辆上的电源/充电系统组成。HELID 将用来演示验证一些与作战有关的技术问题,它们是 SSL 束控,包括光束和波前成形和相位控制;在模拟的战场环境或不良气候条件下 SSL 束的传输;瞄准与跟踪,包括捕获传感器的适时和精确转换,瞄准选择与跟踪算法,抖动控制和瞄准线误差,照明器和红外传感器的性能;光学部件性能,包括光学窗的耐用性,非冷却光学部件和镀膜,准直,自适应光学和快速倾斜镜;以及杀伤力,包括 SSL 束与靶的耦合,目标的杀伤机理和对积分通量的要求。

预期 HELID 计划将由不同的承包小组分别承担系统工程和系统集成工作。系统工程小组将确定初期的 HELID 概念,推荐子系统技术,以及不断地权衡成本、进度和性能要求。系统工程小组还必须评估包括在 JHPSSL 计划第三阶段承包者在内的候选子系统技术。系统集成小组将负责设计和开发 BCS 和 BMC³ 子系统,将所有的 HELID 子系统集成进机动平台,并在白沙导弹靶场的高能激光系统试验装置上演示验证 HELID 的性能。BCS 子系统必须能接收和发送 SSL 的高能激光束。BMC³ 必须能接收从捕获雷达(如白沙导弹靶场的测距雷达)移交的跟踪信息。

军方也在考虑一个过渡性的演示计划,在 2010 年底前用固定发射场地的 SSL 实验性系统与 60mm 直径的迫击炮弹交战。这个 SSL 实验性系统将包括坚实的 JHPSSL 第三阶段研制的 100kW SSL 束控系统、自适应光学、以及从战术高能激光计划产生的束控软件和测距雷达。

6 结束语

(1) 美国各军种联合高功率固体激光器计划第一和第二阶段的工作已于 2005 年底结束,经过三年零两个月的角逐,诺·格公司的 Nd YAG 激光器和达信公司的陶瓷型 Nd YAG 激光器胜出。Nd YAG 激光器的平均输出功率超过 27kW,工作时间达 350s,并获得了好的光束质量,这是一项了不起的成就。从 2006 年开始两公司将在三年内各自研制出 100kW 的激光器;

(2) 利弗莫尔国家实验室的 SSHCL 失利的主要原因是持续发射激光的时间太短,而雷声公司的

Nd YAG 激光器失利的主要原因则是功率定标出了问题;

(3) 研制 100kW Nd YAG 激光器面临三大挑战:第一,在提高输出功率和保持长工作时间的情况下,如何获得近衍射极限的光束质量 ($\leq 2 \times DL$);第二,如何相干合成 8 束 12.5kW 的激光;第三,如何使激光器小型轻量化,满足比重量的指标 (50W/kg);

(4) 研制平均输出功率达 100kW 的固体激光器风险很大,而它也仅能用作战术武器。在任何二极管抽运固体激光器系统里,固体增益介质都是一个薄弱环节。目前还没有什么技术路线能把它定标到更高的功率,除非降低对小型轻量化的要求。

参考文献:

- [1] Northrop Grumman Texton picked for high energy laser program phase III[J]. Defense Daily, 2006, 229(6): 1 - 2
- [2] 任国光,黄裕年.高功率固体激光器的最新进展及其军事应用[J].强激光与粒子束,2002,14: 45 - 50
- [3] Tuttle R. Texton approach to new laser 'very different' from Northrop's[J]. Aerospace Daily & Defense Report, 2006, 217(5): 5.
- [4] Staff Writers, Texton systems develops joint high powered solid state laser[J]. Space Daily, February 2006, 1 - 2
- [5] Hecht J. Laser weapons go solid - state[J]. Laser Focus World, 2004, 40(9): 61 - 67.
- [6] Keller J. northrop grumman shoots 27-kW beam of light for 350 seconds from solid-state laser[J]. Military & Aerospace Electronics, 2006, 17(1): 16, 20
- [7] Singer J. DOD to narrow competition for high-power laser work[J]. Space News, 2005, 16(46): 16
- [8] Parher A. World's most powerful solid-state laser[J]. Science and Technology Review, 2002, (10): 8 - 9.
- [9] Scott W B. battlefield laser weapons[J]. Aviation week & Space Technology, 2004, 160(23): 57 - 58
- [10] Hasssum. Livermore laser targets battlefield environment [J]. Laser Focus world, 2003, 39(12): 42 - 45.
- [11] Colarusso L M. Raytheon delivers first track illuminator laser for airborne laser [J]. Inside Missile Defense, 2002, 8(24): 5.
- [12] Roque A. Laser demonstrator may support future army acquisition program [J]. Inside The Army, 2006, 18 (5): 9.