

美国高能激光定标放大计划进展分析

易亨瑜 齐予 锁兴文 易欣仪

Development analysis of American high energy laser scaling initiative

YI Hengyu, QI Yu, SUO Xingwen, YI Xinyi

引用本文:

易亨瑜, 齐予, 锁兴文, 等. 美国高能激光定标放大计划进展分析[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1167–1176. DOI: 10.5768/JAO202344.0610002

YI Hengyu, QI Yu, SUO Xingwen, et al. Development analysis of American high energy laser scaling initiative[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1167–1176. DOI: 10.5768/JAO202344.0610002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

色散管理掺铥光纤激光器高能量脉冲的产生

Generation of high-energy pulses in dispersion-managed Tm-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 551–556 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401004>

2 μm 波段宽带可调谐全光纤激光器

Broadband tunable all fiber laser at 2 μm band

应用光学. 2018, 39(4): 569–573 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405003>

二极管泵浦折叠式电光调Q激光器

LD pumped folded electro-optic Q-switched laser

应用光学. 2018, 39(2): 274–278 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0207002>

2.1 μm 可调谐多波长掺铥光纤激光器

Tunable multi-wavelength holmium-doped fiber laser operating at 2.1 μm

应用光学. 2019, 40(3): 500–504 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307003>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1167-10

美国高能激光定标放大计划进展分析

易亨瑜¹, 齐 予¹, 锁兴文², 易欣仪³

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071;
3. 复旦大学 化学系, 上海 200438)

摘 要: 高能激光器性能直接决定了激光定向能的毁伤能力和打击射程, 为此美国相继启动多项计划, 以研制出高功率、高效、紧凑、轻量化, 用于战场的坚固型激光器。2019年, 启动了激光器定标放大计划 (high energy laser scaling initiative, HELSI), 制定出最新的国家级激光放大路线图。首先介绍美国 HELSI 计划的启动背景、研究内容和实施阶段, 其次分析 HELSI 计划第一阶段 300 kW 的研究进展, 最后评述 HELSI 计划进展的后续影响。综合分析可知, 目前洛·马公司的光谱合成光纤激光器技术在第一阶段率先胜出, 不仅获得陆军 300 kW 作战光源的订单, 而且还首先获得 HELSI 计划第二阶段 500 kW 的研制合同; HELSI 计划的进展, 使导弹防御局 (missile defense agency, MDA) 重新重视用于拦截助推段弹道导弹的定向能武器; HELSI 计划支持了 4 种技术路线进行竞争发展, 不过未来何种技术路线会最终胜出并部署在战场上, 还需要加强先期论证, 突破“技术迷雾”。

关键词: 激光技术; 激光器定标放大计划; 激光武器; 高能激光器; 光谱合成光纤激光器; 相干合成光纤激光器

中图分类号: TN249; TJ953

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610002

Development analysis of American high energy laser scaling initiative

YI Hengyu¹, QI Yu¹, SUO Xingwen², YI Xinyi³

(1. Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China;
3. Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: Performance of high energy laser (HEL) directly determines the damage ability and strike range of laser directional energy, and the United States has launched a series of plans to develop high-power, high-efficiency, compact, lightweight and robust lasers for battlefield. In 2019, the high energy laser scaling initiative (HELSI) was proposed, and the latest national laser amplification route was formulated. Firstly, the background, research contents and implementation stages of this HELSI were introduced. Secondly, the research progress of 300 kW in the first stage of HELSI was analyzed. Finally, the subsequent influences of HELSI progress was reviewed. Comprehensive analyses show that the Lockheed has won the first stage by its spectrally combined fiber laser technology, not only obtaining production orders of 300 kW HEL of US Army, but also entering the second stage of HELSI to get development contract of 500 kW HEL firstly. The progress of HELSI has made missile defense agency (MDA) pay more attention to laser weapons used to intercept boost-phase ballistic missiles. HELSI supports four technical approaches of HEL for competitive development. However, which one will eventually be deployed on the battlefield in the future needs to be strengthened the early research and break through the technical fog.

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-10-19

基金项目: 装备技术基础课题 (2022-ZBKJ-02)

作者简介: 易亨瑜 (1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光技术研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

Key words: laser technology; laser scaling initiative; laser weapon; high energy laser; spectrally combined fiber laser; coherent synthesis fiber laser

引言

激光武器是用定向发射的高能电磁波毁伤目标的下一代武器,具有打击快速、杀伤可控、作战隐蔽、保障简单及作战成本低等突出优点。自激光器发明以来,美国、苏联率先开展激光武器概念研究,目前美国、俄罗斯、英国、德国、以色列等发达国家都在大力发展激光武器。其中,美国研发投入最多,制定了一系列发展规划及研究计划,推动美国高能激光武器技术长期处于国际领先水平。通过60余年的发展,激光定向能已经历了“技术研究”和“系统演示”两个阶段,目前正处于“武器化”阶段初期。国外在竞相发展激光定向能技术,未来激光定向能的战场运用将引发一次新的军事技术革命。

高能激光武器的作战光源直接决定了激光武器的毁伤能力和射程,是美国定向能领域的研发重点,为此美国国防部下各个机构和各军兵种陆续启动了多项计划。如2002年9月启动的“联合高功率固体激光器(joint high power solid-state laser, JHPSSL)”计划,将固体激光器的输出功率由10 kW提升到战术激光武器门槛100 kW;2003年启动的“高能液体激光区域防御系统(high energy liquid laser defense system, HELLADS)”计划,将固体激光器的体积缩小了1个量级;2010年启动的“坚固型电激光器计划(robust electric laser initiative, RELI)”,将固体激光器(含光纤激光器)的光电转换效率提升到40%;与此同时,海陆空各军兵种和MDA也启动了高能激光器相关研究计划。这些计划的目标是研制出高功率、高效、紧凑、轻量化,能够走出实验室并用于战场的坚固型激光器。在启动之初,这些计划都支持多种技术路线并行发展,最终通过竞争淘汰,挑选出1~2种技术路线的激光器,部署在战场上。

为集中各军兵种之力、统筹规划,发展激光武器中的共性技术,2019年4月8日,美国国防部长办公室(office of the secretary of defense, OSD)启动了HEL SI计划^[1],制定出最新的国家级激光放大路线图,希望进一步提高现有作战光源的性能,使之更适于战场部署。2022年完成第一阶段的目标,研制出300 kW的高能激光器;目前已进入到第二阶段500 kW激光器的研制,因此有必要对该计划进行深入研究。关于国外激光武器系统的进展,

已有较多文献^[2-8]评述,而在国外高能激光器发展计划的分析方面,相关文献较少。本文将分析美国HEL SI计划的启动背景、研究内容、实施阶段,其次分析HEL SI计划第一阶段300 kW的研究进展,最后评述HEL SI计划进展的后续影响。

1 HEL SI计划

1.1 启动背景

1.1.1 HEL TVD 样机研制计划

HEL SI计划第一阶段300 kW激光器的研制目标,来源于陆军的“高能激光战术车辆演示器(high energy laser tactical vehicle demonstrator, HEL TVD)”项目的调整。

车载激光武器项目是美国陆军防空反导防御现代化的优先项之一,目标是为机动部队提供伴随防空,对抗新兴威胁。当2017年HEL MD样机完成60 kW级作战光源升级后,陆军就启动了100 kW级HEL TVD计划,将作战光源集成在军用中型战术车辆上,演示陆军间接火力防护能力-高能激光(indirect fire protection capability-high energy laser, IFPC-HEL)能力,如图1所示。2018年7~8月,陆军计划分别向雷声公司、动力系统公司-洛·马公司团队等两家研究团队各提供了1000万美元,用于100 kW车载激光武器的系统方案设计^[9-11]。2019年5月,陆军开展了两家竞标商的方案评估,由于洛·马公司采用光谱合成(spectral beam combining, SBC)光纤激光器的技术路线,有助于提高作战光源的可靠性和可定标放大能力,最终动力系统-洛·马团队胜出,获得陆军一份1.3亿美元、为期3年的系统开发和演示合同。



图1 100 kW级HEL TVD样机

Fig. 1 100 kW HEL TVD prototype

在陆军启动100 kW级HEL TVD项目之际,

海军的 150 kW 级“分层激光防御样机”已开始研制。2022 年 2 月在白沙导弹靶场, 美国陆军高能激光系统测试设施进行演示试验, 击败了代表亚音速巡航导弹的无人机靶标^[12]; 2015 年启动的 150 kW 级“激光武器系统演示器”于 2019 年实现了样机交付, 2020 年 5 月在太平洋成功摧毁无人机, 2021 年 12 月在亚丁湾成功完成公里级漂浮目标拦截测试, 具有打击无人驾驶武装舰艇的作战能力^[13-14]。相比于海军已取得的技术进展, 美国国防部认为陆军 HEL TVD 项目中作战光源的研制目标过于保守; 而且其认为, 将激光武器输出功率由 100 kW 提升到 300 kW, 将有助于打击巡航导弹、大型无人机等目标。

1.1.2 MDA 定向能计划

机载激光 (airborne laser, ABL) 计划下马后, MDA 提出了“机载激光 2.0”构想, 如图 2 所示, 旨在发展高空、长航程的无人机载激光武器, 去拦截助推段弹道导弹。因此, 2013~2021 财年启动了“定向能研究”计划, 研制 MW 级激光器; 2017~2023 财年又启动了“定向能样机开发”计划, 研制“低功率激光武器演示器 (low power laser demonstrator, LPLD)”。通过这些计划, MDA 预计在 2020 年前开展 LPLD 样机试飞, 2021 年前完成激光束稳定性测试, 之后开展一系列导弹拦截的低功率演示试验。



(a) ABL 计划



(b) 定向能样机计划

图 2 MDA 导弹拦截计划

Fig. 2 Missile interception plan of MDA

MDA “机载激光 2.0”构想的关键是要研制出功率重量比为 1 kg/kW 的 MW 级高效紧凑型激光器。“定向能研究”计划资助了三类技术途径, 分

别是劳伦斯利弗莫尔国家实验室的二极管泵浦碱性激光器 (diode pumped alkali laser, DPAL)、麻省理工学院林肯实验室的光纤合成激光器 (fiber combined laser, FCL)、通用原子的分布式增益激光器 (distributed gain laser, DGL), 其中 DGL 技术是 2019 年引入的。由于“定向能研究”计划存在许多严峻的挑战、进展缓慢, 导致后续“定向能样机开发”计划的 LPLD 演示项目无法开展。

可以看到, MDA 的激光器研制目标过于激进。鉴于 MW 级激光器的技术风险最高, 又属于激光武器的共性技术, 因此由美国国防部统一管理, 来制定国家级激光放大路线图。

1.2 研究内容

在多个高能激光技术研究计划和其他研究项目的支持下, 美国的高能激光技术取得快速发展, 多种技术方案已经实现了 150 kW 级功率输出。美军已认识到, 国防部应大幅提高激光功率并改善光束质量, 开发更高功率的紧凑型定向能武器, 以便作为通用作战光源部署在不同的战术平台上。美军认为, 目前这些功能的成熟速度不受“技术限制”, 而是受“资金限制”, 因此要求国防部确保定向能武器发展需求得到资金支持, 每年应维持 30 亿美元以上的水平。在激光武器发展中, 美国应加快努力, 减小激光武器的尺寸、重量和电力 (size, weight and power, SWaP) 以及成本需求。

2019 年 4 月 8 日, 美国 OSD 启动了 HELSI 计划^[1], 集中力量、统筹规划, 发展激光武器中的共性技术。该计划标志着 300 kW 及更高功率水平激光器的研制纳入到国防部统一管理模式, 其目标是在 2022 年底前建造 300 kW 级高能激光器, 2025 年底提高至 500 kW 级, 2028 年底提高至 1 000 kW 级, 如图 3 所示。在 2019~2027 财年期间, 年均经费 1 亿美元, 而且逐年递升。

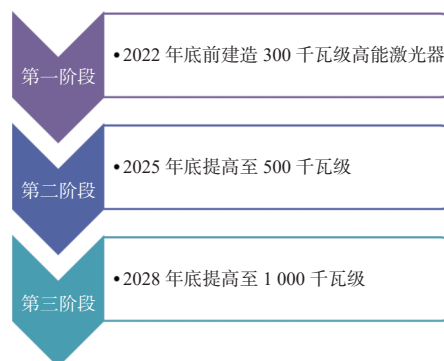


图 3 HELSI 计划各阶段目标

Fig. 3 Objectives for each phase of HELSI program

考虑到 MDA 对高能激光器的 SWaP 需求,以及空军现役机载平台的装载能力,结合 300 kW 反巡航导弹的门槛值限制,HELSEI 计划确定了重量/功率比、体积/功率比、光束质量等技术指标。其中较为苛刻的是,要求激光武器系统的作战光源

子系统(包括内部热管理单元)的功率/重量比应逐步达到 2 kg/kW,该技术指标超过了 HELSEI 计划的指标 5 kg/kW,接近于 MDA 定向能计划的指标 1 kg/kW。表 1 分别是美国 HELSEI 计划支持的高能激光器研究路线和技术指标。

表 1 HELSEI 规划的功率和功率比

Table 1 Power and power ratio of HELSEI planning

项目层	功率目标/kW	财年	尺寸&重量功率比目标	光束质量(PIB _c)/%
基本项1	250~300	2022	<20 kg/kW, <40 l/kW	25
可选项1	150	2022	2~3 kg/kW, 3 l/kW	30
可选项2	300	2024	2~3 kg/kW, 3 l/kW	30~40
基本项2	500	2025	<15 kg/kW, <30 l/kW	25
可选项3	500	2025	2~3 kg/kW, 3 l/kW	30~40
基本项3	1000	2028	<10 kg/kW, <20 l/kW	35~40
可选项4	1000	2028	2 kg/kW, 3 l/kW	35~40

表 1 中采用环围功率或桶中功率(power in the bucket, PIB)来评价激光器的光束质量,表征远场光束的能量集中度。理想平面波的远场发散角角半径为 $1.22\lambda/D$, 对应的艾里斑环围功率 PIB₀ 为 84%。因实际光束的衍射焦斑与理想艾里斑相比,中心亮斑向外扩展,故测试中实际环围功率 PIB_c 采用的发散角角半径为 $1.5\lambda/D$ 。

2021 年 4 月中旬,美国国防部研究与工程代理副部长芭芭拉·麦奎斯顿出席国会参议院拨款委员会国防小组委员会听证会,就“国防创新与研究”发表证词,着重介绍了 HELSEI 计划。

1.3 技术路线

HELSEI 计划技术资助的高能激光器,包括了光谱合成光纤激光器(spectrally combined fiber laser, SCFL)、相干合成光纤激光器(coherently combined fiber laser, CCFL)、分布式增益激光器(DGL)、二极管抽运碱金属激光器(DPAL)等四种技术方案。

这四类高能激光器,在技术路线上大致分为两类:一类是多链路阵列合成方式,主要由多束激光通过阵列排布进行能量叠加的定标放大,如 SCFL、CCFL 等;另一类是单口径输出方式,如 DGL、DPAL 等,通过增加增益介质口径或长度进行定标放大,这种输出方式又分为单谐振腔和主振放大(master oscillator power amplifier, MOPA)两种类型。

1.3.1 光谱合成

光谱合成是采用介质光栅(或体光栅)等色散元件,将不同角度入射的、波长略有不同的光束,

反射成为波长重叠的单个高功率光束^[15],如图 4 所示。该方案简单地增加了彼此的光束功率,并保留了单个光束的亮度。光谱合成本质上是简单的添加过程,通过增加激光器实现多束激光的共孔径合成,从而增大了空间亮度。洛克希德/奥库莱特公司申请了该方向的技术专利。为获得更好的光束输出质量,还可采用双光栅色散补偿技术^[16]。

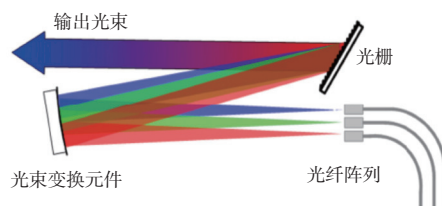


图 4 SBC 结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of SBC

光谱合成技术的优点是:能获得最高的“桶中功率”效率,不会产生相干合成的旁瓣现象;而且结构简单,适于外场环境运用。缺点是:对参与合成的子束波长、线宽等特性有较高要求,另外受带宽限制,存在功率放大上限。

1.3.2 相干合成

高能固体激光器的相干合成可分为相控阵式和衍射式两种。在相控阵中,由同一个单频主振荡器(MO)输出的种子光,经过分束后,将其中一束作为合成相位锁定中外差探测的参考光束,其余几束经过激光放大系统(PA)后,按一定排列方式进行空间拼接,实现光束合成,如图 5 所示。相

干合成技术方案的主要特点为: 多束合成在提升功率的同时可以保持良好的光束质量水平, 理论上无功率放大上限; 但相干合成需要精确控制子束的相位、线宽、偏振等参数, 而且随着合成光束数量的增加, 相位控制系统的复杂度和调节难度大大增加; 另外, 相控阵相干合成难以实现无缝拼接, 在激光的远场产生旁瓣, 分散了中央主光斑能量^[17-19]。

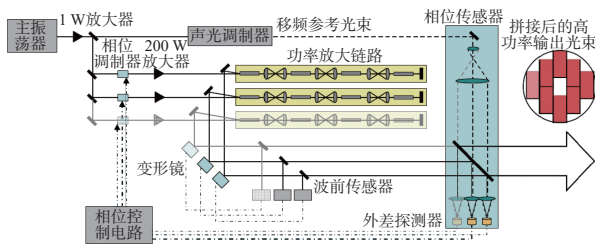


图5 板条激光器的相干合成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of coherent synthesis of slab laser

另一种相干合成技术是采用透射光学元件 (diffractive optical elements, DOE) 的透射或反射方式, 将光纤阵列光束高效地合成为单个光束^[20], 并具有高光束质量、高亮度的特点, 如图6所示。这种结构不会产生激光的远场旁瓣, 可以使 PIB 达到最大, 但耐强光 DOE 的制备技术复杂, 而且调试工作相当繁重。

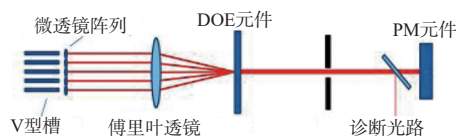


图6 DOE相干合成光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DOE coherent synthesis optical path

1.3.3 分布式增益

该技术利用折射率匹配液环绕薄片激光增益介质, 如图7所示, 采用了通用原子公司 DGL 专利技术^[21]。该方案的技术特点为: 综合片状固体激光和液体激光的优势, 并采用折射率匹配液冷却, 激光损耗低、效率高; 激光头结构简单紧凑, 在系统体积、重量方面具有较大优势, 易于实现小型化。缺点是: 该系统所需的耐强光、低吸收、高导热、低粘性的折射率匹配液制备难度大; 冷却流场的设计、加工和装配难度大^[22], 热管理系统复杂、技术难度高; YLF 激光材料生长和加工难度大(晶体较脆); 液体存在热致光学畸变^[23], 腔内光束质量控制难度大。

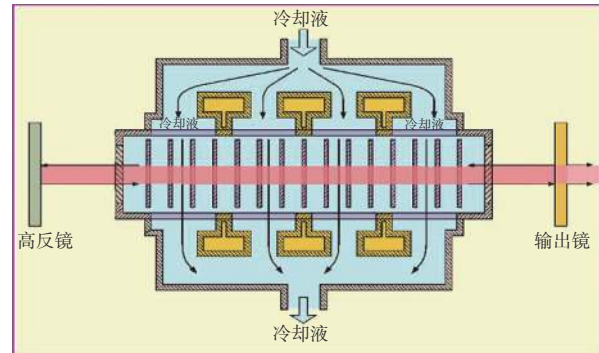


图7 HELLADS激光器谐振腔

Fig. 7 HELLADS laser resonator

1.3.4 DPAL

DPAL 是三能级结构, 其增益介质主要是 K、Rb 和 Cs 元素, 由于激发态与上能级间隔很小, 使得碱金属原子激光跃迁有高于 95.3% 的量子效率^[24]。文献^[25]也给出了几种量子效率较高的固体激光器, 而 DPAL 波长均位于大气窗口内, 更适用于大气传输。与固体\光纤激光器相比, DPAL 的量子效率高, 从而热负载低, 可降低热处理的复杂性; 气体增益介质均匀性高, 可使光束质量接近衍射极限, 并可通过介质流动来减轻热效应; 非线性效应和光学损伤影响弱, 能通过简单增加介质体积和泵浦源数量来进行激光功率的定标放大。与氧碘化学激光器相比, DPAL 增益介质无毒、无危险, 而且运行时无需庞大的引射器, 故系统结构简单、体积紧凑而且无安全保障需求。最重要的是, DPAL 连续出光时间长, 对于激光武器的实战化具有重要价值。但在实现高功率输出上, 将面临泵浦源线宽压窄及谱线匹配、镜面污染等潜在的工程技术挑战。

2 HELSI 计划进展

2.1 光谱合成

洛·马公司的光谱合成技术, 在光束质量退化不大的情况下, 能实现 42% 的电光转换效率, 而且技术实现简单, 目前已成为战术激光武器的首选作战光源。

2019 年 10 月 14 日, 洛·马公司表示: 光谱合成技术将激光输出功率由 100 kW 提高到 300 kW 是可行的, 只要棱镜能够承受负载, 电源和冷却系统能够支持负载, 就可以合成更多的光纤激光器子模块, 从而获得更高的激光功率; 这只是一个工程问题, 需要对空间和重量进行权衡。

在 HELSI 计划中,洛·马公司汇集从 RELI 计划、空军“下一代紧凑环境中激光器进步”(laser advancements for next-generation compact environments, LANCE)计划和海军“集成炫目和监视功能的高能激光器”(high energy laser with integrated optical-dazzler and surveillance, HELIOS)计划获得的多年研究经验。洛·马公司于 2014 年 1 月 28 日研制出 30 kW 级 RELI 光纤激光器;2017 年 3 月完成 60 kW 级 RELI 激光器的研制,并交付陆军集成在高能激光移动演示器上;2022 年 2 月交付空军 50 kW 的 LANCE 激光器,显著提升了激光器的体积功率比。2019 年底,洛·马公司的系统方案通过 HELSI 计划第一阶段的关键设计审查;2022 年 9 月 15 日研制出 300 kW 级激光器,比原计划提前了 15 天^[26]。

2.2 相干合成

在“联合高功率固体激光器(JHPSSL)”计划支持下,诺·格公司 2009 年通过相控阵方式研制出 105 kW 固体激光器,但该激光器体积巨大,效率只有 20% 左右,实际上并不能立即投入战场使用。之后,诺·格公司率先转向开展衍射相干合成技术研究。在 RELI 计划支持下,诺·格公司与麻省理工学院林肯实验室合作,于 2012 年 5 月实现 1.9 kW 的激光输出;之后获得了 23 kW 的环围功率,达到预定目标,进入到 RELI 计划第二阶段。

2015 年 9 月 22 日,美国海军研究办公室(office of naval research, ONR)启动了 150 kW 固体高能激光武器系统样机(laser weapons system demonstrator, LWSD)计划,最终目的是在测试军舰上实现海上对无人机和密集小型快艇的打击效果。在该计划支持下,2019 年诺·格公司基于 RELI 计划成功完成 LWSD 系统研制,并交付海军开展舰载集成。2020 年 5 月,美国海军在太平洋测试了 LWSD 系统的作战性能,成功摧毁无人机。2021 年 12 月,在亚丁湾完成公里级漂浮目标的拦截测试,并宣称该系统可应用于打击无人驾驶的武装快艇。在美国国防部 HELSI 计划支持下,2022 年 7 月 11 号,诺·格公司完成 300 kW 系统方案的初级设计评审^[27]。

2.3 分布式增益

在 HELLADS 计划支持下,2015 年通用原子公司研制出了第三代 75 kW 级 DGL 模块,功重比为 4 kg/kW^[28];2016 年通过 2 个模块串联形成 150 kW 级 HELLADS 激光器,交付白沙导弹靶场,对军事目标进行实弹打击测试。2020 年研制的第七代

DGL 模块,封装更加紧凑,并提高了光束质量,如图 8 所示。

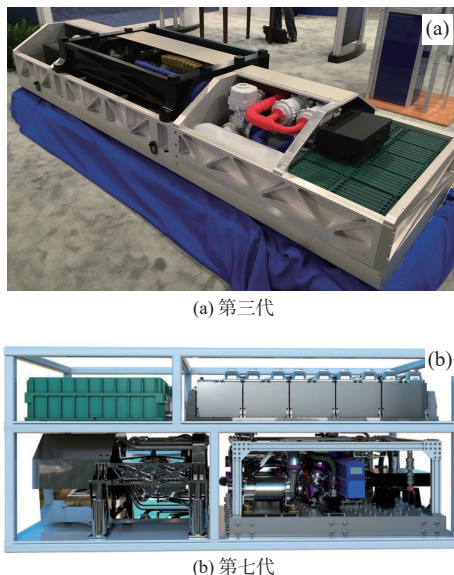


图 8 通用原子公司的高能激光器

Fig. 8 High energy laser of General Atoms Company

面对 OSD 启动的 HELSI 计划,以及陆军 HEL TVD 项目向 300 kW 的调整计划,2020 年 10 月 13 日,通用原子公司与波音公司合作,参与陆军 HEL TVD 项目合同竞标。2021 年 10 月 25 日获得陆军快速能力和关键技术办公室(rapid capabilities and critical technologies office, RCCTO)一份研发 300 kW 固体激光武器的合同,以验证“DGL 技术在未来陆军武器系统中使用的可行性”,如图 9 所示。目前尚未查到后续进展。



图 9 通用原子 300 kW 激光武器概念图

Fig. 9 300 kW laser weapon concept of General Atoms

2.4 DPAL

美国空军和 MDA 均开展了高功率军用 DPAL 研究。2009 年,空军研究实验室开展小规模创新型 DPAL 激光器预研,希望研制出满足飞行要求的 200 kW 激光器;2010 年,MDA 将 DPAL 作为最具潜力的 MW 级战略反导光源,2013 年得到“定

向能研究”计划的经费支持。DPAL 在 2012 年实现 kW 级输出; 2014 年功率超过 4 kW; 2015 年功率突破 10 kW; 2016 年功率达到 16 kW; 2018 年功率达到 30 kW, 电光效率超过 40%, 光束质量<1.5 倍衍射极限; 2019 年开始计划完成下一代 DPAL 架构的实验室验证。目前尚未查到后续进展。

3 后续影响

3.1 陆军 300 kW 样机合同

300 kW 激光功率, 是面向导弹防御的需求阈值, 对于下一代激光武器至关重要。2019 年 10 月, 在美国国防部协调下, 陆军重新调整了 HEL TVD 计划。2023 年 7 月 21 日, 陆军 RCCTO 完成 300 kW 级合同修改, 经费由 1.3 亿美元增加到 2.208 亿美元^[29-30]。2023 财年首付 1.54 亿美元, 尾款将于 2025 年 10 月中旬提供^[31-32]。在该计划支持下, 洛·马公司将开发、集成、制造、测试和交付 4 套武器系统, 如图 10 所示, 用于陆军保护固定和半固定基础设施防御火箭弹、火炮炮弹、迫击炮弹 (rockets, artillery and mortar, RAM)、无人机、直升机、固定翼飞机和巡航导弹等空中威胁。



图 10 洛·马公司设计的 300 kW 级 HEL TVD 样机

Fig. 10 300 kW HEL TVD prototype designed by Lockheed Martin

合同要求研制 4 套武器样机, 以构建陆军 1 个排级单位。合同内容除高能激光器外, 还涵盖了光束控制、指挥控制及作战管理、电力及热管理等武器系统的各个单元, 以及在车载战术平台的集成工作。另外, 合同可能对武器样机的光束质量有严格限制, 因此要求作战光源的额定功率是 300 kW、最小功率为 250 kW。预计将于 2024 年夏季交付首套样机, 2025 年 10 月完成全部 4 套样机。一旦首套样机完成, 将进行针对“军事行动相关目标”的实弹测试。

3.2 500 kW 激光器启动研制

2023 年 7 月 28 日, 国防部研究与工程副部长

办公室授予洛·马公司合同, 进入 HELSI 计划的第二阶段, 开始研发 500 kW 级激光器^[33-34], 如图 11 所示。HELSI 计划的这一阶段旨在进一步提高激光功率水平, 同时实现优异的光束质量, 并优化高能激光器的效率、尺寸、重量和体积。



图 11 洛·马公司为 HELSI 计划设计的 500 kW 级激光器

Fig. 11 500 kW laser designed by Lockheed Martin for HELSI

500 kW 级激光器将作为下一代战术激光武器的作战光源, 洛·马公司的技术路线仍然是光谱合成方案, 并采用美国国防部模块化开放系统方法标准, 来确保系统的互操作性和多任务集成。洛·马公司将结合从 300 kW 系统中取得的成功经验, 和从传统项目中吸取的教训。

3.3 MDA 高层认识转变

自里根总统提出战略防御计划之后, 美国于 1993 年启动了机载激光 ABL 计划, 并在 2010 年成功拦截 80 km 处的实弹导弹, 在世界上引起广泛的轰动。随着电泵浦激光技术的发展, ABL 计划下马, 之后 MDA 提出“机载激光 2.0”构想。作为助推段弹道导弹拦截的后续研究计划, 作战平台为高空长航时无人机。该计划得到时任五角大楼研究与工程主任迈克·格里芬 (Mike Griffin) 的大力支持。但因作战光源技术挑战太大、进展缓慢, 无法满足 MDA 的严苛要求。2020 年 8 月 18 日, MDA 局长约翰·希尔 (John Hill) 海军中将强调, 虽然发展助推段阶段的防御能力是 MDA 既定方针, 不过现阶段存在激光器技术成熟度和作战概念方面的限制^[35]。

2022 年 10 月, 拜登政府发布的《导弹防御评估》指出, 鉴于不断变化的威胁, 美军需要“非动能”选项^[36]。美国国防部在过去几年里加大了对高能激光武器和高功率微波武器的研发支持力度, 以用于导弹和无人机的防御。随着近年来定向能研究取得新进展, MDA 又重新审视用于击落敌方

弹道导弹的定向能技术。2023 年 3 月 24 日,MDA 局长希尔提到定向能技术,如高功率连续波激光器、脉冲激光器或高功率微波,是 MDA 值得探索的选项^[37]。

2023 年 8 月 17 日,MDA 执行主任劳拉·德西蒙(Laura DeSimone)表示,在沉寂一段时间后,MDA 对将激光定向能用于弹道导弹防御的潜力越来越乐观,并表示 MDA 更加重视开发针对敌方导弹的定向能武器系统。德西蒙解释说:“我认为 MDA 在过去几年减弱了对激光武器的支持力度,部分原因是激光技术仍需进一步成熟”,“它需要在目标的毁伤功率水平上进一步成熟,并减少尺寸、重量和功率要求^[38-39],以产生定向能效果”。

4 结束语

目前激光定向能正处于“武器化”阶段初期。为集中各军兵种之力,统一规划作战光源的发展,美国国防部 2019 年启动了 HELSI 计划,来进一步促进作战光源向更高功率、轻量紧凑化发展,使之更适合于战场部署。HELSI 计划制定了美国最新的国家级激光放大路线图,明确了各阶段的激光功率水平、尺寸、重量等多方面技术指标,这类顶层规划对我国相关行业发展具有一定启示意义。在该计划的支持下,洛·马公司 2022 年 9 月中旬采用光谱合成技术方案,率先达到国防部 HELSI 计划第一阶段指标,提前实现 300 kW 级的里程碑。300 kW 级 HELSI 激光器的研制成功,使美陆军继续推进调整后的 HEL TVD 项目。2023 年 7 月 21 日,洛·马公司获得 2.208 亿美元合同,计划于 2025 年 10 月完成 4 套样机,为陆军构建一个激光战车排。其它国家,如英国、以色列作为美国的核心盟友,能直接利用美国作战光源的研究成果;德国、法国作为美国的二线盟友,可采购 IPG 等公司的工业级光纤激光器产品,再自行开发光束合成技术。而作为美国竞争对手的俄罗斯,因出口管制无法采购 IPG 等公司的先进产品,只能自力更生从头研发。

300 kW 级激光器的研制成功,体现了光谱合成技术路线的潜力。2023 年 7 月 28 日,洛·马公司获得 500 kW 研制合同,率先进入 HELSI 计划的第二阶段。普遍认识是,采用光谱合成方式进行激光功率的定标放大,受可用光源的谱宽、激光增益带宽及热耗散的限制,无法定标放大到数百 kW 至

MW 级的功率。2018 年我方曾判断,光谱合成光纤激光器虽然逐渐成为常规战术激光武器的首选,不过 150 kW 功率指标可能是其一个技术极限;若输出的激光束为线偏振光,可再通过偏振叠加的二级合成进一步放大到 300 kW。2020 年通用原子公司也认为,300 kW 的激光功率水平,可能已达到光谱合成技术路线的上限^[40]。

但光谱合成技术路线不断突破,在完成 300 kW 光源研制后,目前又进军 500 kW 光源的研制。光谱合成方式受限于合成子束路数,以及具有严格带宽限制的子束功率^[41]。此次定标放大到 500 kW 功率,密集组束技术、子束功率必须实现进一步提高。在美国 HELSI 计划支持的光谱合成光纤激光器、分布式增益激光器、相干合成光纤激光器、二极管抽运碱金属激光器等 4 种技术路线中,未来哪种激光器技术路线会走向战场,需要从国家层面上组织相关技术专家加强先期论证,突破“技术迷雾”。

参考文献:

- [1] 齐予,易亨瑜,匡艳,等.美国 300 kW 激光器的技术路线与管理模式探讨[J].定向能研究与发展,2022,46(4): 1-17.
QI Yu, YI Hengyu, KUANG Yan, et al. Discussion on American technical route and management mode of 300 kW laser[J]. Research and Development of Directed Energy, 2022, 46(4): 1-17.
- [2] 任国光,伊炜伟,齐予,等.美国战区 and 战略无人机载激光武器[J].激光与光电子学进展,2017,54(10): 13-24.
REN Guoguang, YI Weiwei, QI Yu, et al. U.S. theater and strategic UVA-borne laser weapon[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 13-24.
- [3] 易亨瑜,锁兴文,易欣仪,等.美国运输机机载激光系统研制进展[J].激光技术,2021,45(2): 174-181.
YI Hengyu, SUO Xingwen, YI Xinyi, et al. Development of AC-130 J AHSL system[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 174-181.
- [4] 黄沛,曹国辉,张海晶,等.美国陆军车载战术激光武器发展分析[J].激光技术,2022,46(6): 817-822.
HUANG Pei, CAO Guohui, ZHANG Haijing, et al. Development analysis of US army vehicle tactical laser weapons[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 817-822.
- [5] 李朝龙,崔旭涛,赵寒,等.战术激光武器陆战场运用思考[J].激光与红外,2020,50(11): 1298-1302.

- LI Chaolong, CUI Xutao, ZHAO Han, et al. Research on the use of tactical laser weapons in the field[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(11): 1298-1302.
- [6] 赵彦森, 李强, 周淳. 舰载激光武器及其发展趋势分析[J]. *舰船电子工程*, 2010, 30(7): 1-3.
ZHAO Yansen, LI Qiang, ZHOU Chun. Analysis of ship-borne laser weapon and its development trend[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(7): 1-3.
- [7] 易亨瑜, 齐予, 易欣仪, 等. 美国舰载激光系统的成熟度评估[J]. *应用光学*, 2021, 42(1): 9-15.
YI Hengyu, QI Yu, YI Xinyi, et al. Technology readiness level assessment on ship-borne laser weapon system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 9-15.
- [8] 易亨瑜, 齐予, 黄吉金. 舰载激光武器的研制进展[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 834-839.
YI Hengyu, QI Yu, HUANG Jijin. Development of ship-based laser weapons system[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(6): 834-839.
- [9] HEL TVD: high energy laser tactical vehicle demonstrator [EB/OL]. (2016-04-11)[2023-8-30]. http://www.smdc.army.mil/FactSheets/HEL_TVD.pdf.
- [10] Raytheon Company. Raytheon designing U. S. army laser [EB/OL]. (2018-07-02)[2023-8-30]. <http://raytheon.mediaroom.com/2018-07-02-Raytheon-designing-U-S-Army-laser>.
- [11] CARLSON S. Dyanetics, lockheed chosen for work on 100 kW laser weapon [EB/OL]. (2018-08-07)[2023-8-30]. http://www.spacedaily.com/reports/Dyanetics_Lockheed_chosen_for_work_on_100_KW_laser_weapon_999.html.
- [12] STEFANO D U. U.S. navy conducts historic layered laser defense demonstration [EB/OL]. (2022-54-21)[2023-8-30]. <https://theaviationist.com/2022/04/21/usn-layered-laser-defense-demo/>.
- [13] TREVITHICK J. The Amphibious Warship USS Portland Has Shot Down A Drone With Its New High-Power Laser. [EB/OL]. (2020-5-22)[2023-8-30]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/33634/the-amphibious-warship-uss-portland-has-shot-down-a-drone-with-its-new-high-power-laser>.
- [14] ECKSTEIN M. USS Portland Fires Laser Weapon, Downs Drone in First At-Sea Test. [EB/OL]. (2020-5-22)[2023-8-30]. <https://news.usni.org/2020/05/22/video-uss-portland-fires-laser-weapon-downs-drone-in-first-at-sea-test>.
- [15] 柏刚, 杨依枫, 晋云霞, 等. 光谱合成激光光束特性的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 49-62.
BAI Gang, YANG Yifeng, JIN Yunxia, et al. Research progress on laser beam characteristics in spectral beam combining system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 49-62.
- [16] 马毅, 颜宏, 孙殷宏, 等. 基于双光栅的光纤激光光谱合成关键技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103002.
MA Yi, YAN Hong, SUN Yinhong, et al. Recent progress of key technologies for spectral beam combining of fiber laser with dual-gratings configuration(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103002.
- [17] 易亨瑜, 苏毅, 黄珊, 等. 矩形光束合成的建模与实验验证[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 472-475.
YI Hengyu, SU Yi, HUANG Shan, et al. Modeling and experimental validating on array combination of rectangle laser beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 472-475.
- [18] 易亨瑜, 苏毅, 唐淳, 等. 矩形光斑阵列合束的锁相闭环分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1253-1258.
YI Hengyu, SU Yi, TANG Chun, et al. Coherent combination analyses of rectangle spot beams array with phase-locked closing-loop[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1253-1258.
- [19] 易亨瑜, 齐予, 宋伟, 等. 子束排列方式对固体激光器光束合成特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1735-1740.
YI Hengyu, QI Yu, SONG Wei, et al. Effect of beamlets arrange on beam combination characteristics of solid-state laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1735-1740.
- [20] 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[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [21] PERRY M D, BANKS P S, ZWEIBACK J, et al. Laser containing a distributed gain medium: US7103078[P]. 2006-09-05.
- [22] 魏前明, 阮旭, 易家玉, 等. 直接液冷薄片激光器波前畸变优化研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(23): 2301005.
WEI Qianming, RUAN Xu, YI Jiayu, et al. Optimization of wavefront distortion of direct liquid-cooled thin-disk laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(23): 2301005.

- [23] 蒋琳, 刘军, 袁晓蓉, 等. 薄片激光器低畸变冷却技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 1-7.
JIANG Lin, LIU Jun, YUAN Xiaorong, et al. Cooling techniques for deformation reduction of thin-disk lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 1-7.
- [24] 齐予, 易亨瑜, 黄吉金, 等. 高功率碱金属激光器的发展和技术挑战[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 38-49.
QI Yu, YI Hengyu, HUANG Jijin, et al. Research development and technological challenge of alkali lasers with high power[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 38-49.
- [25] 曹伟航, 李状, 石成堃, 等. 掺Pr³⁺固体激光器研究进展概述[J]. 光电工程, 2022, 49(4): 210364.
CAO Weihang, LI Zhuang, SHI Chengkun, et al. Overview of research and development of Pr³⁺-doped solid-state lasers[J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(4): 210364.
- [26] Lockheed delivers 300 kW laser to US military. [EB/OL]. (2022-09-20)[2023-8-30]. <https://optics.org/news/13/9/28>.
- [27] Northrop completes preliminary design review of a 300 kW laser for U. S. DoD. [EB/OL]. (2022-07-13)[2023-8-30]. https://www.defensemirror.com/news/32316/Northrop_Completes_Preliminary_Design_Review_of_a_300_KW_Laser_for_U_S_DoD#.YwtWbdej4m4.
- [28] 易亨瑜, 齐予, 易欣仪, 等. 通用原子公司高能激光器研制进展[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 213-220.
YI Hengyu, QI Yu, YI Xinyi, et al. Development of GA-ASI's high energy laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 213-220.
- [29] SABALLA J. Lockheed to Develop High-Energy Laser Prototype for US Army. [EB/OL]. (2023-07-21)[2023-8-30]. <https://www.thedefensepost.com/2023/07/21/lockheed-high-energy-laser/>.
- [30] Army picks lockheed martin aculight to build prototype 300-kilowatt laser weapons to defend against rockets [EB/OL]. (2023-08-07)[2023-8-30]. <https://news.lockheedmartin.com/2023-10-10-US-Army-Selects-Lockheed-Martin-to-Deliver-300-kW-class-Solid-State-Laser-Weapon-System>.
- [31] MCFADDEN C. Lockheed to deliver HEL aerial defense laser by 2025 under new US Army contract. [EB/OL]. (2023-07-21)[2023-8-30]. <https://interestingengineering.com/innovation/lockheed-given-air-defense-laser>.
- [32] HONRADA G. US brings new ground-based laser weapon up to speed. [EB/OL]. (2023-07-24)[2023-8-30]. <https://asiatimes.com/2023/07/us-brings-new-ground-based-laser-weapon-up-to-speed/>.
- [33] Lockheed martin to scale its highest powered laser to 500 kilowatts power level. [EB/OL]. (2023-07-28)[2023-8-30]. <https://news.lockheedmartin.com/2023-07-28-Lockheed-Martin-to-Scale-Its-Highest-Powered-Laser-to-500-Kilowatts-Power-Level>.
- [34] Lockheed Martin unveils plans to develop new class of 500kW laser weapon. [EB/OL]. (2023-07-31)[2023-8-30]. <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfare-intl/lockheed-martin-unveils-plans-to-develop-new-class-of-500kw-laser-technology/>.
- [35] ABOIT R. MDA director: boost phase intercept hard and likely only for retaliation, if possible. [EB/OL]. (2020-08-19)[2023-8-30]. <https://www.defensedaily.com/mda-director-boost-phase-intercept-hard-likely-retaliation-possible/missile-defense/>.
- [36] HITCHENS T. Laser weapons 'finally' seeing 'real progress,' Missile Defense Agency official says. [EB/OL]. (2023-08-17)[2023-8-30]. <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-news/laser-weapons-finally-seeing-real-progress-missile-defense-agency-official-says/>.
- [37] EASLEY M. MDA director considering new directed energy, electronic warfare capabilities for future missile defense. [EB/OL]. (2023-03-24)[2023-8-30]. <https://defensescoop.com/2023/03/24/mda-director-considering-new-directed-energy-electronic-warfare-capabilities-for-future-missile-defense/>.
- [38] ABOIT R. MDA sees 'real progress' in directed energy laser weapons. [EB/OL]. (2023-08-22)[2023-8-30]. <https://www.defensedaily.com/mda-sees-real-progress-in-directed-energy-laser-weapons/missile-defense/>.
- [39] Jane Edwards. Laura DeSimone: MDA placing 'increased emphasis' on directed energy weapons development. [EB/OL]. (2023-08-18)[2023-8-30]. <https://executive.gov.com/2023/08/laura-desimone-md-placing-increased-emphasis-on-directed-energy-weapons-development/>.
- [40] Jeff Hecht. Liquid lasers challenge fiber lasers as the basis of future high-energy weapons. [EB/OL]. (2023-08-18)[2023-8-30]. <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/military/fiber-lasers-face-a-challenger-in-laser-weapons>.
- [41] 王岩山, 彭万敬, 王珏, 等. 4.45 kW窄线宽线偏振近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 185-186.
WANG Yanshan, PENG Wanjing, WANG Jue, et al. 4.45 kW narrow linewidth linearly polarized near single-mode all-fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 185-186.