

战术激光武器的发展动向

程勇 郭延龙 唐璜 朱孟真 米朝伟 谭朝勇 黎伟 陆益敏 黄国俊

武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075

摘要 机载、星载、舰载、车载等不同平台应用的战术激光武器发展现状表明, 尽管现有系列试验都只能在较近射程上打击火箭弹、无人机等目标, 但却体现了战术激光武器的实战前景。战术激光武器的关键技术主要有高能脉冲或脉冲/连续复合固体激光器技术、合束技术等。激光武器的发展趋势已由超高功率战略威慑转向中低功率战术应用; 舰载激光武器有望成为最先实战装备; 天基激光武器由于其具有极高的战略价值、无大气影响的绝佳的太空工作环境, 以及无需太高的激光功率等优点, 成为激光武器研究的重要方向之一。激光武器在不久的将来会成为改变现有战争形态的一种颠覆性武器。

关键词 激光光学; 激光武器; 合束; 天基激光武器

中图分类号 TN977 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.110004

Development Trend of Tactical Laser Weapons

Cheng Yong Guo Yanlong Tang Huang Zhu Mengzhen Mi Chaowei Tan Chaoyong
Li Wei Lu Yimin Huang Guojun

Institute of Opto-Electronics Technology, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075

Abstract Recent development of aircraft-based, satellite-based, ship-based and vehicle-based tactical laser weapons shows the practical prospects of tactical laser weapons, although existing series of experiments could only beat targets like rockets, unmanned aerial vehicle and so on at short range. Key technologies of tactical laser weapons include high energy pulse or composite (cw and pulse together) solid laser technology, beam combination technology, etc. The development trend of laser weapons has made a transition from super high power strategic overawe to low power tactical application. The ship-based laser weapons are expected to be the first actual combat equipment; the development of space-based laser weapons is one of the important directions of laser weapon research because of their important strategic value, the ideal working condition in space without air and no need of high laser power. In the near future, laser weapons will be the subversive weapons that can change existing war forms.

Key words laser optics; laser weapon; beam combination; space based laser weapon

OCIS codes 140.3580; 140.3298; 140.3390

1 引言

激光武器是利用高能激光束的热效应、力学破坏特性、辐射破坏特性等直接杀伤目标的一种定向能武器。作为颠覆性武器^[1], 激光武器一直受到各军事强国的青睐。早在激光器发明之初, 人们就设想利用“速度快无需提前量、辐射强度高、摧毁威力大、单发成本低”的“光弹”作为打击手段^[2], 尤其在里根星球大战计划期间, 激光武器研究一度达到巅峰, 其目的是研制具有百千瓦以上输出功率的激光武器^[2-4], 对百公里以外的导弹、卫星等战略目标实施毁伤。然而由于政治、经济和技术等因素的限制, 这一目标迄今尚未实现。

随着军事技术的发展^[5], 诸如导弹、高超声速飞行器等新型武器相继投入实战, 现有武器技术基本达不到预警与拦截响应时间的要求, 难以应对这些“高超声速飞行、高机动变轨与旋转、高精度打击破坏、高隐身飞行”的新威胁。而战术激光武器是应对这些威胁的有效手段、重要选项和发展方向^[5]。战术激光武器是指

收稿日期: 2016-07-01; 收到修改稿日期: 2016-08-03; 网络出版日期: 2016-10-09

基金项目: 国防预研基金(51302010206)、国防探索基金(7131029)

作者简介: 程勇(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光技术与工程方面的研究。E-mail: gdyjs@263.net

利用数万瓦以上的高能激光作为“光弹”，像常规武器那样安放在飞机、卫星、舰船、车辆等运动载体上，直接打击数公里以外的军事目标，如无人机、炮弹、快艇、敌方人员、车辆、光学传感器、卫星、导弹和飞机等。

目前，美国、俄罗斯等军事强国的激光武器已具备战略威慑能力。然而，由于大气的衰减和远距离传输时光斑发散，随着传输距离的增加，激光武器的实际打击效果大打折扣^[6]。现有激光技术难以实现大气中远距离硬毁伤战略打击，但在较近距离内体现了战术激光武器不可替代的实战应用前景^[7-8]。2012年12月，美军首次使用激光武器成功击落1.6 km外的火箭弹、无人机等战术目标，标志着战术激光武器进入新的发展时代。

小型、可靠、高效、高光束质量、高功率的激光器技术是战术激光武器发展的核心^[9-10]。舰载激光武器有望最先投入实战应用，天基激光武器是重要发展方向之一。本文着重介绍了高能脉冲毁伤效能、相干合成固体激光器等关键技术，并对战术激光武器的发展进行展望。

2 战术激光武器发展现状

近几十年来，激光武器的对抗目标已由洲际导弹等远距离大目标逐渐转向火箭弹、无人机等近距离小目标，激光武器耗资极为巨大，现有激光技术短期内难以实现兆瓦级激光器的小型化、机动化、实用化，这些因素使激光武器研究的重点由超大功率、大体积、基于气体(化学)激光器的战略激光武器逐渐转向较低功率、小体积、基于固体(尤其是光纤)激光器的战术激光武器。战略激光武器项目如星载战略激光武器(SBL)、机载战略激光武器(ABL)、地基战略激光武器(鸚鵡螺)等纷纷下马。联合高功率固体激光器(JPHSSL)、车载高能激光技术演示器(HELTD)、耐用电子激光器(RELI)、舰载激光武器系统(LaWS)、舰载战术激光武器系统(MK38-TLS)等战术激光武器项目按计划取得成功，并在各种载运平台上继续进行实验和应用研究。

近期代表性的激光武器主要有以下项目：2012年，美国陆军和波音公司联合发展的激光战车(HELMD)，采用10 kW的薄片激光器实现了对2 km距离的炮击炮弹的打击；2013年，美国洛克希德·马丁公司发展的车载激光炮“区域防御弹药拦截系统”(ADAM)，成功演示了对1.6 km外火箭弹的拦截；美国海军的海上激光演示(MLD)项目，采用诺·格公司研制的105 kW激光样机，2011年在圣尼古拉斯岛附近海域成功引燃1.6 km外的移动无人小船；2014年，美国海军在“庞塞”号军舰上采用LaWS实现了对海上目标的摧毁；2012年，德国莱茵金属公司研发的“天空卫士”击落了2 km外的靶机；2014年，以色列研制的以高功率固体激光器为激光源的“铁束”(Iron Beam)激光武器系统拦截了最大距离达4.5英里(约7.24 km)的迫击炮弹和火箭弹。

2.1 化学激光武器需向小型机动、战术应用方向发展

化学激光器(主要有氧碘、氟化氙等)具有体积庞大、质量大(产生1 kW激光需要55 kg)、难以机动、发射次数有限、且使用中有毒气排放等弊端，尽管其输出功率可达数百千瓦以上，但难以安放在小型机动载体上，其战术应用是当前发展的瓶颈，总体发展呈现逐步终止或淘汰的趋势。

美国发展的化学先进战术激光器(ATL)由波音公司负责，NC-130H平台搭载，拟采用功率为200 kW的氧碘化学激光器，在锁定目标后的6 s内将其摧毁，作战距离超过10 km。2009年9月，进行了首次空对地(8~10 km)高能激光打击实验，摧毁了1辆无人车，但作战效果仍不够理想^[11]。

美国和以色列合作的“战术高能激光器”(THEL)和21世纪初的衍生型号“机动战术高能激光器”(MTHEL)都采用了化学激光器。MTHEL是一种小型的车载激光器，用于击落飞机、近程导弹、火箭弹等目标。在2001年的动靶实验中，其击落了20多枚火箭弹，但由于化学激光器难以小型机动和战术应用，MTHEL在2005年被迫终止^[11]。

2.2 世界各国争相发展多平台战术固体激光武器

固体激光器的增益介质主要有棒状、碟片、板条、光纤等几种类型。采用半导体抽运，固体激光器可获得大功率、高能量、高亮度输出，且具有效率高、小型化和稳定性好等优点，是当今世界各国战术激光武器发展的方向。近年来固体激光器相关技术不断取得突破，例如商业化的碟片激光器输出功率已达16 kW^[12]，工程化的单模光纤激光器输出功率已达10 kW，多模光纤激光器输出功率已达50 kW，这些进展为固体激光武器走向实战铺平了道路。

2.2.1 空基和天基激光武器研究现状

空基和天基激光武器因其在使用过程中的必要性和优越性,依然是军事强国抢占的战略高地^[11]。搭载约 6 枚超声速导弹的飞机,在同等条件下如果挂装战术激光武器的话,能够以光速实施几百次发射,可以非常理想地拦截高速导弹或飞机。因此,尽管仍面临许多技术难题和战术运用的挑战,美国依然期望用机载激光武器逐步取代导弹^[13]。

美国空军“持久”专项脱胎于“亚瑟王神剑”项目,被美国国防部高级研究计划局(DARPA)纳入了 2014 财年预算申请中^[13],旨在发展由飞机配装的吊舱式激光武器,可击落来袭导弹。美国国防部国防高级研究计划局已分别授予诺斯罗普·格鲁门公司和洛克希德·马丁公司一份成本加固定费用合同,用于该项目研究,具体研究相干光相控阵列技术^[13]。

将激光器搭载在高空无人机上是一项实用的举措。由于无人机飞行高度很高,因此可以最大程度上避免大气环境和云层对激光武器运用的不利影响^[13]。2015 年 2 月,美国国防部导弹防御局(MDA)在 2016 财年预算中,通过“定向能研究”(DER)项目安排了高空无人机激光探测和拦截助推段弹道导弹的研究工作。导弹防御局和国防部高级研究计划局将在 DER 项目中合作建造 1 台 50 kW 的合成光纤激光器,并在 2017—2018 财年将其功率提高到数百千瓦,并最终提高到兆瓦级。在 2015 年第 18 届年度空间与导弹防御的大会上,美国导弹防御局局长、海军中将詹姆斯·赛宁透露,美军将在 2021 年前后试飞用于打击助推段导弹的“低功率激光演示样机”,目前已对两款无人机开展相关研究。

天基激光武器的研究涉及政治问题和空间安全,具有尖锐的敏感性,往往隐藏在激光清扫空间碎片、空间激光通信与传能等科学研究掩护的项目中。法国报道了用于清扫空间碎片的天基激光器方案^[14],计划采用数万根单脉冲能量为 1 mJ 的光纤激光器,合束至 100 J 能量。2015 年,日本报道了与法国合作的激光检测和清除碎片方案,此方案兼具高功率和高频率的特点,通过使用国际空间站日本实验舱的宇宙空间天文台(JEM-EUSO)超视场望远镜,实现了侦测与打击一体的功能(见图 1),寻找并击落 100 km 之遥的直径为 1 cm 的太空垃圾,并使这些太空垃圾脱离轨道进入大气层燃烧^[14]。日本还将在 2019 年创建太空监测部队^[15]。2014 年,美国公开了天基激光武器专利,采用激光传递能量的方式,利用卫星群给一颗特定卫星上的大功率激光器进行供电^[16],用于对敌方卫星或地面目标进行激光打击。

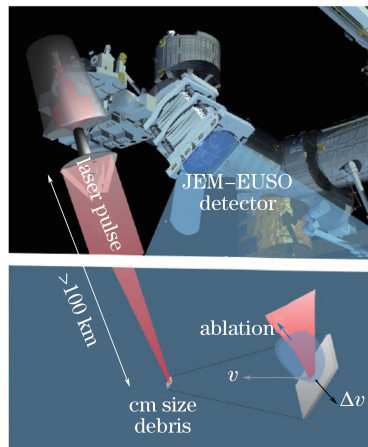


图 1 日本与法国合作的天基激光器方案

Fig. 1 Space based laser demonstrator by Japan and France

2.2.2 舰载战术激光武器研究现状

经过近半个世纪的研究,美军最终将具有作战意义的定向能武器(舰载激光武器)投入战场。虽然可击落弹道导弹的兆瓦级激光器眼下尚遥不可及,但用战术激光武器来对付造价低的无人机和小艇等威胁是一种经济有效的方式。

美国海军长期致力于舰载激光武器的研究,并在多个项目中对该研究予以支持^[17]。海军激光武器系统采用光纤激光器^[18-19]和固体激光器技术路线并行推进,主要由雷锡恩公司、诺格公司、波音公司、达信公司等研制,经过 10 kW 和 30 kW 功率水平动态测试,正在向 100~150 kW 级功率发展。美国海军 2015 年 8 月

宣布位于波斯湾的“庞塞”号两栖舰上的“激光武器系统”成功通过所有测试,其正式编号为 AN/SEQ-3,功率为 30 kW,内部集成 6 套 5.4 kW 的光纤激光器,每套激光器由 7 台 800 W 的光纤激光器组束而成,下一步计划采用 10 套激光器非相干合成到 150 kW。同时,美国海军启动固体高能激光武器系统(LWSD)项目,旨在导弹驱逐舰、近海战斗舰等舰上部署激光武器系统,预计 2017 年后形成战斗力^[17]。

2.2.3 车载战术激光武器研究现状

陆基车载战术激光武器系统是当今世界各国发展的重要方向,发展的目标是将 10 kW 以上高能固体(含光纤)激光器安装在轮式或履带车辆上,对 1 km 以外迫击炮弹等目标实施硬毁伤。2015 年 8 月,波音公司宣布其紧凑式激光武器系统(CLWS)击落 1 架无人机^[20]。在测试中,对 1 架无人机进行了连续 15 s 的激光照射,最终把它摧毁。该系统重达 295 kg,功率范围为 2~10 kW。波音公司的“高能激光移动展示系统”(HEL MD)是由美国军方建造并展示的一种移动式高能激光武器。它是将 1 台光纤激光器装备在 1 辆 3.675×10^5 W 的 8 轮卡车上。2014 年,在 2 km 距离击落迫击炮弹,在 5 km 距离击落大型无人机。美军计划缩小其体积,在 2017 年完成 60 kW 系统的验证,于 2022 年进行 100 kW 武器系统的实验^[21]。

2015 年 5 月,《俄罗斯报》的文章暗示俄罗斯的国营工程师们目前正在秘而不宣地恢复研发苏联时代开发的坦克与车辆载运的激光武器系统^[22]。

2015 年 3 月的阿布扎比国际防务展上,德国莱茵金属公司展示并演示了安装高能激光系统的“拳击手”8×8 多用途装甲车。其包括两种型号,功率分别是 5 kW 和 10 kW,两种系统都采用了基于光束叠加技术的专利设计,有效攻击距离是 3 km^[23]。2015 年 9 月,在伦敦举行的英国国际国防与安全设备展上,该公司又展出了一款新型车载激光炮,炮上装有 4 组高能激光发射器,每组 20 kW,叠加技术使之凝结为 1 束 80 kW 的强大光束^[24],如图 2 所示^[25]。



图 2 德国莱茵金属公司激光武器

Fig. 2 Laser weapon of Germany Rheinmetall GmbH

2014 年,中国工程物理研究院等单位研发的“低空卫士”系统在演示验证实验中成功击落固定翼、多旋翼、直升机等多种小型航空器 30 余架次,击落率为 100%。该系统发射功率近万瓦,低空有效护卫面积为 12 km²,能在 5 s 内精准拦截固定翼(半径为 2 km,360°空域)等多种航空器,具有快速、准确、无附带损伤的特点。

2.3 基于合束的光纤战术激光武器是当今研究热点

合束或相干合束是获取高功率、高亮度激光和远距离传输的有效途径,也是战术激光武器实现 10 kW 以上功率量级输出的关键技术。作为目前世界上最先进的固体激光器——光纤激光器具有独特的优势,包括光束质量好、效率高、柔软细长、口径小且易于组束等,极大地促进了相干合成或光谱合成技术的发展,它已广泛应用于战术激光武器^[2]。

1) 2011 年美国麻省理工学院(MIT)采用商业化的 0.5 kW 掺 Yb 光纤放大器,实现了 8 路光纤放大器相干合成,合成效率达 78%,总的输出功率达 4 kW,满功率时的光束质量达 1.25 倍衍射极限,如图 3 所示^[26],图中 FPGA 表示现场可编程门阵列,SPGD 表示随机并行梯度下降法。这是截至目前最具代表性的研究成果,即 8 束激光相干合成后远场光强分布轴上的光强达到单束激光远场光强的 50 倍。

2) 美国诺格公司 McNanght 等^[27]在最近进行的 3 路光纤合束样机实验中,用 3 kW 的输入功率获得了近衍射极限的 2.4 kW 光束输出(合成效率与光纤激光器的功率无关),他们认为利用二维阵列和衍射光栅元件的几何结构,可以将相干合成的光纤功率定标到 100 kW。

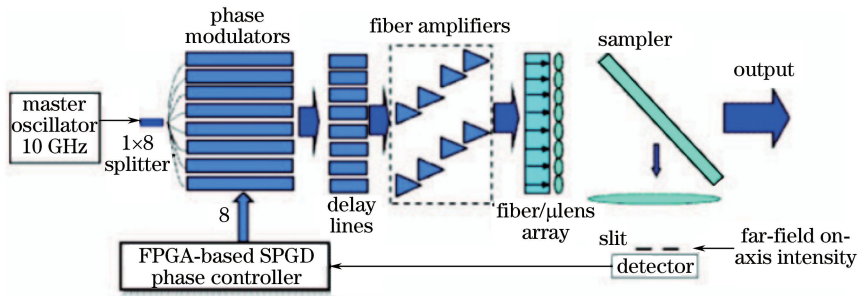


图3 光纤相干合成方案图

Fig. 3 Fiber coherent combination design

3) 美国空军实验室最近利用光学相干锁定的专利技术,将16台窄线宽的90 W光纤激光器排列成二维 4×4 的激光阵列,相干合成为1.45 kW的单一激光束^[28]。

4) 2012年国防科学技术大学刘泽金团队采用SPGD,实现9路光纤激光器相干合成输出功率达1.8 kW^[29]。

以上技术的突破,为光纤战术激光武器的开发和应用奠定了基础。

为应对小型空基和海基目标,洛克希德·马丁公司研发了“先进测试高能武器”系统(简称ATHENA,又称“雅典娜”),该系统采用“多波长光束组合”技术,模块化设计,激光能量可以按照特定任务的需求自由选择^[30]。2015年3月,他们采用30 kW功率的光纤激光器迅速烧毁了1.6 km之外的汽车发动机歧管,该武器模块将成为美军60 kW车载激光武器系统的核心。2015年10月,洛克希德·马丁公司宣布在Bothell开始生产该系统^[31]。雷锡恩公司采用6路光束合成技术,在庞塞号舰上安装了30 kW光纤激光武器系统。

德国莱茵金属公司和欧洲导弹集团(MBDA)公司均采用光束叠加技术,开展多载运平台,尤其是车载光纤激光武器的研制。分别研制出5,10,40,50,80 kW等多型激光器^[32-34],最终将达120 kW目标^[35]。其中,莱茵金属公司10 kW光纤激光武器已安装在“拳击手” 8×8 多用途装甲车的高能战术激光武器系统和瑞士厄利孔公司“天空哨兵”35 mm高炮系统的炮塔武器系统中^[36],未来也可装在空中客车公司A400M飞机内^[37]。

3 激光武器关键技术

激光武器系统主要由激光器、跟踪装置、瞄准装置、发射天线、控制系统、供电系统、散热系统等部分组成,涉及的关键技术很多,这里主要关注激光器技术和激光损伤机理。

3.1 脉冲或复合固体激光器是高效毁伤的关键技术之一

根据激光武器已公开的技术路线,国际上普遍采用连续激光工作制式。仿真和实验表明它存在以下弊端。

1) 作战时间长。一般需要持续对准特定区域数秒钟,对跟踪瞄准系统的要求极高。计算表明^[38],对于壁厚为10 mm的战斗部,辐照时间需要3.18 s;对于壁厚为15 mm的战斗部,辐照时间远大于5 s。

2) 某些旋转的目标(例如战略导弹)使激光武器无法对某一点进行烧蚀,无法造成损伤。计算表明^[38],导弹自旋时熔穿助推器壳壁需要的时间大于80 s。

3) 高速飞行器等新型威胁目标飞行速度越来越快,表面抗高温能力强,连续激光对其加热慢,难以有效损伤。

4) 连续激光器供电消耗大。

脉冲或复合固体激光器是高效毁伤的关键技术之一。早在2002年,法德圣路易斯研究所发现,相比于连续二氧化碳激光,同等功率的脉冲二氧化碳激光器能在更短时间内对半导体靶材造成更剧烈的损伤^[39]。

2008年,美国利弗摩尔国家实验室采用热容脉冲固体激光器(125 J/200 Hz/500 μ s/25 kW),对1.8 mm厚的铝板实现了0.07 s超快杀伤。此外,俄罗斯采用钎玻璃长脉冲激光武器击穿了500 m外的直径为150 mm的钢柱。美国DILAS公司2012年报道了其军用高功率脉冲半导体激光器(LD)的研究进展,他们已研制出波长为766~992 nm、占空比为25%、峰值功率为1000 W、脉冲宽度为10 ms、重复频率为25 Hz、

工作温度为 45 °C 的新型 LD。这既为脉冲固体激光武器奠定了技术基础,也暗示了美国正在发展脉冲激光武器^[40]。脉冲激光的高效损伤机理,以及连续激光和脉冲激光复合损伤机理值得关注,有望成为战术激光武器发展的方向之一。

本课题组也进行了连续、脉冲以及连续/脉冲复合激光烧蚀钢板的理论和实验对比研究。理论计算的初始条件为:靶材为钢板,厚为 3 mm,靶面上激光光斑半径为 1 mm,光场强度呈高斯分布,环境温度为 298 K,钢板表面对流散热系数是 20 W/(m²·K)。Ansys 有限元仿真计算表明,采用波长为 1.06 μm 的连续激光(2000 W)烧蚀 10 s 后,中心点温度达 1680 K,靶材由光斑中心向外扩散形成熔化区与加热区,铁板的中心温度初始上升极快,但由于热传导、热对流、热辐射效应的存在,热量难以聚集,并向外扩散,导致中心温度上升变缓,直到约 25 s 之后,光斑中心温度为 1825 K,略高于铁的熔点,在这段时间内几乎未产生大的烧蚀效果。

采用波长为 1.06 μm、平均功率为 100 W 的脉冲激光(10 J、0.5 ms)时,脉冲能量瞬间作用在光斑大小的金属靶材上,光斑辐照位置的靶材来不及与周围靶材进行有效换热,仅有极小区域存在温升,所以温升极快,短时间内就可以使靶材超过熔点甚至产生等离子体,并产生激光维持的爆轰波(LSD)。脉冲激光除了具有和连续激光相同的热效应外,还有一定的力学效应。金属蒸气或等离子体的流体力学运动,以及脉冲激光开始和结束时的热冲击引发的应力都构成了脉冲激光对靶的力学效应。在单脉冲的作用下,烧蚀铁板质量为 2.33×10^{-6} kg。

针对同样的金属靶材,采用上述脉冲激光和连续激光组成的复合激光进行烧蚀。当脉冲激光先到达靶材时,可快速提高靶材表面吸收率,最高可达 70%,提高了激光的利用率。当连续激光先到达靶材,预加热使靶材温度升高,此时靶材的杨氏模量、屈服强度不断降低,破坏强度下降,材料表面对激光的吸收系数也随之提高;当脉冲激光作用靶材时,叠加的高功率密度激光形成高温高压蒸气和等离子体,产生巨大的力学效应,使部分尚未熔化的金属脱离靶材,从而使剥离温度小于熔点。复合激光损伤会造成更大更深的烧蚀孔,若获得同样的烧蚀效果,相应所需的复合激光功率可大大降低。在单脉冲的作用下,烧蚀铁板质量为 2.91×10^{-5} kg。

不同制式激光烧蚀铁板的效果如图 4 所示。对比实验中,连续激光器采用碟片激光器,波长为 1.064 μm,最大输出平均功率为 2000 W;脉冲激光器采用自行研制的半导体激光器抽运的 Nd:YAG 固体激光器,波长为 1.064 μm,脉冲宽度为 0.5 ms,单脉冲能量为 10 J,重复频率为 1~20 Hz。两台激光器分别通过焦距为 1 m 的透镜聚焦在靶材上同一位置。实验表明,对同样厚度的铁板,连续激光即使烧蚀 10 s 也只能烧红而不能烧穿或留下明显凹坑,而脉冲激光单脉冲即可打出直径约为 1 mm 的小孔,如图 5 所示。这表明复合激光的烧蚀效果约是脉冲激光烧蚀效果的 13 倍。

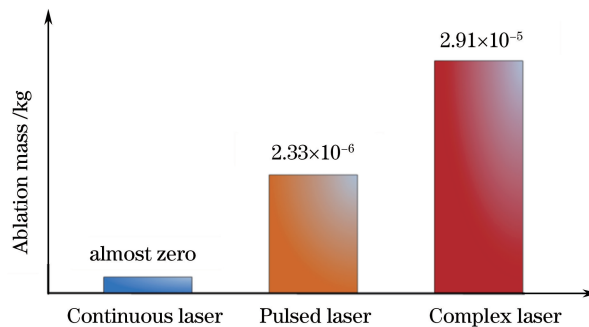


图 4 不同制式激光烧蚀铁板的效果

Fig. 4 Ablation effect of lasers of different types

理论计算和实验表明,与连续激光相比,脉冲激光更有利于快速加热和损伤金属靶材,连续和脉冲复合激光能够获得更好的烧蚀效果。

3.2 多路激光合束是战术激光武器的关键技术之一

目前,单孔径固体及光纤激光器已经实现了千瓦级功率的激光输出,但是工作在极限状态下,在成本、体积、效率、散热及光束质量等综合性能方面都存在着致命的缺点。采用多孔径固体激光器的合成技术为实现

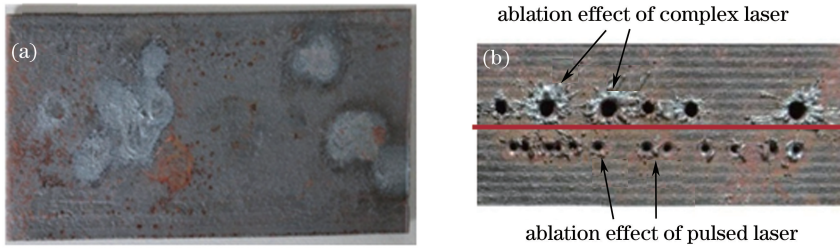


图 5 (a)连续激光烧蚀后的铁板照片(只留下痕迹);(b)脉冲激光或复合激光烧蚀后的铁板照片(烧穿出小孔)

Fig. 5 (a) Iron plate photo after continuous laser ablation, leaving only traces; (b) iron plate photo after pulsed laser or composite laser ablation, leaving several holes

高功率、高光束质量激光输出打开了新途径,该技术可避免各台子激光器工作在极限状态,并且其轴上亮度与单台激光器相比具有绝对优势,已成为固体激光武器技术发展的趋势和热点。

光束合成的主要方法有相干合成、光谱合成和非相干合成。 N 路光纤激光进行相干合成可获得高亮度,理论上可以使远场光斑的峰值强度达到单路时的 N^2 倍,并且,相干合成光束具有更好的大气传输效果。

模拟计算表明,250 kW 的相干合成和非相干合成的多光束激光传输到 10 km 距离处,在远场半径为 5.6 cm 的圆桶内,相干合成可以汇聚 150.2 kW 的能量,而非相干合成只能汇聚 32.6 kW 的能量。可见,相干合成激光的远场亮度远优于非相干合成^[41]。

主动相干合成需要非常复杂、昂贵的相位检测和控制装置及其算法。被动相干合成一般利用特殊的耦合结构和器件自组织完成锁相,技术相对简单可靠,但要实现大功率定标放大也有一定难度。

国内外在多光束激光相干合成方面的研究主要集中在光纤激光器方面,已经取得了一定的功率输出,但针对大功率固体激光相干合成的研究相对较少。角锥是一个天然的相干合成元件,本课题组在长期研究角锥相干合成特性基础上,提出了利用角锥腔实现互注入锁相这一创新思想^[42],如图 6 所示。在互注入锁定时,第 i 台激光器将会有来自其他的 $N-1$ 个激光束的注入,当互注入锁定达到稳定时,各台激光器的谐振波长趋于一致,偏振状态相同,相位差恒定。在角锥腔中由于对称注入,3 对两两共轭的激光束在空间和时间上均完全相干,相邻区域通过特殊偏振耦合结构实现互注入,也可在空间和时间上达到相干。利用角锥存在的本征偏振态和偏振注入控制技术,通过半波片的旋转,将各个激光介质的偏振态转换为角锥各区域的本征态,激光达到无退偏全反射;实现了对称 6 路激光的同偏振合成输出,从而获得高相干度、高效率相干合成激光阵列输出。

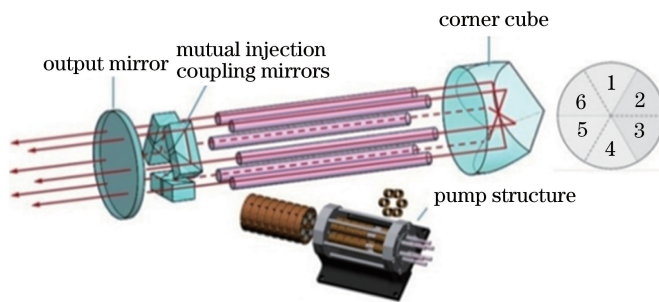


图 6 6 路激光角锥偏振分光耦合互注入技术方案

Fig. 6 Scheme of six laser cube corner polarization beams coupling mutual injection technology

基于以上思想,本课题组研制了 LD 抽运激光器样机^[43],一级 6 路激光输出总能量达 15.3 J,6 路激光的合束效率高达 95.6%,重复频率为 1~20 Hz,脉冲宽度为 0.5 ms,电光效率达 23.3%,发散角约为 1.7 mrad (单路激光发散角为 2.5 mrad)。之后,研制了第 2 级 6 路激光模块用于放大,放大后总能量达 30 J,且光束质量不变。后续又研制出 100 J 激光器样机,目前还在继续向更高能量进行定标放大。

4 激光武器发展动向

纵观各国激光武器的发展,可以归纳出以下几个发展趋势。

4.1 由超高功率战略威慑转向较低功率战术应用

在里根时期,美军以高能战略激光武器等极具超前性的新概念武器为诱饵,高调推出“星球大战”计划,诱使前苏联举全国之力发展大型、超高功率、超远作战距离的战略激光武器,与美国进行太空军备竞赛,最终前苏联因承受不起巨大的战争成本和作战风险而单方面退出了军备竞赛^[1]。时任美国国防部长的阿什顿·卡特1984年在提交给国会的报告中就指出,超高功率激光武器面临巨大的经济和技术问题,现实中根本不可能制造出这种武器。“星球大战”计划于1994年全面下马。

同时,由于大气的衰减和远距离传输光斑的发散,随着距离的增加,激光武器的实际打击效果大打折扣,见图7^[6],图中EO sensor表示光电传感器。

因为以上因素,美国和其他军事强国开始将精力转向更为现实可行的低功率战术应用型激光武器。近年来,美国国防部在战术激光武器发展上取得了显著进步^[7],目前已成功对“庞塞”号上的集成激光武器进行了部署实验,正在考虑在FLIGHT III型“阿利·伯克”级驱逐舰上部署激光武器。图8按年份和功率对历年来报道的激光武器进行了分类,可见,近年来各国着重研究并取得进展的主要是100 kW以下的战术激光武器。美军方目前已投资多种型号的可用于对抗火箭、炮弹、无人机、低空飞行飞机和直升机的战术激光武器,认为50~100 kW级的战术激光武器基本上能成功挫败所有这些威胁。

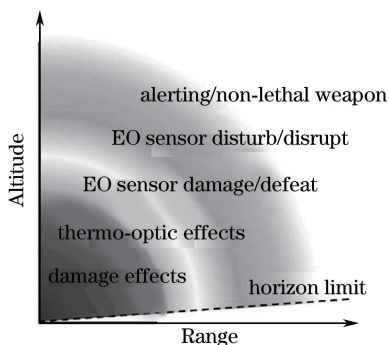


图7 高能激光武器在大气中的作战效果

Fig. 7 Fighting effects of high energy laser weapon in air

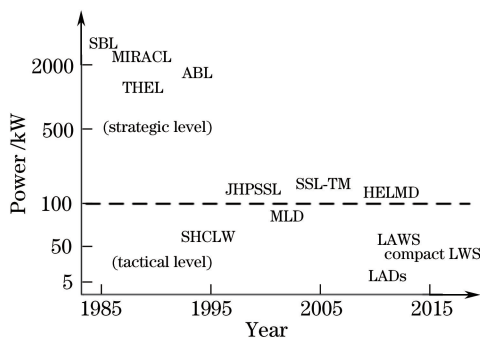


图8 历年来报道的主要激光武器系统的功率分布图

Fig. 8 Power distribution of laser weapons reported over past years

4.2 舰载激光武器有望最先成为实战装备

现代海军舰船面临着反舰导弹、无人机、迫击炮、火箭弹等多种威胁,其中,反舰导弹作为当今海战的主要攻击武器是舰船的主要威胁。反舰导弹被发现后的拦截时间短至数秒钟,一般舰船都难以应对,因此迫切需要能够防御此类导弹的武器系统,这使得配备能够快速反应并摧毁目标的激光武器显得尤为迫切和重要。然而,舰载平台最适于满足现有激光武器对体积、供电、散热等需求,有望最先成为实战装备激光武器。美国海军研究局针对激光武器的下一步计划将是于2016年或2017年测试100~150 kW的激光武器系统,希望到2020年能够在美军舰队上采用多种激光武器^[44]。

德国也积极地将激光武器应用到舰艇的末端防御上。2016年3月,莱茵金属公司受德国联邦国防军委托,在公海上的一艘军舰的舰炮上成功测试了一种军用高能激光武器^[45]。

4.3 天基激光武器是激光武器发展的重要方向

美国、俄罗斯早在20多年前就曾高调投入巨资研究天基激光武器,如美国“SBL-IFX”计划^[46]、苏联“极地号”计划等。由于政治、经济及技术等因素的影响,美国于2002年对外宣布停止天基激光武器计划。而实际上,美国从未放弃天基激光武器的研究^[16],其发展天基激光武器的行动极有可能隐藏在激光清扫空间碎片、天基监视与侦查系统、空天飞机、空天母舰、空间激光通信传能等项目中。俄罗斯、日本、德国、加拿大等也都在积极发展在轨操作技术来提高清理空间碎片的能力^[47]。天基激光武器之所以成为全球军事力量竞相抢占的高地是由于:1) 卫星对于各国的军事、通信、信息感知等都极为重要;2) 太空中的卫星目前基本处于不设防状态,极易遭受毁灭性的打击;3) 太空中无大气干扰,是激光发挥威力的绝佳环境;4) 太空环境中需要的激光器功率并不高;5) 通过天基激光武器系统,可以构建全球导弹防御体系,用以应对高超音速武器

等威胁。以现有的技术条件,研发出适用于太空作战的小型、可靠、高效的固体激光器是极有可能的。美国空军航天司令部司令威廉姆·L·谢尔顿上将认为新一代轻小型卫星群将成为天基激光武器新的作战样式^[48]。可以预计,未来谁先完成天基激光武器实用化,谁就掌握了太空的主导权。

5 结束语

激光武器既可以单独使用,也可以与其他武器一起组合成威力倍增的“光、弹、炮”一体化武器系统。例如,激光武器可远距离致眩或致盲来袭导弹,使来袭导弹失去制导和机动能力,便于我方导弹拦截;对于躲过我方导弹拦截进入近距离的敌方导弹,需再利用激光武器进行快速摧毁。激光武器与现有动能拦截系统形成陆、海、空、天多层拦截体系之后,可能会全面颠覆传统导弹攻防“攻易防难”的不对称定律,引起军事革命。

到2020年,美国极有可能部署机载、舰载激光武器^[31]。美国空军 Hawk Carlisle 将军认为,美军预计在2023年前在战场使用激光武器^[49]。到2030年,美军将部署更为先进的飞机自卫激光武器和无人机载战术导弹防御激光武器,乃至搭载激光武器的新一代战斗机和卫星^[35,44]。

当前,美军高调推出新一轮“抵消”战略^[50],力求发展一系列“能够改变游戏规则”的颠覆性技术和创新性战法,特别是把以高能激光为代表的定向能武器列为优先选项^[51-52],这也预示着“光战争”很有可能会成为未来战争的形态。

今天的激光武器已经超出了原来的涵义,它代表的不仅仅是一项新技术,而且是一种新的武器体系。这是一种能够改变军事行动形态的潜在革命性技术,一旦成功开发和部署,将“改变游戏规则”,所以世界军事强国都将继续投资该领域也不足为怪。今后10~20年间,实用化的激光武器将会大量出现^[1],也许在有生之年我们能够看到长达600年左右的火器统治时代的衰落和新战争形态的诞生。

参 考 文 献

- Hu Yaning, Wang Shengliang. Light warfare[M]. Beijing: Liberation Army's Publishing House, 2015: 2.
胡延宁, 王圣良. 光战争[M]. 北京: 解放军出版社, 2015: 2.
- 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, 伊炜伟, 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.
- Global Security org. High power fiber laser [EB/OL]. (2011-07-07) [2016-04-05]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hpfl.htm>.
- Hecht J. Ruggedizing high-energy laser the battle field[J]. Laser Focus World, 2014, 50(7): 29-32.
- Qu Z, Xing H, Wang D W, *et al.* Study of application and key technology of the high-energy laser weapon in optoelectronic countermeasure[C]. SPIE, 2015, 9673: 967307.
- Thttertton D H . Military laser technology and systems[M]. London: Artech House, 2015: 260.
- O'Rourke R. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: background and issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2015: R41526.
- Extance A. Laser weapons get real[J]. Nature, 2015, 521: 408-410.
- Szondy D. Many lasers become in Lockheed Martin's 30 kW fiber laser [EB/OL]. (2014-02-02) [2016-04-04]. <http://newatlas.com/lockheed-sets-new-record-for-laser-weapon/30655/>.
- Coffey V . High-energy lasers: new advances in defense applications [J]. Optics & Photonics News, 2014, 25(10): 28-35.
- Boeing. Airborne laser YAL [EB/OL]. (2007-03-15) [2016-04-05]. <http://www.airborne-laser.com>.
- Speiser J. Thin disk lasers: history and prospects[C]. SPIE, 2016, 9893: 98930L.
- Zhang Yang. UAV+Laser USA's new way of anti-missile [N]. China Aviation News, 2015-03-10(BO4).
张 洋. 无人机+激光美国反导新思路 [N]. 中国航空报, 2015-03-10(B04).
- Soulard R, Quinn M N, Tajima T, *et al.* ICAN: a novel laser architecture for space debris removal [J]. Acta Astronautica, 2014, 105: 192-200.

- 15 中国新闻网. 日本或借清除太空碎片名义发展军事航天和激光武器[EB/OL]. (2015-08-15)[2016-04-01]. <http://laser.ofweek.com/2015-08/ART-240015-8500-28993146.html>.
- 16 Martin R. Dispersed space based laser weapon: US8757552[P/OL]. (2014-06-24)[2014-06-24]. [http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=1&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsearch-bool.html&r=3&f=G&l=50&co1=AND&d=PTXT&s1="dispersed+space+based+laser+weapon"&OS="dispersed+space+based+laser+weapon"&RS="dispersed+space+based+laser+weapon"](http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=1&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsearch-bool.html&r=3&f=G&l=50&co1=AND&d=PTXT&s1=).
- 17 Bloomberg. US Navy deploys first laser weapon in Persian gulf[EB/OL]. (2014-11-14)[2016-04-05] <http://geaptain.com>.
- 18 Staton R, Pawlak R. Laser weapon system adjunct to the close in weapon system[R/OL]. Virginia: Naval surface warfare center Dahlgren div va. ADA557757, 2012: 1-3. [2012-01-31]. <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA557757>.
- 19 Sprangle P, Hafizi B, Ting A, *et al*. High-power lasers for directed-energy applications[J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F201-F209.
- 20 Lockheed Martin Corporation. Lockheed Martin takes laser to higher power[EB/OL]. (2015-10-05)[2016-05-05]. <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2015/october/151005-mst-lockheed-martin-takes-laser-to-higher-power.html>.
- 21 Wilson J R. Laser weapons at the crossroads[EB/OL]. (2015-11-18)[2016-06-01]. <http://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-26/issue-11/special-report/laser-weapons-at-the-crossroads.html>.
- 22 Sun Yali, Chi Weiying. Russia's ability of air defense missile and space defense overall return to the top of the world[J]. Ground Air Defense Weapon, 2015, 46(4): 4-9.
孙亚力, 迟维英. 俄罗斯防空反导与空天防御总体能力重登世界之巅[J]. 地面防空武器, 2015, 46(4): 4-9.
- 23 中国新闻网. 德国展示轮式激光武器有效攻击距离 3 千米[EB/OL]. (2015-03-20)[2016-05-05]. <http://www.chinanews.com/mil/2015/03-19/7143111.shtml>.
- 24 李 矜. 德国全新激光武器亮相可击落 500 米范围内无人机[EB/OL]. (2015-09-25)[2016-04-05]. <http://world.huanqiu.com/exclusive/2015-09/7644689.html>.
- 25 徐璐明. 英国防务展集束激光武器抢眼[EB/OL]. (2015-09-17)[2016-04-01]. <http://mil.huanqiu.com/gt/2015-09/2796126.html>.
- 26 Yu C X, Augst S J, Redmond S M, *et al*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2686-2688.
- 27 McNanght S J. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2014, 20(5): 14083505.
- 28 Dailey J. AFRL records highest output power ever for coherently array of fiber lasers[EB/OL]. (2014-07-22)[2016-04-05]. <http://www.wpafb.af.mil/news/story.asp?id=123418654>.
- 29 Wang X, Leng J. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array[J]. Appl Phys B, 2012, 107: 785-790.
- 30 Wang Hongjie. US Army's new laser weapon strike a pose on the Persian Gulf[N]. People's Daily, 2014-12-19(022).
王弘劼. 美军新式激光武器亮相波斯湾[N]. 人民日报, 2014-12-19(022).
- 31 Lockheed Martin Corporation. Turning up the heat: latest evolution of lockheed Martin laser weapon system stops truck in field test[EB/OL]. (2015-03-15)[2016-04-01]. <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2015/march/ssc-space-athena-laser.html>.
- 32 Mohring B, Dietrich S, Tassini L, *et al*. High-energy laser activities at MBDA Germany[C]. SPIE, 2013, 8733: 873304.
- 33 Ludewigt K, Riesbeck T, Graf A, *et al*. 50 kW laser weapon demonstrator of Rheinmetall Waffe Munition[C]. SPIE, 2013, 8898: 88980N.
- 34 Protz R, Zoz J, Geidek F, *et al*. High-power beam combining a step to a future laser weapon system[C]. SPIE, 2012, 8547: 854708.
- 35 Ofweek 激光网. 10 年内 MBDA 交付激光武器摧毁无人机[EB/OL]. (2015-07-12)[2016-04-05]. <http://laser.ofweek.com/2015-07/ART-240015-8130-28977493.html>.
- 36 Ludewigt K, Riesbeck T, Baumgärtel T, *et al*. Mobile and stationary laser weapon demonstrators of Rheinmetall Waffe

- Munition[C]. SPIE, 2014, 9251: 92510N.
- 37 Protz R, Zoz J, Geidek F, *et al.* High-power beam combining-a step to a future laser weapon system[C]. SPIE, 2012, 8547: 854708.
- 38 Li Yong, Wang Minle, Zhang Jun. Damaging evaluation of high energy laser weapon to ballistic missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 588-592.
李勇, 汪民乐, 张均. 高能激光武器对弹道导弹毁伤能力研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 588-592.
- 39 Hugenschmidt M, Schmitt R, Moeglin J P, *et al.* Physics of high average power repetitively pulsed laser ablation of dielectric materials[C]. SPIE, 2002, 4760: 103-114.
- 40 Pandey R, Merchena D, Stapleton D, *et al.* Advancements in high-power diode laser stacks for defense applications[C]. SPIE, 2012, 8381: 83810G.
- 41 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 276-280.
周朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 276-280.
- 42 Cheng Y, Liu X, Wan Q, *et al.* Mutual injection phase locking coherent combination of solid state lasers based on corner cube[J]. Optics Letters, 2013, 38(23): 5150-5152.
- 43 Sun Bin, Zhu Mengzhen, Tan Chaoyong, *et al.* Latest progress of research on adjust-free solid state laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3244-3251.
孙斌, 朱孟真, 谭朝勇, 等. 免调试激光器研究新进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3244-3251.
- 44 白旭尧, 陈晓. 美海军探索为“阿利·伯克”级驱逐舰加装高能激光武器[EB/OL]. (2016-01-15)[2016-07-01]. <http://www.dsti.net/Information/News/98080>.
- 45 虹摄库尔斯克. 德莱茵金属新型高能激光武器竟有《红警》中逆天战力[EB/OL]. (2016-06-15)[2016-06-25]. <http://news.qq.com/a/20160615/013597.htm>.
- 46 Kalisky Y. Applications of high power lasers in the battlefield[C]. SPIE, 2009, 7483: 748305.
- 47 Chen Zhike, Xiong Wei. Analysis of on-orbit manipulation technology and its overseas development[J]. Journal of Equipment Academy, 2014, 25(6): 63-68.
陈治科, 熊伟. 在轨操作技术及国外发展分析[J]. 装备学院学报, 2014, 25(6): 63-68.
- 48 知远. 美国空军变革卫星系统, 未来卫星群将更小更便宜[EB/OL]. (2012-11-26)[2016-06-21]. <http://mil.sohu.com/20121126/n358704143.shtml>.
- 49 Mary J. Very close: pentagon's death laser right around the corner[EB/OL]. (2016-02-03)[2016-04-01]. <http://sputniknews.com/military/20160302/1035625272/very-close-pentagon-death-laser.html>.
- 50 Winter M. US navy details plans to outmatch Russia and China[EB/OL]. (2016-01-28)[2016-04-05]. <http://sputniknews.com/us/20160128/1033863359/us-navy-third-offset-strategy.html>.
- 51 Feng Hanliang, Liu Yansheng, Han Feng, *et al.* Progress on development of US naval shipborne laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020004.
冯寒亮, 刘彦升, 韩锋, 等. 美国海军舰载激光武器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020004.
- 52 Zong Siguang, Wu Ronghua, Cao Jing, *et al.* Development and trends of high energy laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 0800016.
宗思光, 吴荣华, 曹静, 等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 0800016.