

高能激光武器技术与应用进展

宗思光¹ 吴荣华¹ 曹静¹ 王辉华²

(¹ 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033; ² 海军装备研究院, 北京 100015)

摘要 激光武器技术在现代战争中发挥着越来越重要的作用。概述了高能激光武器系统的组成及目标毁伤机理, 介绍了高能激光武器中化学、固体和自由电子激光器的应用现状和发展方向, 并对激光武器实用化涉及的关键技术进行了分析。

关键词 激光技术; 激光武器; 化学激光器; 固体激光器; 自由电子激光器

中图分类号 TJ953 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080016

Developments and Trends of High Energy Laser Weapons

Zong Siguang¹ Wu Ronghua¹ Cao Jing¹ Wang Huihua²

(¹ School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

² Navy Academy of Armament, Beijing 100015, China

Abstract Laser weapon is playing a more and more important role in modern warfare. This paper discusses the damage mechanism, development situation and future development trend of laser weapon. Laser weapons can be divided into chemical laser weapon, free-electron laser weapon, solid state laser weapon, etc. according to the laser generation method. The latest status of high-energy laser programs, including technology, subsystem and prototype demonstrations, is assessed in detail. The key technology of laser weapon is also analyzed.

Key words laser technique; laser weapon; chemical laser; solid-state laser; free electron laser

OCIS codes 140.3460; 140.1550

1 引言

高能激光武器是一类正在迅速发展中的新概念武器,它是利用激光来直接毁伤目标或使之失效的定向能武器,具有能量集中、传输速度快、作用距离远、命中精度高、转移火力快、抗电磁干扰、能多次重复使用和效费比高等优点^[1,2]。高能量激光武器发射的激光束以光速向目标发动攻击,具有巨大的潜力。本文依据高能激光武器光源的不同,将其分为化学激光武器、固体激光武器和自由电子激光武器,详细介绍了其现状和发展方向。

2 高能量激光武器系统的组成

高能量激光武器系统可以机载、舰载、车载、地基、空间平台等多种形式的“平台”进行部署,除了与指挥控制系统等连接外,主要由高能量激光器和光束定向器两大硬件构成。其中光定向器又由大口径发射系统(发光口)及精密瞄准系统(束控制)两部分构成。这两部分中,包含测量目标位置的测距、电视、红外传感器等探测系统及校正激光大气畸变的自适应光学系统等。图1是激光武器系统的构成略图。激光武器系统一般由以下一些子系统组成:1)激光器;2)光束控制子系统;3)跟踪瞄准子系统;4)探测子系统。对于高能量激光光束控制,主要由大口径望远镜(扩束器)完成光束向目标的传输。扩束器望远镜主要由腔体、主镜和次镜组成,如图2所示。激光武器系统的光束控制子系统把激光束发射到远场,并会聚到目标上形成功率尽可能

收稿日期: 2013-03-05; 收到修改稿日期: 2013-04-06; 网络出版日期: 2013-06-06

作者简介: 宗思光(1979—),男,博士,讲师,主要从事激光与物质相互作用和光电对抗等方面的研究。

E-mail: zongsiguang@163.com

高的光斑,以便能在尽量短的时间内破坏目标。因此,须采用口径足够大的发射望远镜。如一般的战术激光武器系统,主镜的直径约 1 m。除了主镜外还有一个副镜,可根据不同目标的不同距离对副镜进行平移实现调焦的作用,如图 2 所示。

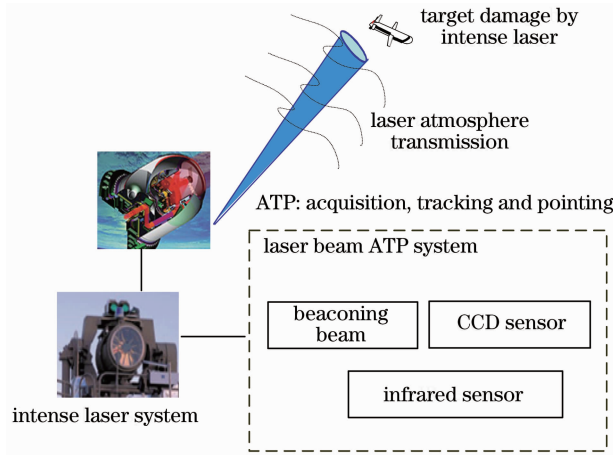


图 1 高能激光武器组成框图

Fig. 1 Diagram of high energy laser weapon system

激光在大气中传输受到湍流的影响使光斑扩散,为了克服大气湍流的影响,可采用自适应光学技术加以补偿,校正激光大气传输畸变,以跟踪瞄准飞行中的目标。自适应光学技术是激光武器系统中的重要技术之一。自适应光学系统由进行像差补偿的感知测量装置、感知测量信号处理器和消除像差危害的波前变更系统组成。

如图 3 所示,由硬件实现的自适应光学可分为两种类型。透射波前系统用激光照射目标,并传感目标上闪烁的返回光来得到相位差信息。相位共轭系统可使用独立光源或信标来完成该项任务。在相位共轭方法中,回波信号与出射信号在波前修正器上相混合,并被传送到确定两列光波之差的波前传感器。然后,处理器提取信标相位,把共轭应用于出射波,随后,该出射波到达目标上,其大气畸变已经过理想校正。孔径标记系统在分立的时间频率处应用空间波前修正。将这些时间频率从回波信号中消卷积并在尝试基础上修正,以驱动压电型伺服机构使目标闪烁中的功率最大化。

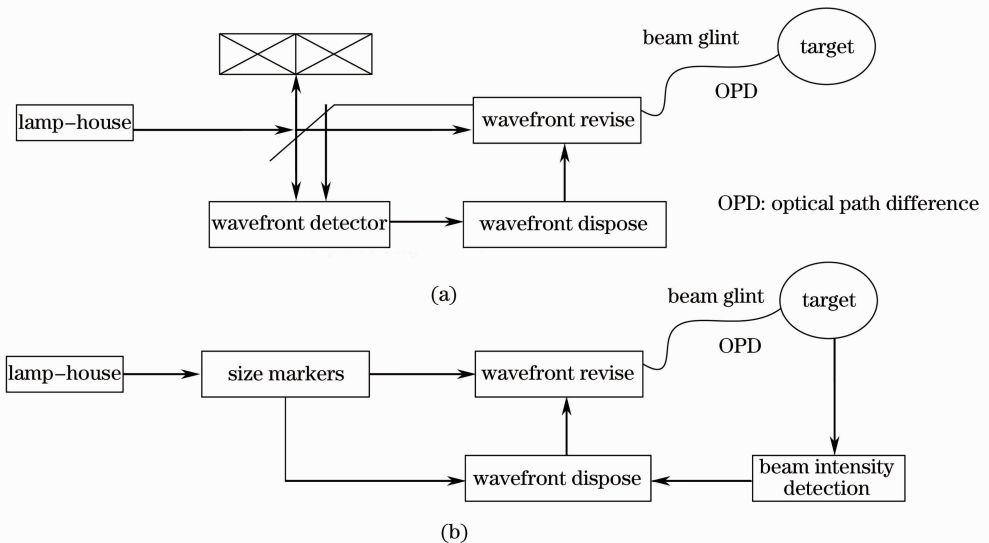


图 3 自适应光学系统。(a) 相位共轭系统;(b) 孔径标记系统

Fig. 3 Adaptive optical system. (a) Phase conjugation system; (b) size marker system

高能激光武器对目标的破坏效果主要取决于激光在目标上产生的辐照度、光束在目标点的稳定停留时间以及辐射与目标相互作用的机制^[3]。其中作用时间可以根据需要选定,作用机制和光束特性与目标的物

理、几何特性有关。而激光在目标点产生的辐照度则由激光的光束质量、功率、束直径、波长、目标距离等决定,这些量又与光源种类和传输介质的特性等因素有关。影响激光武器作战效能最关键的因素是到达目标上的远场激光功率及其密度。在设计和改进激光武器时,计算和分析到达远场目标之上的激光功率密度是最关键的步骤。激光发射到目标上有两个主要参数,即功率密度与光斑直径。会聚到空间远场某一光学系统中的激光功率密度计算公式为^[3]

$$P_0 = 0.21 \left[\tau_0 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right] \left[\tau'_0 \left(\frac{D_0}{n\lambda} \right)^2 E \right] \tau_a \frac{1}{L^2},$$

式中 P_0 为目标上的功率密度, d 为目标上的光斑直径(设表面垂直于光束轴线), D_0 为激光光学发射系统望远镜口径, τ_0 为光学接收系统总透射率, τ'_0 为激光光学系统总透射率, τ_a 为大气平均透射率, 为波长和目标距离的函数, 取决于当地大气成份与气象条件, 并与仰角有关, n 为激光束衍射极限倍数, λ 为激光波长, E 为激光功率, L 为目标距离。

激光功率密度 P_0 达到目标的破坏阈值 P_{th} 时, 才能产生破坏效应。原则上讲 P_0 超过 P_{th} 越多, 目标的损伤就越大。目标上光斑直径 d 越大, 越容易瞄准跟踪, 而且在 $P_0 \geq P_{th}$ 的前提下, 目标被破坏的范围越大。如果要求 P_0 和 P_{th} 同时都大, 就必须要求激光束的功率 E 足够大, 这是当前激光器难以满足的。在功率密度不低于 P_{th} 的前提下, 通过减小波长、提高光束质量和加大主镜直径等办法有可能增大功率。减小 λ , 就是采取短波长激光, 但大功率短波长激光器现今尚不成熟, 因而现在普遍采用的办法是提高光束质量即减小 β 值和利用大口径望远镜即加大 D 。

3 高能激光器技术

激光武器按激光生成方法可分为化学激光武器、固体激光武器、液体激光武器和自由电子激光武器等四种类型, 它们各有特色, 但目前只有化学激光武器和固体激光武器达到了实战部署阶段, 其他激光武器还不成熟。

3.1 化学激光武器

化学激光武器是激光武器中最成熟的类型, 它利用工作物质的化学反应所释放的能量激励工作物质产生激光, 例如以氟化氮作为氧化剂使得乙烯燃料在燃烧室内发生燃烧, 在燃烧室的下游, 氘氮混合气体被注入燃烧后的尾气中, 产生自由的 DF 分子, 这些分子在激光器的谐振腔内受激发后, 产生激光。目前常见的化学激光武器有氧-碘激光武器、氟化氢激光武器、氟化氘激光武器等。目前氧碘化学激光武器装置技术的研究重点是提高效率和轻型设计, 以便减轻系统重量和改进作战适用性。研究尽可能利用塑料代替金属, 同时研究燃料的再循环工作问题。

氧碘化学激光器首先被美国用于机载激光器(ABL)计划, 该系统是美国空军主持的目前美国最主要的一项硬杀伤激光武器研制计划, 目标是将高能化学氧碘激光武器安装在大型宽体客机波音飞机上, 可从 12000 m 高空拦截 250 km 以外的处于助推段的洲际或战区弹道导弹。该计划是美国空军大力推进的战区弹道导弹助推段拦截方案, 是其联合多层战区导弹防御研究的一部分。该系统装载功率更高的氧碘化学激光器, 重点是针对助推段和上升段中的弹道导弹。该系统是一种能独立地进行目标探测并实施“外科手术式”攻击的自主性武器系统。载机在 12 km 高空、距前线 90 km 的己方一侧巡航, 激光武器的预定射程为 300~580 km。为增大机载激光武器的有效射程, 有意让载机穿越敌方领空, 或采用载有高速拦截弹的无人机作为载机, 深入敌后作战^[4-5]。

机载激光武器系统的主要部件是包括飞机平台(波音 747-400F 飞机)、传感器系统(被动红外传感器)、高能量激光器装置(氧碘化学激光器)和瞄准与跟踪系统(光束控制), 该系统的组成如图 4 所示。机载激光武器作战时, 该系统利用飞机上 360°视场的被动红外传感器探测目标, 用波长 1.06 μm 的多光束激光照明器照射目标, 用高分辨率成像器进行成像, 通过主望远镜进行观察以获得良好的跟踪数据, 随后引导信标激光和杀伤光束。信标光束比杀伤光束稍早一些发出, 以便对杀伤光束所要经过的大气路径进行测量。杀伤光束在信标激光到达目标并返回后发出, 如图 5 所示。在信标激光和自适应反射镜继续对畸变进行补偿, 激光照明器和被动红外传感器继续对目标进行跟踪的同时, 向助推段弹道导弹燃料箱的瞄准点发射数秒波长 1.3 μm 的氧碘化学激光杀伤光束, 以摧毁目标。

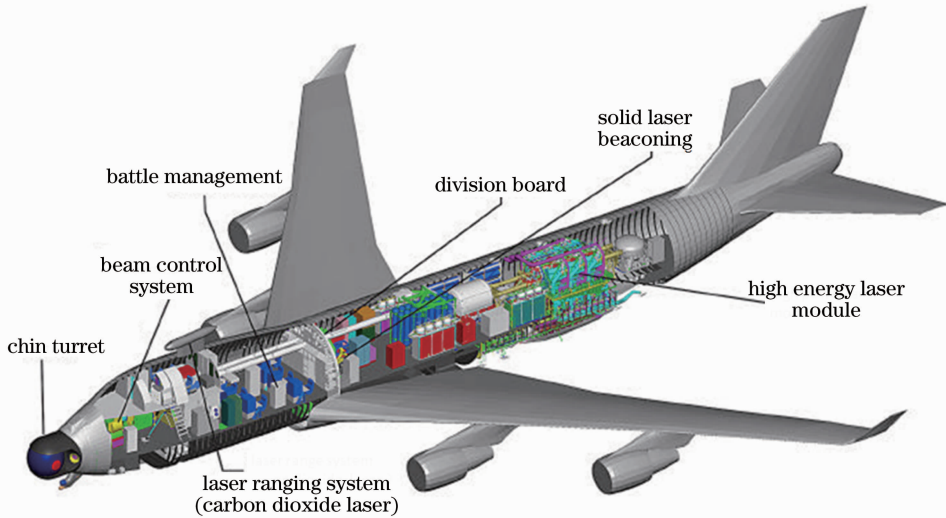


图4 ABL 机载激光武器系统结构

Fig. 4 Diagram of ABL laser weapon

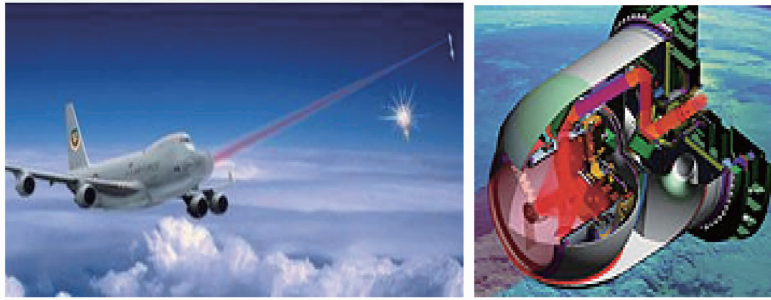


图5 ABL 机载激光作战系统使用示意图

Fig. 5 Application of ABL laser weapon

研究表明,由7架装备激光武器的飞机组成的机群能对单个战区冲突地区提供最佳的弹道导弹防御。若想同时为两个战区冲突地区提供弹道导弹防御,将需要部署14架这种飞机,而且这些飞机能在空中加油。初步作战方案是,由7架飞机组成的作战机群中至少应使5架飞机部署在一个军事危急区域。这5架飞机可形成两条反导轨道(形成24h的作战能力需要7架飞机),携带足以进行200次发射的燃料,载机至少能在空中待命飞行6h且无需加油,每次任务飞行时间为12~18h。部署由5架飞机构成的机群时,需要一架C-17运输机和至少2架空中加油机的支援。每次射击的持续时间为3~5s,化学燃料费为1000美元。数百万瓦的激光通过2m直径的发射望远镜发射出去,足以攻击远至600km的目标,并能摧毁目前五角大楼所列的威胁名单上29种导弹中任何一种的压力燃料箱。机载激光武器系统将设计成能对付从单个发射场或多个分散发射场间歇式进行的每次5~10枚导弹的齐射。

同时,利用氧碘化学激光器技术,美军也在发展以C-130大力士运输机、V-22倾转旋翼飞机和CH-47D支奴干运输直升机等机载平台的先进战术激光器(ATL),用于击落巡航导弹和掠海飞行导弹^[6]。该武器系统拟采用功率为200kW的氧碘化学激光器,能在目标探测后的6s内将其摧毁,2s后接着对付另一个目标。预计该系统能进行100次连续射击,系统的作战距离为10km。根据气候条件和各地环境的不同,ATL的有效射程区别很大,最好时能超过30km,而最差时有效射程不足8km,如图6所示。

氧碘激光器也在美国陆军得到应用,例如20世纪90年代美国和以色列合作的战术高能激光器(THHEL)和21世纪初的衍生型号机动战术高能激光器(MTHHEL)。战术高能激光器主要用于小区域防御,对付从其他防御层漏网的点目标。设想组建一些由4辆或6辆装备战术高能激光器的战车组成的火力单元,这些火力单元能摧毁由多管火箭发射系统在几秒钟内齐射到一个小区域里的数枚非制导火箭弹。它们能保护靠近战斗前线的部队集结地或城镇,也可单独用于对付那些用原始的发射装置进行的单枚火箭

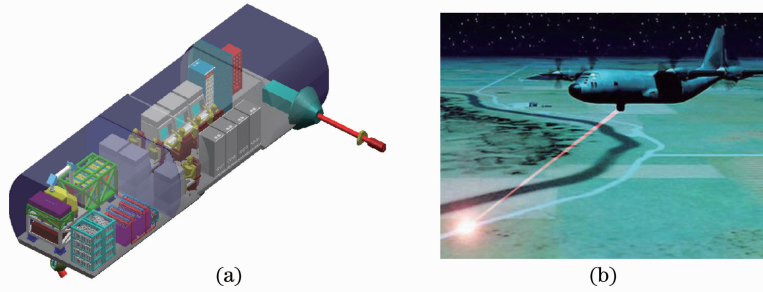


图6 ATL战术激光器。(a)激光系统结构；(b)激光武器作战应用

Fig. 6 ATL tactics laser weapon. (a) Diagram; (b) laser application

弹,以保护城镇或军事基地,起到反恐怖主义的作用。还可考虑与其他的陆军防空武器配合使用,如战区高空区域防御系统、爱国者和中程扩展防空系统等。还有可能将其小型化,以便安装到机载平台和舰船上。MTHHEL是一种小型的车载激光器,如图7所示,用于击落飞机、近程导弹以及火箭弹等各种炮弹。

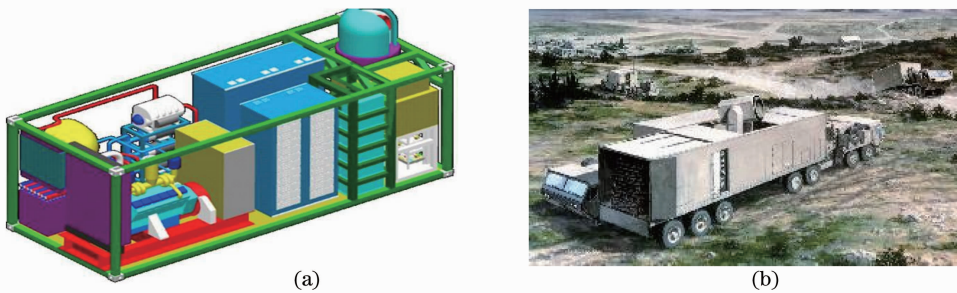


图7 车载战术化学激光武器。(a)激光系统结构；(b)激光武器装备

Fig. 7 Vehicle tactics chemical laser weapon. (a) Diagram; (b) laser weapon equipment

目前氧碘化学激光器技术的研究重点是提高效率 and 轻型设计,以便减轻系统重量和改进作战适用性。研究尽可能利用塑料代替金属及燃料的再循环工作问题,同时也应加强在强湍流和复杂大气传输条件下的自适应光学补偿和闭环跟踪能力的研究。

3.2 固体激光武器

固体激光器就是用固体激光材料作为工作物质,一般采用光学透明的晶体或者玻璃作为基质材料,掺以激活离子或者其他激活物质等构成,主要有红宝石激光器、钕玻璃激光器和Nd:YAG激光器。其中,玻璃激光工作物质容易制成均匀的大尺寸材料,用于高能量或高功率激光器,但荧光谱线较宽,热效能较差,不适合在高平均功率下工作。而晶体激光物质具有良好的热性能和机械性能,且有窄的荧光谱线,但不易获得大尺寸材料的晶体。固体激光使用晶体或是玻璃作为激光介质,依靠电能驱动,结构紧凑,成本低,用途广泛,适应性强,适合紧凑型武器系统。尽管固体激光器不能像化学激光器那样可以达到兆瓦级的功率,但它们还有一个很大的优点,就是比化学激光器更容易穿透大气。

近年来,固体激光器的发展日新月异,大的有体育场规模的大型钕玻璃激光器(用于激光聚变),小的有二极管抽运的微芯片激光器。武器级高能激光的门槛是100 kW,美国的JHPSSL项目在2009年1月实现了105 kW的输出,预示着固体激光器距离实际的激光武器又近了一步。该激光器由7个15 kW的FireStrike激光模块组成,输出光束达1.5倍衍射极限,激光器连续工作时间只受到输入能量和冷却系统的限制,单个模块重量为181 kg。其体积、重量和光束性能已经具备实战能力,如图8所示。

JHPSSL项目的成功和固体激光器的迅猛发展为战术激光武器的发展提供了新的方向。较之传统化学激光武器,固体激光武器将走向小型化、模块化和通用化,提高激光武器的机动性和可靠性。通过增减模块调整激光功率,应对不同层次的威胁,装备不同的作战平台^[7-8]。诺·格公司认为激光链装置可模块化集成,应用于海军舰艇反导防御、陆军车载战术激光武器以及海空军的先进攻击无人机与战斗机上,分别如图9~11所示。

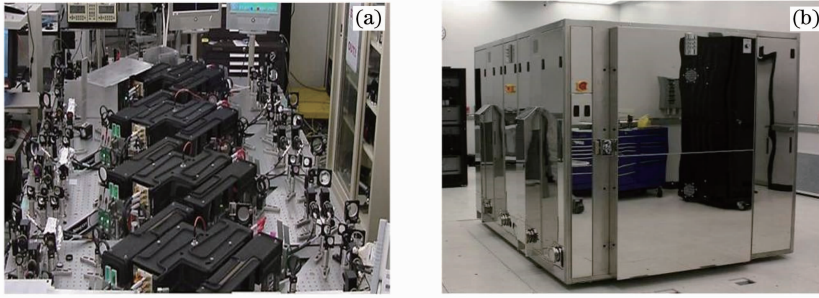


图 8 105 kW 固体激光武器系统样机。(a) 激光链装置；(b) 固体激光器实物
Fig. 8 105 kW solid laserweapon. (a) Laser module; (b) laser practicality

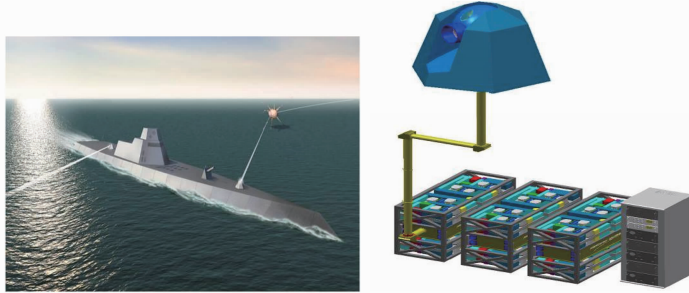


图 9 舰载固体激光武器模块装置及应用
Fig. 9 Ship-borne solid laserweapon based ship carrier

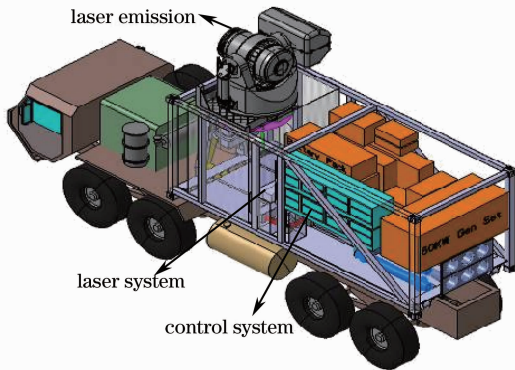


图 10 车载战术固体激光武器图
Fig. 10 Vehicle-borne solid laser weapon



图 11 机载战术固体激光武器
Fig. 11 Airborne solid laserweapon

作为固体激光器的发展方向之一,光纤固体激光器在 高能激光武器方面也得到了重视。目前,光纤激光器已经 成为工业用主流激光器,在军事上的应用前景非常乐观。雷声公司研制的激光百人队长演示系统功率达到了 50 kW,计划代替舰载密集阵系统和陆军的百人队长系统(即陆基密集阵),为战舰提供对小型飞机和小艇的防御能力。2010 年 7 月 19 日,雷声公司宣布它的海军激光武器系统(LaWS)在海上环境中成功击落了 4 架无人机。从试验结果来看,虽然海洋的多盐潮湿环境会削弱激光束的打击效果,但对于短波长激光束至少在近程防御方面得到了较好的解决。这种对付海上反舰导弹的激光武器是最有望进入实战部署的激光武器,如图 12、13 所示。

为应对漂浮水雷、集群小艇、无制导火箭弹及无人机等常规武器的袭击,雷声公司也研制了一种激光区域防御系统,该系统也包括“密集阵(Phalanx)”防空速射火炮、“警惕之鹰(VigilantEagle)”反导高能微波武器系统以及“主动拒止(Active denial)”杀伤人员高能微波武器等各种武器,如图 14 所示,可应用到舰艇、地面武器、军用飞机上,并进一步用于人口聚居中心、港口和公共场所等民用目标的防护。该系统采用的固体激光武器是将 40 台功率为 500 W 的固体光纤激光器集中在一起,其光束直径达 10 cm,能够引爆 500 m 外的迫击炮弹。

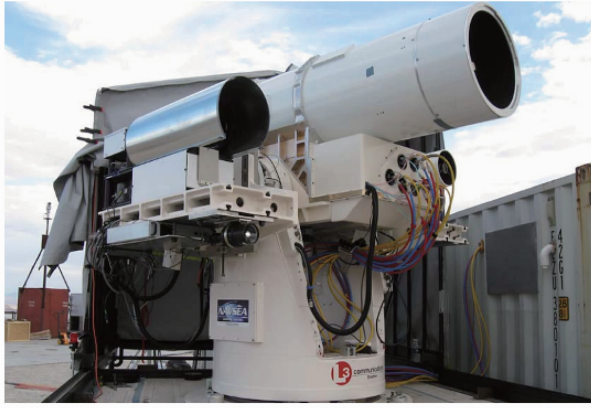


图 12 LaWS 激光系统

Fig. 12 Photograph of LaWS prototype

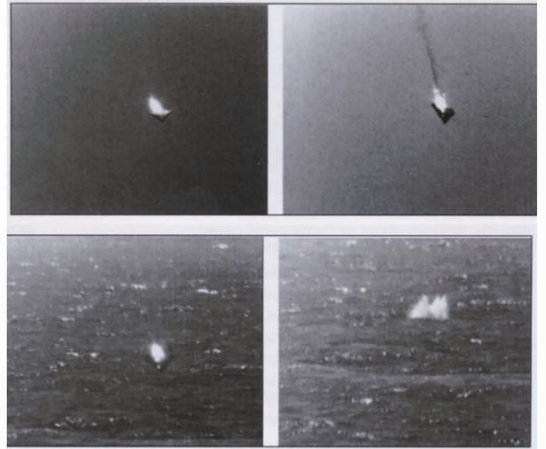


图 13 激光武器海上攻击无人机图像

Fig. 13 Image of unmanned plane attacked by solid laser weapon

3.3 自由电子激光器

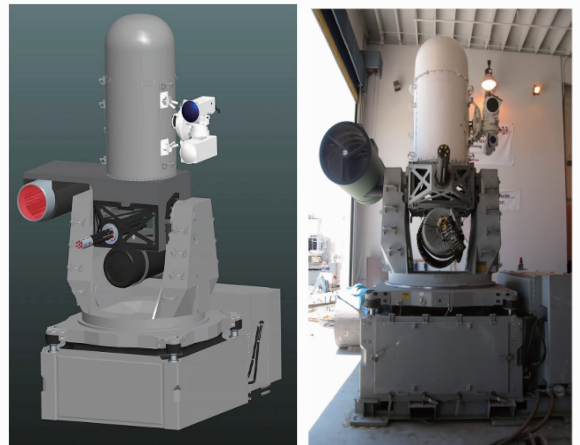
自由电子激光器(FEL)利用自由电子的受激辐射,把电子束的能量转换为激光。具体实现是电子从原子脱离后,通过线性加速器加速到高能态,这些高能态电子被导入到摆动器,迫使它们以光子的形式释放出能量,当光子进入谐振腔后,光子在谐振腔两端的反射镜之间来回运动,并激发出更多相同频率的光子,最后形成一簇连续的光束发射出去。

自由电子激光器的优点是波长可调(从毫米波到紫外线)、效率高、光电效率达到 10%、可以定标放大并且没有其他激光器的热管理问题,还可以长时间可靠运转。自由电子激光武器的发展伴随着美军作战战略的转变,其海军作战重点从远洋转移到沿海区域,作战环境发生了巨大变化。研究表明,在近海作战中,热晕限制了高能激光束的大气传输,即限制了激光武器的效能。而传统的 DF 化学激光器的波长对于沿海的环境并不是最佳的,使得至少 60% 发射功率在攻击过程中被大气散射和吸收。通过对 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波长激光在沿海条件下的大气吸收特性、消光特性和总的大气传输特性的计算比较,确定 $1.6\ \mu\text{m}$ 波长为适于沿海环境下的最佳波长。而高能自由电子激光器具有不同波长的调谐能力,使它成为舰船防御的更合理的激光器类型,具有最佳的海洋大气传输性能。同时,与其他各类激光器相比,自由电子激光器具有波长可调、输出功率强和效率高这三大特点。这些特点是使自由电子激光器成为高能激光武器的又一原因。

完整自由电子激光系统设计包括注入器、超导射频线性加速器、弯曲磁铁、摆动器、光学腔以及束流收集器,还包括电容能量存储器、功率调节单元、冷却设备等支持系统部件。图 15 为美国杰斐逊实验室的自由电子激光器结构^[9]。它是一种能量恢复直线加速器,电子从左侧较低处的发射源释放出来,并被超导直线加速器加速。之后,电子进入光学谐振腔。在谐振腔的中心有一个摇摆器,这个摇摆器使电子振荡发光,而发出的光被谐振腔捕获,这些光被用于诱使新的电子发射更多的光。电子从光学谐振腔中出来后,沿着顶部的回路行进并且返回直线加速器。这里电子把它们的大部分能量传递给新一批的电子,使得这个过程非常有效。自由电子激光器实物如图 16 所示。

完整的自由电子激光系统设计包括注入器、超导射频线性加速器、弯曲磁铁、摆动器、光学腔以及束流收集器,还包括电容能量存储器、功率调节单元、冷却设备等支持系统部件。图 15 为美国杰斐逊实验室的自由电子激光器结构^[9]。它是一种能量恢复直线加速器,电子从左侧较低处的发射源释放出来,并被超导直线加速器加速。之后,电子进入光学谐振腔。在谐振腔的中心有一个摇摆器,这个摇摆器使电子振荡发光,而发出的光被谐振腔捕获,这些光被用于诱使新的电子发射更多的光。电子从光学谐振腔中出来后,沿着顶部的回路行进并且返回直线加速器。这里电子把它们的大部分能量传递给新一批的电子,使得这个过程非常有效。自由电子激光器实物如图 16 所示。

美国海军研究实验室(ONR)从 1996 年开始自由电子激光器的研制,2004 年激光器功率已经到了 10 kW,2007 年达到 25 kW,并于 2010 年完成了 100kW 级自由电子激光器的初步设计方案,为兆瓦级自由

图 14 雷声公司研制的“激光区域防御系统”装置
Fig. 14 Rendering of LaWS integrated on close-in weapon system CIWS mount

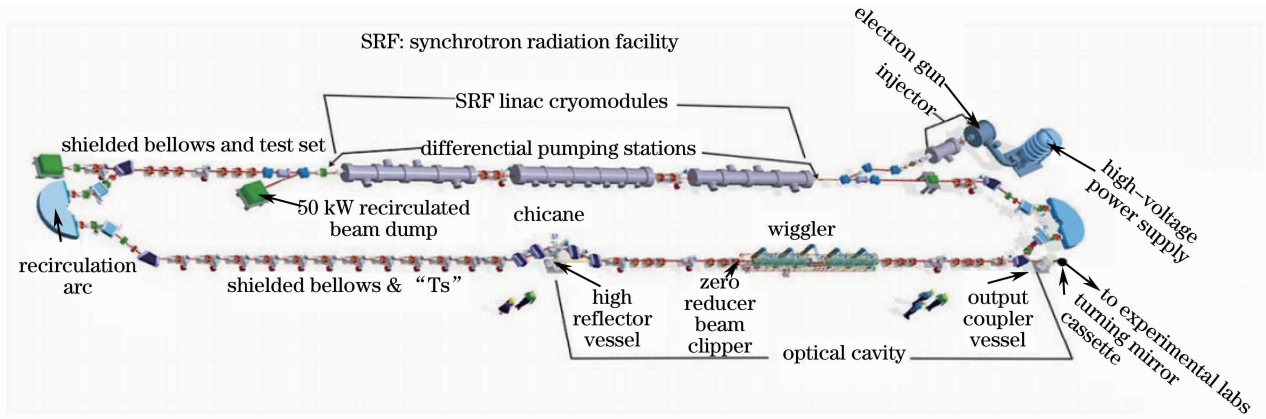


图 15 10 kW 自由电子激光器原理图

Fig. 15 Schematic of an FEL 10 kW

电子激光器奠定了基础。兆瓦级自由电子激光武器可能装备于新一代的全电战舰上,为美国海军提供全面的打击和防御能力。自由电子激光武器的舰载应用要求紧凑型的矩形激光器模块。整个系统将被安置在船体中部,以减小光束传输系统模块的弯曲效应,并采用超导射频加速器驱动自由电子激光器,两台安装在船身中部的光束定向器提供封锁舰船所需的 360°覆盖,如图 17 所示。光束定向器被安置在底座上,具备 180°火力范围,并且由自动防护盖保护,交战时防护盖可自行打开。该系统将可能于 2020 年前部署成为舰船防御敌方导弹的武器,并最终将安装在例如 DD(X)等下一代驱逐舰以及 CVN-21 等级的航空母舰上^[10-13]。

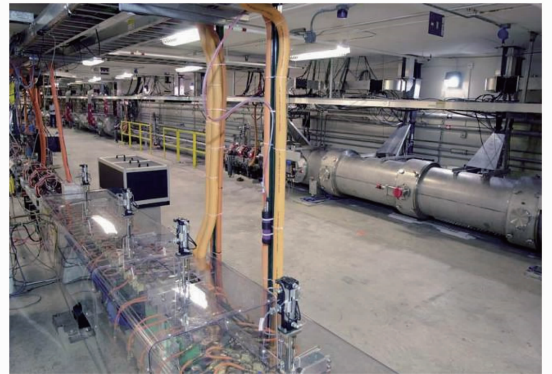


图 16 自由电子激光器实物

Fig. 16 Photograph of a FEL facility



图 17 自由电子激光武器舰载平台安装及光束定向器

Fig. 17 Schematic of a ship-borne FEL laser weapon

4 激光武器发展需要解决的关键技术

4.1 高可靠、紧凑、高能激光器技术

激光武器首先依赖于高能激光技术的发展,激光器应具有大范围的功率可调性,并能实现高的运行效率,同时激光器应具备高可靠性、稳定性、体积小、功率高、环境适应能力强等特点。

高能量、高光束质量激光器是强激光武器系统的核心。激光输出能量和光束发散角是激光器两个最重要的指标。激光远场处的激光能量密度与距离和光束发散角乘积的平方成反比,与激光器的输出能量成正比。高能激光器应着重加强以下技术的发展:1) 固体激光器的二极管抽运技术,该技术可显著提高电光转换效率,并降低激光器的热负载;2) 激光器热容量运行技术;3) 相位共轭技术,该技术通过采用特殊的激光镜和光学器件,可校正光束的变形,并改善光束的集中性;4) 高能光纤激光器技术,高能光纤激光器相对传

统激光器具效率高、光束质量好、工作寿命长、发热量小、工作寿命长、结构紧凑、稳定强等特性,是战术紧凑激光器武器系统较好的选择。

4.2 强激光大气传输及自适应光学技术

高能激光在大气中传输时,具有大气吸收、散射和湍流效应等线性传输效应以及高能激光特有的热晕、光击穿非线性效应。与线性效应相比,热晕效应与大气介质和光波本身特性的关系更为复杂,除大气介质的光学特性(关键是吸收特性)之外,还涉及大气介质的流体动力学特性、运动特性(风速、风向)和热传递特性^[14]。大气吸收激光能量的动力学过程决定了加热大气所需的时间,大气的热交换机制(热传导、自然对流、强迫对流、声波等)平衡大气吸收的激光能量。高能激光大气传输中线性、非线性传输效应之间并不是孤立的,必须考虑所有传输效应的综合效果^[15-16]。

在激光工程应用中,大气传输特性是进行可行性分析的基础和光学工程设计必须考虑的重要因素。大气光学特性十分复杂,在局域时空中具有各种可能的状态,在宏域时空中具有鲜明的地域和季节特征。同时,对于不同的激光器体制大气传输效应的差异性也较大,如短波长激光的好处是衍射效应小,缺点是光学镜面的瑕疵影响大,长波长激光的优点是光学镜面瑕疵影响小,但衍射严重。全面地掌握大气激光传输的线性和非线性效应特性,需要长期的大气光学特性测量和实际环境的激光大气传输实验研究。

解决高能激光大气传输畸变的有效途径是采用自适应光学技术^[14],它通过调整快速倾斜镜和变形镜以及波前校正器和控制技术来纠正光束的扩展和畸变,从而达到相当好的光束质量。自适应光学激光光斑校正效果见图 18。

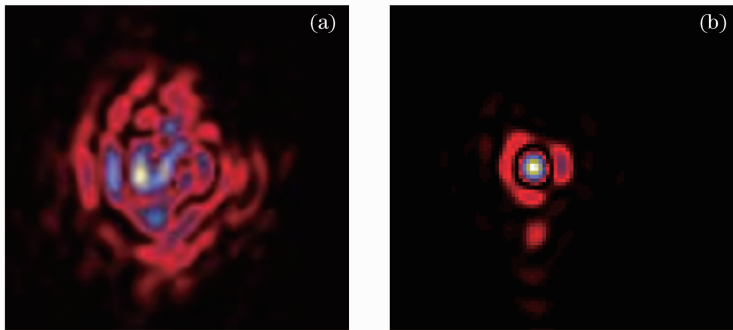


图 18 自适应光学激光光斑校正效果。(a) 未采用自适应光学的远场光斑;(b) 采用自适应光学的远场光斑

Fig. 18 Laser facula correction. (a) With adaptive optical system; (b) without adaptive optical system

4.3 光束稳定跟瞄技术

激光武器系统需要高精度的光束稳定跟瞄技术,实现很高的目标跟踪瞄准精度、较高的跟踪角速度和角加速度。其跟踪精度达微弧度量级,需要采用红外跟踪、电视跟踪、激光角跟踪等综合措施实现精密跟踪瞄准,在技术措施上,需要采用高性能的光电跟踪传感器、复合轴跟踪支架、复合控制与共轴跟踪等技术。

5 结束语

经过近 50 年的发展,美国第一代实用的平台运载激光武器系统即将实现。2020 年前美军极有可能部署机载激光武器、地基和机载激光反卫星武器。2030 年前将部署更为先进的飞机自卫激光器和无人机载战术导弹防御武器,乃至光子战斗机和天基全球精确光学武器或空间中继激光武器。

在激光技术已经得到广泛应用的今天,各国都在加大激光武器研究的投入,预示着激光武器技术必有一个大发展。激光在军事上得到广泛应用的结果是,不论进攻性武器或防卫性武器都会出现一个新面貌,达到一个新水平,发达国家和发展中国家的差距会更大。

参 考 文 献

- 1 Li Qingyuan. Damage Effects of Vehicles Irradiated by Intense Lasers[M]. Beijing: China Astronautic Press, 2012.
李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- 2 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.
- 3 Ronald O'Rourke. Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense; Background and Issues for Congress[R]. CRS Report for Members and Committees of Congress, Collingdale, 2010.
- 4 James A Holbrook II, David L Reyes. A Systems Approach Towards High Energy Laser Implementation Aboard Navy Ships[R]. Naval Postgraduate School, Monterey, 2007.
- 5 T Steven, Fiorino, Robb M Randall, Richard J Bartell, *et al.*. Climate change: anticipated effects on high-energy laser weapon systems in maritime environments[J]. J Appl Meteor Climatol, 2011, 50(1): 153–166.
- 6 Boeing. Airborne Laser YAL 1[OL]. <http://www.airborne-laser.com>, 2007-3-15.
- 7 A Kalfoutzos. Free Electron and Solid State Lasers Development for Naval Directed Energy[R]. Naval Postgraduate School, Monterey, 2002.
- 8 Sean P Nile. High Energy Laser Applications in a Surface Combatant; Terminal Phase Theater Ballistic Missile Defense, Low Atmosphere Propagation, and Free Electron Laser Gain[R]. Naval Postgraduate School, Monterey, 2005.
- 9 E Rutherford. Navy Readies Free-Electron Laser Contracts, Looks at Two-Stage Development [OL]. <http://www.highbeam.com/doc/1G1-184615288.html>, 2008-8-15.
- 10 Boeing. Boeing Awarded US Navy Contract to Develop Free Electron Laser [OL]. http://www.boeing.com/news/releases/2009/q2/090415c_nr.html, 2009-4-15.
- 11 Northrop Grumman. Northrop Grumman Announces the FIRESTRIKE (tm) Laser, World's First Weaponized Solid-State Laser for U. S. Military Services[OL]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=154600, 2008-11-13.
- 12 Laser Focus World. Free Electron Laser Exceeds 14 kW in the Infrared[OL]. <http://www.laserfocusworld.com/articales/2006/11/free-electron-laser-exceeds-14-kw-in-the-infrared.html>, 2006-11-9.
- 13 Wang Xuejun. Developments and trends of US naval shipborne laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 27–37.
- 王学军. 美国海军舰载激光武器研发进展与趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 27–37.
- 14 Rao Ruizhong. Modern Atmosphere Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 15 Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo, *et al.*. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 433–437.
- 乔春红, 范承玉, 黄印博, 等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 433–437.
- 16 Zhang Pengfei, Fan Chengyu, Qiao Chunhong, *et al.*. Analysis of scaling laws for phase compensation of focused beam under thermal blooming conditions[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0213002.
- 张鹏飞, 范承玉, 乔春红, 等. 聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0213002.