

美国战区和战略无人机载激光武器

任国光^{1,2}, 伊炜伟¹, 齐予², 黄吉金², 屈长虹^{1*}

¹中国久远高新技术装备公司, 北京 100094;

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 弹道导弹和巡航导弹是高技术战争中的主要威胁,对弹道导弹最有效的防御是助推段拦截。首先总结了美国机载激光计划失败的原因和经验教训,然后评述和分析了无人机载激光武器反导的概念、优势、研究计划和现状,以及存在的问题和面临的挑战。最后,讨论和分析了用于助推段拦截的二极管抽运碱金属激光器和相干合成光纤激光器的原理、特点、最新进展和技术挑战。

关键词 激光器; 机载激光计划; 无人机载激光武器; 固体激光器; 二极管抽运碱金属激光器; 相干合成光纤激光器

中图分类号 TJ95; V279; E927 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.100002

U.S. Theater and Strategic UVA-Borne Laser Weapon

Ren Guoguang^{1,2}, Yi Weiwei¹, Qi Yu², Huang Jijin², Qu Changhong¹

¹China Jiuyuan Hi-Tech Equipment Corporation, Beijing 100094, China;

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Ballistic and cruise missile are the major threat in high technology war, the most efficient defense for ballistic missile is the boost phase interception. First of all, the failure reason and the lessons learned of US air borne laser project are summarized. Then the concept, superiority, research project and current status, as well as the problems and the challenges of anti-missile UAV-borne laser weapon are reviewed and analyzed. Finally, the principle, characteristics and recent progress and technical challenges of the diode pumped alkali laser and fiber combining laser used in the boost phase interception are discussed and analyzed.

Key words lasers; airborne laser program; UAV-borne laser weapon; solid state laser; diode pumped alkali laser; fiber combining laser

OCIS codes 140.1340; 140.3580; 140.3298; 140.3510

1 引言

弹道导弹和巡航导弹不仅能携带高爆炸头,还能携带核弹头和生化弹头,是未来高技术战争中的主要威胁。随着导弹射程和命中精度的提高,以及导弹技术和核技术的扩散,这种威胁日趋严重。定向能武器可以成为一种强大的力量倍增器。从原则上讲,定向能武器的部署和开发可以增强国家的战略威慑和本土防御能力,从而提升导弹防御和空间控制能力。具体来讲,以光速作战、深弹仓、极低成本单次射击和能与多个目标交战,这些要素的组合是对付弹道导弹、巡航导弹和短程火箭弹大规模攻击所需要的。

在弹道导弹防御中,最有效的防御是在助推段,在来袭弹道导弹能采取对抗措施之前将其击毁。发展助推段拦截能力非常重要,因为它具有威慑力、防御效能高、目标容易探测和易被摧毁。虽然处于助推段的弹道导弹是最脆弱的,但助推段拦截的难度却远高于中段和末段,关键的问题是拦截的时间窗口仅有

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-05-09

作者简介: 任国光(1938—),男,学士,研究员,主要从事强激光技术发展战略研究与论证方面的工作。

E-mail: 15611730921@163.com

* 通信联系人。E-mail: quchanghong@cjhte.com

1~5 min,因此,以光速作战的激光武器是拦截助推段弹道导弹的最佳选择。美国参谋长联席会议主席 Dunford 认为美军需要发展能在弹道导弹飞行初期用激光将其击落的方式,他说:“目前的能力仅限于在中段和末段进行拦截,我们需要在整个弹道导弹杀伤链寻找解决方案”^[1]。

除了激光武器的快速响应能力外,美国发展激光助推段拦截武器还特别强调了它们的作战效费比。美国国防部副部长 Kendall 说:“精确的弹道导弹和巡航导弹已变得不那么昂贵,因此已扩散到欠发达国家或非国家行为者,这使得美国的舰船和地面部队易遭到攻击,利用导弹拦截器防御带有末端制导的导弹是非常昂贵的”^[2],而定向能武器却能以便宜得多的方式对抗弹道导弹和巡航导弹的威胁。目前基于导弹对导弹的方式是一条死胡同,廉价的制导武器构成了不公平的成本战略,因为击落它们的成本远比部署它们的成本昂贵得多,而定向能武器则有能力颠倒这个成本方程,它将是大幅降低拦截弹作用的革命性导弹防御。

在美国国防部(DOD)终止了装备有化学激光器的机载激光(ABL)计划近三年后,美国导弹防御局(MDA)在吸取 ABL 计划的经验教训和利用美国一流国家实验室最近在激光技术取得突破的基础上,正在推进一项新的助推段防御计划,它期望将小型电激光器集成进高空无人机去执行助推段拦截任务,这是 MDA 目前唯一的助推段防御计划。

在美国军方放弃了兆瓦级功率的化学激光器后,为了对付弹道导弹和巡航导弹的威胁,仍在继续推进能获得兆瓦级功率的激光器技术,MDA 和国防高级研究计划局(DARPA)计划为无人机载助推段拦截研发兆瓦级的二极管抽运碱金属激光器(DPAL)和光纤合成激光器(FCL)。这两种激光器被认为很有前途,它们能定标到非常高的平均功率(兆瓦),而且光束质量好,同时能获得很高的系统电-光效率($>40\%$)和非常低的系统重量和体积(最终目标功率密度 $1\sim 2 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$),这些性能都有利于将它们集成进高空无人机执行反助推段弹道导弹的任务。2015 年美国麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)的 FCL 系统已获得近衍射极限的 44 kW 光束(功率密度为 $40 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$),并开始建造一台 50 kW 的 FCL,其功率密度为 $5 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ ^[3]。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 DPAL 能明显改善固体激光器的效率和功率,并有利于小型化,最后获得兆瓦级的功率输出。2015 年 DPAL 的输出功率已达 13 kW^[4],LLNL 计划在 2016—2017 年演示功率为 30 kW 的 DPAL 系统。

2 ABL 计划失败的原因和经验教训

美国 DOD 长期以来一直在为弹道导弹防御寻求发展高能激光武器,ABL 是迄今 DOD 最雄心勃勃的定向能计划,历时 14 年,耗资 53 亿美元。其目的是将化学氧碘激光器(COIL)集成进改装的波音 747-400F 型货机,用于拦截远在 400 km 之外处于助推段的弹道导弹。2010 年 2 月,ABL 用 1 MW 的 COIL 成功拦截了固体燃料战术导弹“小猎狗-黑雁”和液体弹道导弹“飞毛腿 B”^[5]。图 1 为机载激光拦截助推段弹道导弹试验的视频截图。

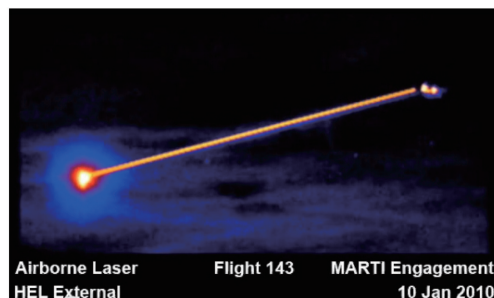


图 1 机载激光拦截助推段弹道导弹试验的视频截图

Fig. 1 Airborne laser intercept boost phase ballistic missile testing video capture

ABL 计划证明了用机载激光能捕获、跟踪和摧毁助推段弹道导弹,探讨了杀伤助推段弹道导弹的许多方面,同时也证明仍需克服许多令人生畏的科学、技术和工程挑战。由于 ABL 射程太短,它必须靠近敌方导弹发射阵地作战,生存能力低是其致命缺陷。此外,武器系统本身也存在许多缺陷,包括激光器笨重,限制了它的军事用途;技术复杂难于维护;运行时要消耗大量高活性的危险化学品,后勤支援既危险又繁重;而且试

验也证明在 12~14 km 空中,激光束的稳定性也存在问题。由于大幅提高激光武器的射程及大量使用危险化学品这些问题无法解决,再加之 ABL 武器部署成本太高,DOD 在 2011 年终止了 ABL 计划。

ABL 计划面临的关键问题是激光器的重量远远超过了最初的设计。原设计共有 14 个激光器模块,产生 2~3 MW 功率的光束,重 79.5 t。但 ABL 试验样机仅 6 个模块就重 82 t,仅产生 1 MW 的光束,射程仅为 80 km,这严重地限制了它的军事用途。课题组通过综合分析,认为其重量主要由下面三部分组成:

1) ABL 激光器的功率密度为 $55 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,要产生 1 MW 激光束的激光器重 55 t。

2) COIL 使用的化学燃料 H_2O_2 和 KOH 既重又多,它们的相对分子质量之和是 90,一般来说,相对分子质量越大,相对密度就越大。据估算要产生 1 MW 的激光,每秒钟需要消耗 100 kg 的化学燃料,再根据 ABL 的设计参数就可算出每次巡航需携带的化学燃料高达 20 t。

3) 束控/火控系统(包括旋转炮塔)重 7~8 t。

为了克服这些障碍,美国军方希望提高单个激光器模块的输出功率,改进束控系统,以及研发新型的 COIL(如电 COIL、电化学 COIL、全气相 COIL 等)^[6],但这些措施都收效甚微。提高激光器模块输出功率的关键是尽可能降低单态氧 $[\text{O}_2(^1\Delta)]$ 发生器中猝灭 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 的水,但 COIL 的发展已有 40 多年,液体 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 发生器已发展到相当成熟的阶段,因此不可能大幅提高输出功率。改进束控系统包括制造更好的透镜和反射镜、更好地控制抖动和改善大气传输,但 ABL 的兆瓦级激光束的发散趋势要比低功率激光束强得多,所以束控系统的性能也不会取得重大改善。而研发新型的 COIL 受经费和技术的制约进展也不大。由于无望获得重大的改进以实现原定的目标,ABL 计划以失败告终。

在导弹防御中,中段和末段防御技术已趋近成熟,而像 ABL 这样的助推段拦截技术还不成熟。美国政府责任署(GAO)早先在给国会的一份报告中认为,ABL 的 7 项关键技术中只有激光器的高功率光束技术是成熟的,其他不成熟的 6 项技术是:6 模块激光器、导弹跟踪、大气补偿、透射光学部件、光学镀膜和抖动控制^[7]。

另外,ABL 计划本身也存在一些问题,用 ABL 拦截助推段弹道导弹是崭新的革命性技术,是一项十分复杂而极具挑战性的系统工程。但 ABL 计划的制定者没有充分认识和预见到开发 ABL 的复杂性和风险,也大大低估了系统集成的难度,因而承诺过多兑现较少。同时快速建造样机,致使系统和部件未经充分试验、并作必要的改进就进行集成,导致了大量费钱和费时的返工。事实证明,制造独特的部件和开发软件需要更多的经费和时间。

3 美国 MDA 研发反导用无人 ABL 武器

最近在美国一流国家实验室取得高能激光技术突破性进展的基础上,美国正在实施一项新的光速导弹防御计划。装备了高效、电驱动、紧凑、轻重量激光器的高空无人机,能够击落处在助推段的弹道导弹。这有可能改变游戏规则,弹道导弹杀伤激光器有可能向美国军方提供一种新的跟踪和摧毁敌方弹道导弹的途径,而它的成本将大大低于目前部署的地基和海基拦截弹。

3.1 无人 ABL 武器反导的概念

实际上,无人 ABL 武器只不过是 ABL 的一个更新计划,它们的作战概念,面临的技术和战术挑战都是相同的,改变的只是用电激光器代替了化学激光器,用无人机代替了有人驾驶的大型飞机。但无人 ABL 武器也绝不是 ABL 的简单“回归”,而是采用了两项现代军事技术——无人系统和定向能,并把两者整合到一起,发展了一种具有两者优势的新型武器系统^[8]。当然,无人 ABL 武器能解决助推段的拦截问题,它就能用于执行其它的作战任务。

MDA 提出的概念是把一台高效、紧凑的电激光器集成进一架高空长航时的无人机里,它能击落几百公里外的助推段弹道导弹。无人机在 20 km 高空的平流层里飞行,并能在空中巡航 1 天或更长时间。平流层中的空气非常稀薄,这极大减少了激光束能量的损失。而且在 20 km 高空比较平静的大气中低速飞行,也大大降低了光束瞄准和大气补偿系统的复杂性,而这些是困扰 ABL 的重大挑战。

不同于 ABL 机组人员必须着陆休息和给化学激光器补充化学燃料,无人机能在空中持续巡航 24 h 或更长的时间。与化学激光器和常规拦截弹不同,电激光器只要有电力供应就能持续作战,而空中加油可以为

无人机提供持续飞行和补充为激光器产生电力所需的燃料。无人机的持续飞行与激光武器几乎无限的射击相结合,意味着单一的无人机可以持续在岗数天,从而不像 ABL 的作战概念那样需要 7 架 ABL 战机轮换上岗,这极大地降低了机载激光武器的部署成本。

更重要的是,电激光器能针对不同距离的不同目标调节激光功率,这使得它具有双重用途,除了用于助推段拦截外,它还可以用于对付敌方的战斗机和防空导弹进行自卫,从而提高了载机的生存能力。

实现这种高空无人 ABL 武器的关键是激光器,即使在理想的大气情况下对激光功率的要求都非常高,通常是兆瓦级的功率。此外,至关重要的还有激光器的重量问题,即对激光器的功率密度有苛刻的要求。由于无人机较小,它要求激光器的功率密度为 $5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 或更低。目前一般的电激光器的功率密度是 $50 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。美国通用原子公司的高能液体激光器(实际上是液冷的固体激光器)最近取得突破达到 $5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。MDA 的初期目标是 $5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$,最终目标是 $1 \sim 2 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ ^[9],这样产生 1 MW 功率的激光器仅重 1000~2000 kg,这是无人机可以承载的重量。

3.2 研发计划与现状

目前 MDA 并没有部署无人 ABL 武器的计划,它仅是一项实验室的研究计划,用以确定发展定向能技术作为导弹防御工具(特别是助推段拦截)的潜力、可行性和挑战。只有在作战、技术和经济方面切实可行时才有可能发展成部署计划。MDA 正在实施一条增量、步进式、以知识为基础的发展路线图,这与过去的快速和全面投资的方式完全不同^[10]。它将研发与试验高功率激光器,以建立装备高空无人机载平台的下一代激光系统的基础,确保在 2022 年前准备好用于执行导弹防御任务的高功率激光器技术。基于这一路线图,MDA 将与 DARPA 和空军合作发展一系列的核心部件,包括光纤发生器、高亮度高效的二极管抽运模块和高功率高效的光纤放大器。

MDA 计划为无人机载助推段拦截发展两种高功率激光器:DPAL 和 FCL,在 2015 年已分别在 LLNL 和 MIT/LL 演示了 13 kW 的 DPAL 系统和 44 kW 的 FCL 系统。2016—2017 年 LLNL 将演示 30 kW 的 DPAL 系统,光束质量为 1.5 倍衍射极限(DL)。2019 年将演示 120 kW 的 DPAL 系统,功率密度可能达到 $3 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ ^[11]。2017 年 LL 将演示 $7 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 的 30 kW FCL 系统,2018 年演示 $5 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 的 50 kW 系统。MDA 将在 2019 年评估国家实验室的 DPAL、FCL 和工业界研发的高功率激光系统,以便选择最佳的方法继续研究和制造后继的高功率激光器,并在此基础上在 2022 年制造一台 300 kW 级的激光器^[3]。MDA 希望在 2025 年实现能摧毁助推段弹道导弹的无人 ABL 武器^[12]。此外,MDA 还计划在 2017—2021 年研发一台 100 kW 的低功率激光器,并在 2021 年进行飞行试验,以便确定摧毁助推段弹道导弹的可行性^[13]。目前,DPAL 和 FCL 都处在技术成熟度 3~4 级,若要进行飞行试验则需要达到 6 级^[14]。

MDA 在 2016 年投资 5 千万美元发展这两种激光器和设计无人机载低功率激光演示器,并计划在 2016—2020 年间再对两个项目投资 5 亿美元^[15]。

在无人机方面,MDA 采用一台代用的高空长航时平台用仪表采集并表征了高空低马赫飞行环境,与此同时将开展平台的竞争。MDA 已用美国通用原子公司的“死神”和波音公司的“幽灵”无人机进行了多次激光瞄准试验。在成功完成的 5 次“幽灵”无人机飞行试验中,无人机飞到了 16.228 km 的创记录高度,从发射到着陆收集了超过 34 h 的数据^[16]。目前,波音公司研发的捕食者 C 型(复仇者)无人机载重是 1300 kg,MDA 也在考虑负载 2000 kg 或更高荷载的大型无人机。同时 MDA 也正在为中期的导弹防御任务和最终的助推段拦截研究远高于大气层的激光传输与控制。

3.3 问题与挑战

尽管美国国防部试图缓解 ABL 暴露出来的一些问题,但有些问题并不容易解决,特别是在敌方领空飞行所面临的挑战。由于地球物理和时间窗口的限制,实现助推段拦截难度很大,关键的问题是拦截的时间窗口很短和 ABL 武器的射程有限,迫使作战平台必须靠近敌方导弹发射阵地。而从理论上讲,这个平台是不受保护的,所以生存能力仍然是个难以解决的问题。无人机以低速在离目标 200~300 km 的敌方领空飞行,并不是一件容易的事情。激光无人机必须每时每刻靠近目标飞行,以便能在短时间窗口内摧毁意想不到的导弹发射,而自己不被击落,这似乎是不太可能的作战场景。即使是领土面积较小的国家,200 km 可能已在它的陆地之外,但无人机仍然处在敌方防空武器的射程之内,更不要说更大一些的国家。

激光无人机计划的最大挑战是研制出重量更轻、射程更远的激光器,以便它能集成进荷载更有限的无人机。相对于其它激光武器而言,MDA 设立了一个更高的标准。虽然美、德、以已经针对用于其他任务演示了多种数万瓦级的激光武器样机^[17],但击落处在助推段的弹道导弹则需要更高的功率、更远的射程和更好的光束质量,事实上这就要求具有比 ABL 武器更好的性能。

目前固体激光器(SSL)的功率仅几万瓦到 150 kW,技术将支持在 5 年内开发甚至部署 300 kW 或更高功率的 SSL。尽管将 SSL 的功率提高到 300~500 kW 并不存在物理问题,但非常紧凑的结构要耗散近兆瓦的热量,这在技术和工程上却面临着巨大的挑战。助推段拦截对激光功率要求高,重量限制严格,而集成进长航时无人机的要求更加剧了这一挑战。激光无人机要求激光器的功率密度小于 $5 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,MDA 要将两种新型激光器的功率密度从目前的 $30\sim 40 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ 降至 $5 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,既有希望又困难重重。而最终目标要降至 $1\sim 2 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ 却存在许多令人生畏的技术和工程挑战,更不可能是短期内能实现的。

为了研制出兆瓦级高功率,并具有尺寸小、重量轻和功耗低的激光系统,在技术和工程上面临的挑战是严峻的。就激光无人机而言,目前存在着 4 项关键性挑战:激光功率、光束质量、所用平台和所需的助推段杀伤力。

4 二极管抽运碱金属激光器

建造兆瓦级激光器存在许多严峻的挑战,而 DPAL 非常有吸引力,它综合了固体激光器和气体激光器的优良特性,有望获得非常高的效率,同时气体型 DPAL 能定标到单孔径兆瓦级的功率,使它能在军事和民间的高功率应用中大放异彩,已引起了人们日益广泛的关注。

自 21 世纪初 LLNL 的 Krnpke 倡议 DPAL,并在 2002 年冬与同事首次演示了采用铷蒸气共振跃迁激光器以来,DPAL 的基本工作物理学原理和激光装置设计原则已得到确认;通过建造数量众多的 DPAL,其光学和结构材料也已得到确认;也许更重要的是窄抽运二极管、二极管阵列和输出功率定标到几万瓦已取得重大进展。

4.1 DPAL 的原理、问题和特点

4.1.1 DPAL 的物理原理与问题

在过去 10 年里,SSL 在效率、功率、光束质量和紧凑度等方面都取得了巨大的进展。在 2009 年初,诺格公司的晶体板条激光器和达信公司的陶瓷板条激光器都产生了超过 100 kW 的输出功率^[18]。而通用原子公司的高能液体激光器在 2015 年产生了 150 kW 的高束质激光,功率密度小于 $5 \text{ kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,尺寸仅为 $1.3 \text{ m}\times 0.4 \text{ m}\times 0.5 \text{ m}$ ^[19]。SSL 只需要电功率,因此比较容易部署。但对固体材料而言,难以满足功率和光束质量的要求,这是因为在固体增益介质中产生的热-光畸变会引起光束质量下降,限制了它的单孔径功率输出。为了克服这个障碍,DPAL 用气体介质代替固体介质,使废热从激光腔中通过对流而被排出,这就有可能定标到单孔径兆瓦级的功率。

Krupke 早就预测 DPAL 能产生远超过 100 kW 的单孔径高质量光束,它们也能成为兆瓦级激光器的主要候选者,而 MDA 断言 DPAL 将提供奔向高效、电驱动、紧凑、轻量化高能激光器的路径,以对付未来的威胁^[20]。Yang 等开发了横向抽运 DPAL 数值模型,并探索折衷设计了兆瓦级的 DPAL。他们的研究表明,具有光-光效率超过 60% 的兆瓦级横向抽运 DPAL 是可能的,同时所有的其他参数也都是合理的,并能不久的将来实现^[21]。由于激光器的尺寸、重量和功耗取决于激光器的效率,而碱金属的量子数亏损很小,因此 DPAL 具有非常高的光-光转换效率。若采用高亮度的二极管或阵列抽运,则可以获得高的电-光效率,并能以超过 100 °C 的高温排出废气。这就给出了一个轻量的功率定标结构,使 DPAL 的质量/功率比和体积/功率比远低于其它的高功率激光系统。

DPAL 的物理现象是非常吸引人的,因为中性碱金属原子最外层只有一个价电子,它变成蒸气后避开了限制高功率 SSL 的热耗散问题。DPAL 是单个电子跃迁的三能级系统,中性碱金属原子有 3 个活跃的电子能级:基态能级 $n^2 s_{1/2}$,两个激发态能级 $n^2 p_{3/2}$ 和 $n^2 p_{1/2}$ 。DPAL 的能级跃迁如图 2 所示,在二极管抽运下碱金属原子由基态 $n^2 s_{1/2}$ 跃迁到激发态 $n^2 p_{3/2}$ (D_2 线),在被激发原子发生自发辐射之前,它与缓冲气体碰撞被快速弛豫到最低的激发态 $n^2 p_{1/2}$ (上能级)。受二极管的强抽运产生了具有极高小信号增益的粒子数反转。

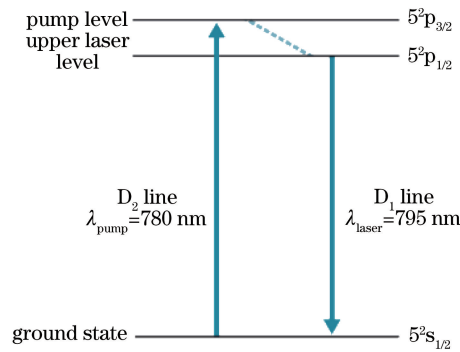


图2 二极管抽运碱金属激光器的能级和它们的跃迁

Fig. 2 Diode-pumped alkali metal laser level and their transition

当它们以受激发射的方式由 $n^2p_{1/2}$ 回到基态 $n^2s_{1/2}$ 时就导致共振 D_1 跃迁而产生了激光。

DPAL 的研究集中在钾、铷、铯(特别是铷)上,这是因为它们的 D 线有较长的波长,发展成熟的砷化铝镓(AlGaAs)激光二极管的工作波长就跨越在它们的 D_2 跃迁范围内(见表 1)。铷能抽运在 780 nm 的 D_2 线,这很容易从 AlGaAs 激光二极管获得,激光器发射 795 nm D_1 线。钠的 D 线处在黄光,如果有强的短波长黄光抽运二极管,原则上它也可用于激光器。

表 1 碱金属 D 线特性比较

Table 1 Comparison of alkali metal D line characteristics

Alkali atom	Pump line (D_2 /nm)	Laser line (D_1 /nm)	Quantum defect /%
Sodium	589.16	589.75	0.20
Potassium	766.70	770.11	0.44
Rubidium	780.25	794.98	1.90
Cesium	852.35	894.59	4.70

从表 1 中可以看出碱金属的量子数亏损很小,铯 4.7%,铷 1.9%,钾 0.44%,所以光-光斜率效率在理论上超过 95%。为了实现这样高的效率,需要精细的工程学。在低气压情况下,碱金属的线宽非常窄为皮米量级,而目前激光二极管阵列输出激光的线宽为 2~3 nm。为了实现高效的抽运,就必须采取措施使碱金属窄的吸收带与二极管阵列的 2 nm 发射带相匹配。目前采取的办法是窄化抽运源的线宽和加入氦缓冲气体通过碰撞适当加宽碱金属的吸收带。这包括两种策略:一是采用高压增益室(>1013.25 kPa)和具有适度光谱窄化(>100 GHz)的二极管阵列;二是采用低压增益室(~ 101.325 kPa)和使用具有极大光谱窄化(~ 10 GHz)的二极管阵列。在这两种情况下,抽运光谱宽度都能大于原子的吸收截面,这样就实现了高效的抽运^[22]。

碱金属蒸气是一类不同寻常的增益介质,其辐射寿命很短仅 30 ns,这就引起了另一个问题,即上能级的自发辐射率非常高,使碱金属激光器的增益介质无法储存能量。为了确保高效 DPAL 的增益和转换效率,需要加入像轻质烃乙烷这样的缓冲气体,在自发辐射发生之前通过碰撞使抽运到 $n^2p_{3/2}$ 的被激发原子快速弛豫到 $n^2p_{1/2}$ 能级。缓冲气体通过碰撞也使原子跃迁加宽到足以使它们的光谱均质,从而提高了对抽运辐射的吸收。但添加乙烷之后又带来了另外的问题。碱金属必须加热到能产生足够的蒸气压力,而碱金属热蒸气具有化学侵蚀性,它与碳氢化合物之间的化学反应将产生微粒污染物,这会导致激光阈值升高和输出功率下降^[23]。

功率定标是 DPAL 的关键技术之一,为了获得高的输出功率还有一个问题是寻求最佳的抽运几何结构。早期的 DPAL 用的是端面抽运,即抽运激光与输出激光同轴,它有较强的转换效率,而且若沿谐振腔长度抽运不均匀也不会造成光束质量下降。然而这种结构的热效应严重,因为这种设计取决于氦缓冲气体的热传导,由于沉积在增益介质中的废热必须传导到通过氦缓冲气体热传导造成的冷却表面,所以在高功率情况下谐振腔的宽度受限于在一维的方向不超过几毫米,以便把横向温度梯度限制在合理的水平,从而不会引起光束质量下降。显然,这种结构限制了抽运区域的大小,要求抽运源有异常高的功率密度。另外它还存在

抽运光与激光同轴可能带来较大的腔内损耗和抽运结构较为复杂等问题。

美国通用原子公司的实验证明横向抽运有希望获得较高的功率,这种结构可以从增益介质的两侧进行抽运和冷却来获得较大的抽运区,从而降低了对抽运源辐射强度的要求。此外,横向抽运从几何上分离了密集的抽运和发射波长,这就不需要复杂的光学器件或复杂的抽运几何结构,而当抽运光与输出激光同轴时则是很难分离的。横向抽运还降低了增益池窗口的光强,这就减小了光学损伤的概率。但横向抽运对抽运的均匀性要求较高,如果抽运不均匀容易造成光束质量下降。

目前发展的一项新技术是在横向抽出结构中采用非稳腔,它能提高模式重叠。模式重叠是指抽运光束与激光腔模式的匹配度,这对三能级增益介质至关重要,因为在抽运光束尺寸小于腔模式时要产生再吸收损耗^[24]。同时 DPAL 具有非常小信号增益,便于非稳腔中的模式控制,能获得很好的光束质量。

目前,DPAL 仍处于实验室研究阶段,所以还具备很广阔的开发空间,可以选择和设计抽运带宽、压强、原子和缓冲气体的种类、温度以及几何结构等。

4.1.2 DPAL 的特点

与化学、固体和光纤等高功率激光器相比,DPAL 有许多优良的特性,而没有其它高功率激光系统存在的一些问题。DPAL 的主要特性如下。

1) 量子效率非常高:铯 95.3%、铷 98.1%、钾 99.6%,这不仅对提高激光器的效率非常重要,而且能将热负载降至最低,缓解了热处理问题。

2) 光束质量非常好:气体介质非常均匀,同时由于降低了像差、吸收和散射中心及折射率波动而具有非常高的光束质量。另外流动性增益介质避免了如 SSL 中由热-光畸变引起的光束质量下降。因此光束质量可达衍射极限。

3) 可定标到高功率:DPAL 能通过简单地增加增益激光介质的体积和抽运源的数量而定标到高功率,而且不会像光纤激光器那样导致增益介质内部高的光强,这就意味着非线性效应和光学损伤不会成为 DPAL 的限制因素^[25]。

4) 重量小,安全性高:不使用危险的化学物质,并将构建一个密封室,从而不需要笨重的引射器向外排出有害的化学物质。

DPAL 的这些特性表明它最有希望成为具有高束质的高功率激光系统,有可能代替目前的一些激光系统用于科学、技术和军事等领域。

4.2 LLNL 研究高功率 DPAL 的进展与技术挑战

4.2.1 研究进展

LLNL 几万瓦 DPAL 的设计,采用了带非稳腔的横向抽运结构,有可能获得高的功率输出和光束质量。DPAL 长 1 m,标称输出功率 20~30 kW。它是一个无烃的系统,充氦气 2033.125 kPa,这既可以消除窗口污染,又可以采用带宽稍宽的二极管阵列抽运,降低了对半导体二极管线宽窄化的要求。DPAL 采用波导型增益室,增益室温度超过 100 °C。在增益室的窗口上形成了“之”字形光路^[26],避免了因抽运不均匀而造成光学质量下降。

2013 年通过放大增益池的尺寸,以及改进强光光学元件和光学涂层,创造了几项世界纪录,包括获得 3.91 kW 的最大输出功率和 DPAL 连续运行 4 min。2014 年进一步改进了增益室的窗口、二极管抽运阵列和增益室波导,以提高激光平均功率输出,DPAL 实现了 10 kW 功率首次出光。2015 年最重要的成果是演示了 DPAL 试验台的性能,输出功率达到 13 kW,同时具有高效和极好的增益介质热控。DPAL 累计运行时间超过了 100 min,无任何系统部件性能下降^[27]。2016—2017 年计划将 DPAL 试验台的功率提升至 30 kW,电-光效率达到 30%,光束质量达到 1.5DL。另外,将完成 10×12 二极管抽运阵列的集成,并演示提升二极管模块的坚固性和可靠性。

4.2.2 高功率 DPAL 面临的技术挑战

高功率 DPAL 面临的技术挑战主要包括二极管阵列、窗口污染和光学基片与涂层。

高亮度高功率抽运模块是研发高功率激光器的关键部件。早期 DPAL 演示仅限于几倍阈值的抽运强度,这造成了光学效率不高。就高效运行而言,系统需要超过 10 kW·cm⁻²的二极管光强抽运。最近完成的

铷激光器的强定标实验,在抽运光强高达 1000 倍阈值的情况下演示了光强的线性定标,也演示了将 DPAL 定标到超过 $1 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的抽运强度。高能激光二极管阵列的继续开发可以明显提高激光器的效率和功率,并且有利于小型化。

当增益室温度升至 $130 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,碱金属与乙烷之间的受激化学反应将生成碱性氢氧化物和碳,造成窗口污染,会吸收和散射抽运光。其后果是激光阈值升高和输出功率下降,特别是在较高温度的情况下会严重限制 DPAL 的功率定标。另外污染也降低了激光器工作的稳定性。针对窗口污染可能有两种解决办法,一是使碱金属-乙烷激光器工作在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,但这会造成输出功率下降;二是采用非碳氢化合物的缓冲气体,如工作在高压下的铷-氦激光器,就用氦气代替了碳氢化合物。实验已证明钾-氦、铷-氦激光器的高效工作,并解决了污染的问题。无烃 DPAL 可以工作在更高的温度和更高浓度的碱金属中,它可能是将 DPAL 功率定标到兆瓦级的唯一途径。

在强激光系统中,光学元件能承受的能量密度受到元件膜层激光诱导损伤和元件热畸变的限制,这已成为强激光系统发展的瓶颈。强光光学元件的发展方向是超低损耗非冷多层介质膜技术,目前美国薄膜公司已将膜层作到一百多层。光学元件材料的选择、光学加工和镀膜对激光光束质量有极大的影响。随着功率的提高并要求保持高的光学质量对光学元件的性能提出了非常苛刻的要求:镜面反射率 0.99999 ;表面的均方根粗糙度 0.1 nm ;激光损伤阈值数百 $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$;单个光学元件的总损耗(吸收与散射)小于 2×10^{-5} ,要达到这些要求难度非常大。

5 高功率光纤合成激光器

最近光纤激光器取得了重大进展,使它有可能成为激光武器的主要光源之一。它的电-光效率超过 40% ;其波导结构使其光束质量趋近衍射极限;其细长的一维结构使其散热性能好;全光纤系统由于没有对准直敏感的自由空间光学部件而更加坚固,能可靠地工作在恶劣的战场环境中。但受限于非线性效应、热效应和光学损伤,单模光纤激光器的输出功率限制在 10 kW ,要获得激光武器所需的更高功率,就需要采用光束合成技术,将多束低功率激光合成为高功率的单束激光。光束合成的目的是提高功率并保持高的光束质量。高功率高束质光纤合成技术的发展趋势是提高单个器件的输出功率和从非相干合成转向相干合成。

5.1 相干光束合成技术

为了获得高束质的高功率激光束,通常采用光谱光束合成和相干光束合成。光谱合成虽属非相干合成,但能获得近衍射极限的光束。而与相干合成相比,光谱合成提供了最高的桶中功率效率,因为相干合成相控阵的问题在于旁瓣,而旁瓣里的功率不会沉积到靶上^[28]。另外光谱合成不需要锁相,技术较易实现。但光谱合成的功率定标受可用光源光谱宽度、激光增益带宽以及功率和热耗散的限制^[29],因而它无法定标到兆瓦级的功率,课题组的另一篇文章评述了光谱合成技术在战术 ABL 武器中的应用。

相干合成是通过相控将多个波长完全相同的激光束的振幅同相位叠加,从而产生高功率和高束质的单一激光束。它不仅提高了合成光束的总功率,而且也提高了光束的亮度,如果子孔径的直径相同,采用相干合成在轴上的远场亮度是单束激光的 N^2 倍,是非相干合成光束亮度的 N 倍^[30]。这直接关系到激光武器的杀伤力,因为光束质量是决定激光武器杀伤力的重要因素。表征激光武器杀伤力的物理量是投射到靶上的激光亮度,也就是单位立体角中的功率密度,而亮度是与光束质量的平方成反比的。另外相干合成在原则上对功率定标没有固有的限制,实验证明光纤激光器相干合成技术是一条有效的具有高束质的功率定标途径。

激光通过大气传输产生的湍流效应将导致光束扩散、光斑抖动和相干性退化,通常湍流扩束比衍射极限大 $2 \sim 3$ 个量级。课题组的数值模拟表明在稠密的大气层中,激光射程大于 5 km 就需要采用自适应光学校正大气畸变,对中远程激光这更是无法回避的问题。相干合成的相控可同时实现锁相和湍流补偿,因此兼有补偿大气畸变的相干合成就成为研发相干合成的发展趋势。最近的演示试验已验证对大气湍流实现了亚毫秒时间长度的补偿,所有阵列单元之间实现了相长干涉,从而在目标上产生了高亮度的光斑。试验也证明光学相控阵对校正围绕飞机边界层的极端湍流也十分有效。

相干光束合成的主要问题是对各单束激光要求高和对大阵元激光器进行相控,系统复杂难于实现。相干合成需要单束激光具备特殊的属性,为获得高效的相干合成,各单束激光必须具有完全相同的波长、精确

的相位控制、窄的激光线宽和均匀的偏振特性。相控要对各单束激光的光程差进行远低于 $1\ \mu\text{m}$ 波长的匹配,以及综合控制所有各单束激光相干合成的众多参量。

在美国各军种的联合高功率 SSL 计划里,重点发展了晶体板条和陶瓷板条两种功率为 100 kW 的 Nd:YAG 激光器^[31]。2009 年,美国诺格公司将 7 个波前校正的 15 kW 主振荡器功率放大器(MOPA)激光链,经锁相获得了单孔径 105 kW 的功率输出,光束质量为 2.9 DL,电-光效率为 19%。图 3 给出了晶体板条 Nd:YAG 激光器的原理图。低功率 1064 nm 单频主振荡器的输出,为 1 W 掺镱光纤放大器提供了种子光。放大器的输出光被分束,其中一束采用声光调制器进行频移用作锁相的外差参考光,其他的子束用作每个 MOPA 链的输入。每个激光链从用作活塞控制的波导调相器开始,随后用一个高功率掺镱光纤放大器在子束进入一系列 4 个增益模块之前,将其放大到 200 W。增益模块是 4 kW 的传导冷却端面抽运板条放大器,采用一个双通角形多路传输结构将子束进一步放大到 15 kW。输出的畸变光束被整形以填满变形镜的有效面积,每个子束的取样送到哈特曼-夏克传感器,为闭环波前校正提供误差信号。

7 个 15 kW 子束的每一束并联进入光束合成子系统,每个子束的样本聚焦进活塞传感器并与频移参考光干涉重叠,所得的外差光束信号用于驱动处在每个子束低功率前端的调相器。每个子束的样本也聚焦进位置传感监测器,它提供的误差信号用于驱动每条激光链输出附近的高带宽倾斜指向校正镜;所得的输出是 7 个子束放大的波前校正赋形波束,它相当于一束单孔径的相干光束^[32]。

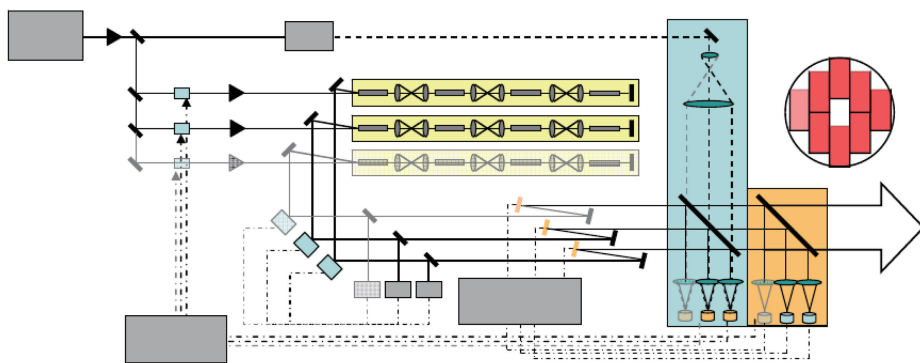


图 3 100 kW 晶体板条 Nd:YAG 激光器的原理图

Fig. 3 Schematic of the 100 kW Nd:YAG laser system

MIT/LL 领导了激光业界光束合成技术的发展,在过去的 10 年间取得了多项成果,包括光谱光束合成和相干光束合成。这些技术已应用到光纤激光器、二极管激光器和量子级联激光器。比较重要的演示包括 100 个 50 W 二极管激光器的光谱合成,8 个 500 W 光纤放大器的相干合成,47 个 40 W 二极管激光放大器阵列的相干合成,以及量子级联放大器的相干合成^[33], MIT/LL 最近又实现了 42 路和 101 路 1 kW 光纤放大器的相干合成。MIT/LL 的主要目标包括连续波功率和阵列级的定标,发展改进的控制系统和简化光束合成的体系结构。

5.2 MIT/LL 研发 FCL 的进展与技术挑战

5.2.1 研究进展

林肯实验室要为 MDA 研发尺寸小、重量轻和功耗低的高功率光纤激光系统,该系统包括激光器、电池和散热装置。它的主要目标是要大幅降低光纤放大器系统的功率密度,同时提高单个光纤放大器的输出功率。林肯实验室研发的是分孔径相干合成技术,它是激光相控阵的基础。2014 年激光器已获得 34 kW 的功率输出,系统的功率密度为 $40\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,它采用了 42 单元的光学相控阵和 1 kW 的光纤放大器。2015 年将输出功率提高到 44 kW,并将光束质量提升到近衍射极限。最近林肯实验室又演示了先进的 101 单元光学相控阵,它采用相位延迟法,通过调节一组相位调制器解决了光束同步的问题,产生了强大明亮的单光束^[34],这种方法控制光程差的精度高,而且响应时间快。林肯实验室在 2015 年还演示了 2.5 kW 的光纤放大器,大大提高了光纤放大器的输出功率。目前正在建造 $5\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ 的光纤放大器,将在 2018 年演示 $5\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ 的 50 kW 系统。图 4 为林肯实验室的 FCL 装置。



图4 林肯实验室的FCL装置

Fig. 4 Lincoln laboratory FCL set up

5.2.2 高功率 FCL 面临的技术挑战

高功率 FCL 面临的技术挑战主要包括光纤阵列发射体、光束合成技术、紧凑的光纤放大器和光学基片与涂层。

传统的光纤激光器一直是直接由二极管激光器抽运,但是二极管的有限亮度限制了高功率掺镱光纤激光器的输出功率。掺镱光纤放大器或激光器获得较高功率的关键是改用亮度更高的抽运源,用掺镱光纤激光器代替二极管作抽运源,因为前者的亮度比后者的亮度高 100 倍^[35]。因此下一步的工作将是定标放大连续光纤激光器阵列的强度。

要实现可见光和红外光的相干合成非常困难,因为每个激光器必须产生相同波长的激光,其振动平面必须精确地排成一排,而且各个波的波峰和波谷必须一致,这就需要紧密匹配多个光纤放大器的光程长度。因此相干合成面临的技术挑战是从所有发射体发出的各个光束必须在同一时间准确地到达远场平面的指定点,这就要求必须对所有发射体进行远低于 $1\ \mu\text{m}$ 波长的光程匹配。目前能够实现控制光程差的主要方法有匹配被动光纤法、空间光路调节法、光学延迟线法和光纤拉伸/相位延迟法,前三者能将光程差控制在 $1\ \mu\text{m}$,后者对光程差的控制精度可达 $0.01\sim 0.035\ \mu\text{m}$ ^[36],这些技术非常复杂,仍在研发之中。相干合成输出功率的进一步提高还面临提升单路光束的功率和光束质量、提高合成效率,以及大阵元系统的综合控制和集成。

要把高能光纤激光器集成进高空无人机,需要激光器的功率密度小于 $5\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ 。目前的高能 SSL 的功率密度一般为 $50\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,而 MDA 的 DPAL 和 FCL 实验室装置目前是 $30\sim 40\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,最终目标为 $1\sim 2\ \text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$,难度非常大。

光学基片与涂层是高功率激光器的共性问题,与前述 DPAL 相同。

6 结束语

与中段和末段拦截相比,助推段拦截具有威慑力、防御效能高、目标容易探测和易被摧毁,但助推段拦截的难度却远高于中段和末段。激光武器具有以光速作战、几乎无限的弹仓和作战效费比极高等特点,特别适用于助推段拦截。

美国 MDA 正在实施高空无人 ABL 武器计划,它将综合两项现代军事技术——无人系统和定向能的优势,研发用于助推段拦截的新型武器。与 ABL 相比,高空作战减少了能量损失,改善和简化了束控系统。长航时无人机的持续飞行与激光武器几乎无限弹仓相结合,极大地降低了 ABL 武器的部署成本。采用电激光器代替化学激光器,不仅可以降低激光器的体积和重量,避免使用危险化合物,而且可以根据不同距离的不同目标调节激光功率,使它具有双重用途。

目前正在研发用于战略防御的 DPAL 和 FCL 是当前世界上正在研发的唯一两种兆瓦级激光器,它们能定标到高束质的兆瓦级功率,电-光转换效率高($>40\%$),同时体积和重量很小。研发进展顺利,目前其功率已分别达到 $13\ \text{kW}$ 和 $44\ \text{kW}$ 。但高功率 DPAL 仍面临抽运源、窗口污染和光学基片与涂层的挑战。而高功率 FCL 则面临相干合成技术、紧凑型光纤放大器、光纤阵列发射体和光学基片与涂层的挑战。

激光无人机的设想很好,优点众多,但也面临许多令人畏惧的技术和战术挑战。目前仅仅是实验室的研

究计划,生存能力、长航时重负荷无人机的研制、兆瓦级激光器的功率定标、光束质量和小型化等都存在不确定性。它们现在还处在论证可行性的阶段,还必须从作战、技术和经济等方面证明切实可行才有可能得到进一步的发展,最后实现部署。

参 考 文 献

- [1] McGarry B. Pentagon eyes airborne lasers for missile defense[Z/OL]. (2015-07-13) [2017-02-24]. <http://www.defensetech.org/2015/07/13>.
- [2] Parsons D. Energy weapons ideal, but not ready for tactical air defense[N/OL]. Defense Daily, 2015-07-28 [2017-02-24]. <http://www.defensedaily.com/kendall-energy-weapons-ideal-but-not-ready-for-tactical-air-defense>.
- [3] Missile Defense Agency. Department of defense fiscal year (FY) 2017 president's budget submission[Z/OL]. [2017-02-24]. <http://www.docin.com/p-1477155476.html>.
- [4] Syring J D. Developing new capabilities, before the senate appropriations committee subcommittee on defense[Z/OL]. (2015-03-18) [2016-02-24]. <https://www.appropriations.senate.gov/imo/media/doc/hearings/031815%20Vice%20Admiral%20Syring%20Statement%20-%20SAC-D.pdf>.
- [5] Qi Yu. Live round interception test analysis of airborne laser[J]. High Energy Laser Research & Development, 2010, 34(1): 1-3.
齐予. 机载激光实弹拦截试验情况分析[J]. 强激光研究与发展, 2010, 34(1): 1-3.
- [6] Ren Guoguang, Huang Yunian. Developing status and future of airborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(5): 309-314.
任国光, 黄裕年. 机载激光武器的发展现状与未来[J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 309-314.
- [7] Duffy T. GAO review gives mayor missile defense programs fair to low marks[J]. Inside Missile Defense, 2004, 10(8): 1, 6-7.
- [8] Freedberg S J. Return of the ABL? Missile defense agency works on laser drone[N/OL]. Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2015-08-27 [2017-02-24]. <http://csbaonline.org/about/news/return-of-the-abl-missile-defense-agency-works-on-laser-drone/>.
- [9] Harper B J. Missile defense agency pursuing new airborne laser system[Z/OL]. (2016-01-19) [2017-09-19]. <http://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2016/1/19/missile-defense-agency-pursuing-new-airborne-laser-system>.
- [10] Sputnik. US missile defense agency developing laser drone[Z/OL]. (2015-08-19) [2017-02-24]. <http://www.defencetalk.com/us-missile-defense-agency-developing-laser-drone-65047/>.
- [11] Syring J. Ballistic missile defense system update[R/OL]. [2016-02-24]. <https://www.csis.org/events/ballistic-missile-defense-system-update-1>.
- [12] Missile Defense Agency. Advanced technology[Z/OL]. (2016-07-28) [2017-02-24]. <https://www.mda.mil/global/documents/pdf/advsys.pdf>.
- [13] Abott R . MDA seeks \$ 23 million in FY'17 to develop airborne laser that can defeat missiles[N/OL]. Defensedaily Network, 2016, 2016-04-25 [2017-09-19]. <http://www.defensedaily.com/mda-seeks-23-million-in-fy-17-to-develop-airborne-laser-that-can-defeat-missiles/>.
- [14] Sweetman B. Solid state laser show new promise[J]. Aviation Week & Space Technology, 2015, 177(16): 57.
- [15] Sherman J, MDA charts \$ 1.3B course to new UAV-borne missile-killing laser before 2020[J]. Inside the Pentagon, 2016, 32(4): 1, 10-12.
- [16] Derw J. The MDA will winnow the field to two teams to carry forward its UAV-borne laser experiments[J]. Aviation Week & Space Technology, 2016, 178 (17): 46-47.
- [17] Ren Guoguang, Yi Weiwei, Qu Changhong. High-power fiber lasers and their applications in tactical laser weapons[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1145-1151.
任国光, 伊伟伟, 屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1145-1151.
- [18] Hecht J. A new generation of laser weapon is born[J]. Laser Focus World, 2010, 46(4): 36-39.
- [19] Sweetman B. General atomic claims laser breakthrough[J]. Aviation Week & Space Technology, 2015, 177(3): 30-31.

- [20] Hecht J. Diode pumping enables a new approach to alkali-vapor lasers[J]. *Laser Focus World*, 2011, 47(4): 49-53.
- [21] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs)-a review[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(1): 4-28.
- [22] Perram G. Intensity scaling for diode pumped alkali lasers [Z/OL]. (2012-12-06) [2017-02-20]. <http://spie.org/newsroom/4560-intensity-scaling-for-diode-pumped-alkali-lasers>.
- [23] Zhdanov B V, Knize R J. Advanced diode-pumped alkali lasers[C]. *SPIE*, 2008, 7022: 70220J.
- [24] Gao F, Chena F, Xie J J, *et al.* Review on diode-pumped alkali vapor laser[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4353-4358.
- [25] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Diode pumped alkali lasers: History, current state and perspectives[C]. *Lasers & Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference*, 2011: 12189904.
- [26] Page R H, Boley C D, Rubenchik A M, *et al.* Diode pumped alkali vapor lasers—A new pathway to high beam quality at high average power[R/OL]. (2005-05-06) [2017-02-24]. <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/15016696>.
- [27] MDA. Exhibit R-2, EDT&E budget item justification[Z/OL]. [2017-02-20]. <https://www.mendeley.com/research-papers/exhibit-r2-rdte-budget-item-justification/>.
- [28] Warwick G. Inside lockheed Martin's fiber-laser weapon[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 177(21): 40-41.
- [29] Sanchez-Rubio A, Fan T Y, Augst S J, *et al.* Wavelength beam combining for power and brightness scaling of laser systems[R/OL]. [2017-02-20]. https://ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol20_no2/20_2_3_Sanchez.pdf.
- [30] Wagner T J. Fiber laser beam combining and power scaling progress: Air force research laboratory laser division[C]. *SPIE*, 2012, 8238: 823718.
- [31] Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(9): 62-69.
任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(9): 62-69.
- [32] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, *et al.* 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2009: 10842589.
- [33] Lincoln Laboratory. Beam combining[Z/OL]. [2017-02-21]. <http://www.ll.mit.edu/mission/electronics/Ita/beam-combining.html>.
- [34] Lincoln Laboratory. MIT Lincoln laboratory demonstrates novel laser at technology expo [Z/OL]. [2017-02-21]. <https://www.ll.mit.edu/news/wait-what.html>.
- [35] Hecht J. Fiber laser ramp up the power[J]. *Laser Focus World*, 2009, 45(12): 53-57.
- [36] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, *et al.* Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0201001.
王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201001.