

美国海军舰载激光武器研究进展

冯寒亮 刘彦升 韩锋 张平

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要 近年来,美国海军重点研究了可用于水面舰艇的三种激光器-光纤固体激光器、板条激光器和自由电子激光器。介绍了基于此三类激光器的几款舰载激光武器系统即“激光武器系统”、“战术激光系统”、“板条固体激光器”、“自由电子激光器”的构成、研究现状和试验进展,并讨论了其面临的关键技术问题。

关键词 激光器;舰载激光武器;板条固体激光器;光纤固体激光器;自由电子激光器

中图分类号 TJ953 文献标识码 A doi: 10.788/LOP51.020004

Progress on Development of US Naval Shipborne Laser Weapons

Feng Hanliang Liu Yansheng Han Feng Zhang Ping

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract In recent years, the US Navy has conducted development work on three major types of lasers for potential use on US Navy surface ships, including fiber solid state lasers (SSLs), slab SSLs, and free electron lasers (FELs). The structure, development and testing of some kinds of shipborne laser weapons are introduced. These laser weapon systems include Laser Weapon System (LaWS), Tactical Laser System (TLS), Maritime Laser Demonstration (MLD) and the Free Electron Laser System (FELS), all of which are based upon those three types of lasers mentioned above. Some critical technological challenges in the development are analyzed.

Key words lasers; shipborne laser weapon; slab solid state laser; fiber solid state laser; free electron laser

OCIS codes 140.3330; 140.3580; 060.3510

1 引言

美国海军的激光武器研制已历经40多年,先后研制出数种激光武器系统。尤其是近几年来,随着固体激光(SSL)技术的迅速发展,舰载高能激光武器转向实用化研究。其中,以舰载激光武器系统(LaWS)、海上激光演示系统(MLD)、MK38-战术激光武器系统(MK38-TLS)与舰载自由电子激光系统(FELS)等为代表。就目前发展来看,舰载固体激光武器的潜力正日益显现,美国海军正在积极推进此类舰载型激光武器的研发与部署。本文对美国海军舰载激光武器的研究进展做了回顾,并讨论了基面临的一些关键技术问题。

2 美国海军舰载激光武器系统研究现状与进展

现阶段,板条固体激光、光纤激光和自由电子激光是美国海军研究的主要方向(表1),并计划在未来数年内装备其水面舰艇^[1-2]。美国国防部“联合高功率固体激光”(JHPSSL)项目自2009年以来进展迅速,激光器输出功率突破了100 kW大关,现已进入外场试验阶段^[3-4]。同时,光纤激光器技术水平也有了大幅度提高^[5],在试验中取得了良好的效果。基于固体激光器的LaWS系统、MLD系统和MK38-TLS系统在外场试验中均成功拦截无人机、小艇等目标,取得阶段性成果。这给美国海军在未来数年内装备舰载固体激光武器的计划带来了巨大希望。而自由电子激光(FEL)系统的研发则一直处于将功率从10 kW量级提升到100 kW量级的技术攻坚阶段,同时由于其尺寸、稳定性等原因,难以在短期内实现舰载部署。

美国海军将舰载激光武器的部署计划分为三个阶段(表2)^[1-2]:一是近期到2017年前具备初始作战能力,重点发展50~100 kW光纤和板条固体激光器,以1 mile(约1609.3 m)近距离作战为主,主要目标包括光电

收稿日期: 2013-09-09; 收到修改稿日期: 2013-11-05; 网络出版日期: 2014-01-16

作者简介: 冯寒亮(1982—),男,助理研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: topgun234@163.com

传感器、小型舰船、无人机、火箭弹、炮弹、迫击炮弹等；二是中期发展 100 kW 级的固体激光武器，增强作战距离和毁伤能力，具备 10 mile 级拦截水面及空中目标能力；三是远期发展兆瓦级自由电子激光武器，具备反超音速反舰巡航导弹(ASCM)和弹道导弹的能力。

表 1 各型激光武器的参数比较^[6]
Table 1 Comparison of laser systems^[6]

Laser type	Slab SSLs	Fiber lasers	Free electron lasers
System	MLD	LaWS	MK38-TLS
	Northrop	Directed Energy Warfare	Boeing: Beam
	Grumman: Main Contractor	Office (DEWO): System Integrator	Director and Laser Weapon Module
System integrator	Naval Surface Warfare Center and Naval Air Warfare Center: Government test team	Naval Research Laboratory and Pennsylvania State Electronic-Optic Center: Laser designer Raytheon: CIWS integration effort	BAE Systems: MK 38 Machine Gun system integrator
Beam power	105 kW by coherently combining 7 laser beams of 15 kW each	32.4 kW by incoherently combining 6 laser beams	10 kW
Beam quality factor	Less than 3	1.7	2.1
Wall-plug efficiency /%	20~25	25	30
Wavelength	1.064 mm	1.064 mm	1.070 mm
Power requirement	400~500 kW	400 kW	75 kW
Technology readiness level (TRL)	Approaching 6 (Dec 2010)	5 (Jun 2010)	No more than 4 (2011)
Testing progress	Tested in sea environment	Tested in sea environment	Laboratory testing

2.1 海军激光武器系统

LaWS 系统概念最初由宾夕法尼亚大学光电中心于 2004~2005 年间取得突破，并由美国海军研究实验室于 2006 年进行深入研究和分析^[1]。这两个团队的研究都揭示了：没有必要利用商用光纤激光器通过相干合成的方式产生军用级的激光束，而是可以通过更为简单的非相干合成方法产生高功率光束。LaWS 计划的目的是要考察光纤激光武器的作战能力并为后继激光武器系统的研制提供借鉴，最终将 LaWS 系统独立安装到舰艇上或集成到“密集阵”近防武器系统(CIWS)上，以毁伤或干扰光电传感器、反无人机、光电制导导弹，增强雷达跟踪能力^[7]。当前 LaWS 系统的制造成本约为 3200 万美元，而每次发射成本不到 1 美元，其技术成熟度接近 6 级(相关环境下的系统/子系统模型或样机验证)。

LaWS 系统原型机采用 6 套成熟的工业用光纤激光器，每套激光器输出功率为 5.4 kW，6 束激光通过非相干合成使激光束总输出功率达到 32.4 kW，光束质量因子为 1.7，波长为 1.064 μm ，电光转换效率约为 25%^[1,7-9](图 1~3)。LaWS 系统光束定向器采用 500 mm RCOS 远焦望远镜，角加速度达 1.2 rad/s^2 。

2009~2010 年，LaWS 系统先后在沙漠环境和水上环境中成功击落数架无人机，摧毁刚性船体充气艇(RHIB)等^[10-11]。这些试验充分验证了采用光纤激光的舰载激光武器在典型环境中对数公里外动态目标探测、跟踪和

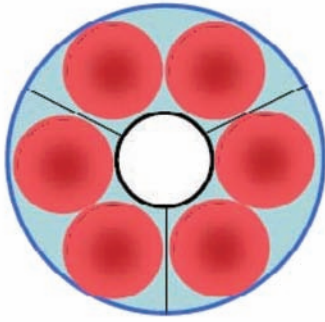


图1 非相干合成的6束激光

Fig.1 Six incoherently combined laser beams



图2 LaWS原型

Fig.2 LaWS Prototype

瞄准的能力,堵塞和干扰光电/红外传感器的能力以及摧毁低速无人机等目标的技术可行性。如果LaWS系统能够尽快转为有记录的项目(POR),该系统的生产版本大约在2017财年就可能具备初始作战能力^[1-2]。

表2 美国海军水面舰队舰载激光武器愿景

Table 2 US surface navy's generalized vision for shipborne high-energy lasers

Beam power	60~100 kW	300~500 kW	Higher than 1 MW
Missions	Countering unmanned air vehicles (UAVs), electro-optic (EO) guided ASCMs, enemy intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR) systems, and swarm boats, and used for precise tracking to support air defense missions conducted by electromagnetic rail gun (EMRG), ballistic missile defense (BMD) missions, augmenting the ship's radar, and enhancing general situational awareness	Capabilities in previous column, but with added range and a capability to counter ASCMs flying a crossing path toward another ship	Capabilities in previous column, but a capability for full-self defense operations against ASCMs and maneuvering reentry vehicles (MaRVs), and full BMD missions
Required ship power (in kW or MW) and cooling capacity*	Less than 400 kW, 68 t	Less than 2.5 MW 560 t	10~20 MW about 1400 t
Current weapon system TRL	5	4	2~3
Earliest potential initial operational capability (IOC)	2017	Around 2022	After 2025
Applicable ships	Could be backfit onto existing ships, as well as installed on new ships	Could be installed on future surface combatants, including potentially the Flight III DDG-51	Could be installed on future surface combatants, ships with integrated propulsion systems, and aircraft carriers

*Power and cooling requirements assume continuous firing of the laser with a 67% duty cycle (i.e., the laser is firing 67% of the time).

2012年,LaWS系统被安置在Arleigh Burke级驱逐舰Dewey号(DDG-105)上进行舰载测试(图4),并在San Diego外海成功击落3架无人机。这表明,美国海军激光武器的研发又上升了一个台阶,并正在加快该武器试验部署的步伐。

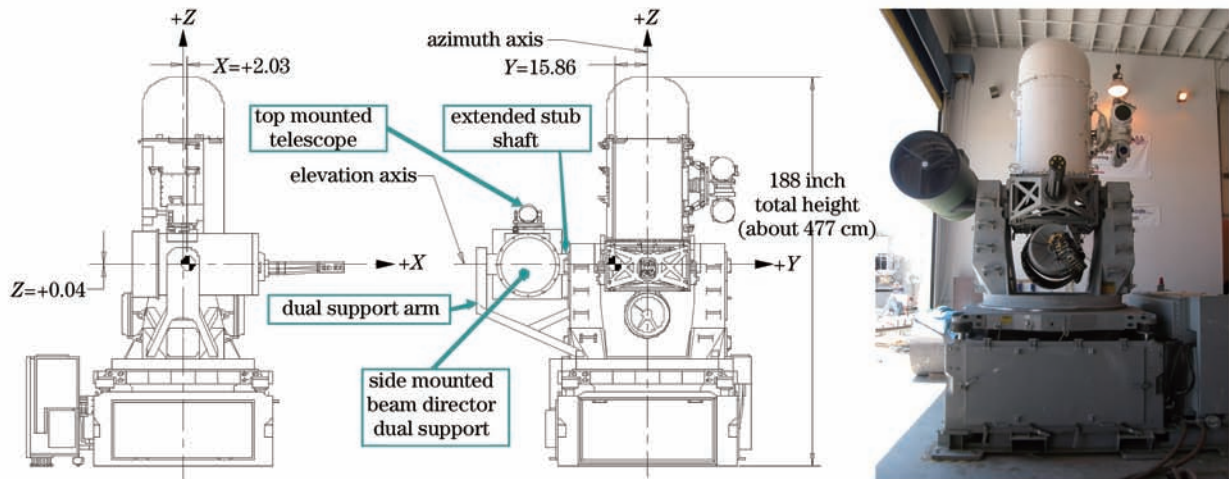


图3 LaWS系统与“密集阵”近防武器系统集成设计与实物

Fig.3 Rendering of LaWS integrated on CIWS mount

从照片上看,在Dewey号导弹驱逐舰舰尾的直升机甲板上堆放有一系列白色设备,其中包括多个设备方舱以及一个可开合的防护罩。这些应该是LaWS系统的电源模块(2套)、冷却模块(2套)以及激光器模块(3套,每套输出2束激光)。

从图5中可观察到激光器和光束定向器被安置在防护罩内,其功率供给由专门配置的两套发电机组,而非驱逐舰Dewey号提供(LaWS系统尚未与舰艇集成)。从外形和尺寸上判断,这两套发电机组可能是卡特皮勒(Caterpillar)XQ400和XQ100型发电机组,其输出功率分别为400 kW和100 kW。XQ400型发电机体积较大,可能是LaWS系统的主电源,这也表明,美国军方可能已经在着手进行100kW级LaWS系统的研制试验。体积较小的XQ100型发电机,可能是LaWS次级系统(包括跟瞄装置、机械致动系统、冷却系统等)的电源,或者作为备用电源。



图4 “Dewey”号驱逐舰舰尾甲板上的LaWS系统

Fig.4 LaWS installed aboard the Dewey (DDG 105)

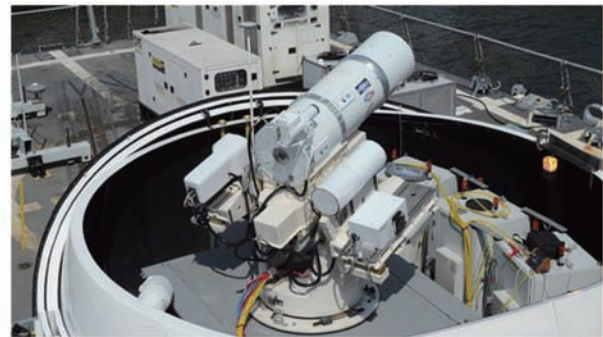


图5 防护罩内的LaWS系统

Fig.5 LaWS in the shelter

LaWS系统支持者们认为:与LaWS系统列装有关的挑战都已经得到克服,现在需解决的只不过是激光武器从陆地转移到海上环境中所遇到的工程问题,并且LaWS系统的输出功率有可能在2014财年被提高至100 kW^[1]。2013年4月,美国海军决定将LaWS系统于2014年初安装在Ponce号两栖船坞运输舰的前部平台上(该舰为美国海军在波斯湾的漂浮基地),并打算在波斯湾进行为期数月的测试。

2.2 海上激光演示系统

MLD项目属于海军研究办公室(ONR)定向能验证计划高能激光领域项目,是美国国防部“联合高能固体激光器”JHPSSL项目下的一个快速演示方案,并因JHPSSL板条固体激光器研究取得突破而获进展。MLD系统目的是集成和验证未来海上激光武器系统所需的具有重大创新性的成熟子系统技术,攻击目标为小型船只。原型系统将安装在美国海军DDG、LCS、CG、LSD、LPD、LHD和FFG等型舰船上。

MLD系统是一套由诺斯洛普·格鲁曼公司与L3公司共同研发的舰载激光武器样机,其技术基础是前者

的 JHPSSL105kW 固体激光器^[3,8-9,12](图 6,7)。

该激光器为板条激光器,采用光束合成技术,将多个功率为 15 kW 的单模块激光器光束合并输出产生高功率光束,并保持较好的光束质量。MLD 的输出波长为 1.064 μm ,输出效率为 20%~25%,并有望提高至 30%。每个 15 kW 激光器模块被安置在大约 1 foot \times 2 foot \times 3.5 foot (1 foot=30.48 cm)的线性替代单元内^[3,10,12]。目前,MLD 系统的技术成熟度为 5 级(相关环境下的部件/原理样机验证)。

2010 年,MLD 在波托马可河试验场进行了对多个海上静态目标的陆基打靶试验,并成功击穿了小型船只的船身,验证了系统的高精度瞄准和杀伤能力^[13]。2011 年,MLD 系统对 1.6 km 距离处的小型船只进行了海上环境杀伤演示试验,成功击中小艇燃料箱(图 8)。这是 MLD 首次使用军舰提供的动力,并首次与舰艇雷达、导航系统集成,在海上成功击中目标。



图 6 MLD 系统原型
Fig.6 MLD prototype



图 7 诺斯洛普·格鲁曼公司的 105 kW 固体激光器
Fig.7 Northrop Grumman 105 kW solid state laser



图 8 被 MLD 系统击中的小艇
Fig.8 A small target vessel damaged by MLD

MLD 项目在短短的几年时间内,就成功演示了舰艇防御能力,主要得益于陆军 JHPSSL 计划所取得的成果。美国海军也通过此项目获得了很多重要数据和可参考的信息,具备了成功将激光系统与战舰雷达及导航系统集成能力。以至于诺斯洛普·格鲁曼公司研究人员曾在 2011 年表示:他们能在 4 年之内建造一套处于工程与制造研发阶段的全功率武器系统。就目前发展来看,将板条激光器输出功率提高到 300 kW,光束质量因子提升至 2,已没有技术障碍,并最终有可能提高到 600 kW。届时,一套总输出功率为 300 kW 的系统体积大约为 4.5 foot \times 8 foot \times 12 foot^[1]。相关部门正在研究 MLD 系统在 DDG 和 LCS 等舰艇上集成的问题。MLD 系统正在稳步向舰载目标推进。

2.3 MK38 舰载战术激光武器系统

MK38-TLS 项目于 2008 年美海军军舰与伊朗武装快艇对峙事件之后启动。

MK38-TLS 是以现役的舰炮系统为平台,采用现有的成熟高功率光纤激光器,具有独立搜索、探测与跟踪目标的能力,兼具火炮和激光打击能力的舰载近程战术武器系统。其主要组成包括 MK38MOD2 型机关炮、一套 10kW 激光器和机动主动瞄准源综合试验装置(MATRIX)^[13](图 9)。其作战目标主要是针对大量的密集小型船只、水面舰艇和空中飞行器。

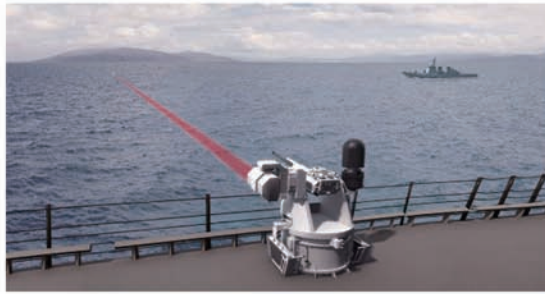


图9 MK38-TLS系统概念图

Fig.9 Rendering of TLS integrated on MK38 machine gun mount

1) MK38MOD2型机关炮:

MK38MOD2型机关炮是一种遥控式25 mm小口径舰炮系统,是美国海军作战舰艇上重要的自卫武器。该系统配备有光电系统,具备昼夜监视能力,特别适于对付小型、高速和灵活的水面目标,能够很轻易地集成到各类舰艇平台上。

2) 10 kW激光器:

MK38-TLS系统采用IPG公司的10kW单模光纤激光器(图10)。该激光器采用主振荡功率放大(MOPA)结构,输出波长为1070 nm,光束质量因子为2.1,并有望提高至1.5,电光转换效率约30%,功耗为34 kW。鉴于当前的光束功率和光束质量,在天气良好的海上环境中,TLS系统可以对付2 km距离以内的小艇等目标。



图10 MK38-TLS系统中采用的YLS-10000-SM激光器

Fig.10 YLS-10000-SM IPG 10 kW fiber laser used in MK38-TLS

3) 机动主动瞄准源综合试验装置(MATRIX):

MATRIX是由波音公司为美国空军研究实验室开发的一种移动式试验台,集成了测距雷达,可以为不同类型的激光器提供跟踪、瞄准功能。

4) 光束定向器(BD):

BD子系统可独立驱动,快速转动。该系统包括一个激光测距仪和MK38光电瞄准具,具备近红外(NIR)和中红外(MWIR)跟踪能力,增强了对舰艇型号、人员与武器威胁探测与识别的能力。

5) 热管理系统(TMS):

TMS利用丙烯乙二醇与水的混合物直接冷却,无需去离子水和其他特殊冷却程序。另外,由于TLS系统光纤激光器效率要高于其他固体激光器,使得TMS的重量、体积以及功率需求大大降低。

6) 电源功率管理系统(EPM):

EPM主要功能是为光纤激光器、热管理系统和MK38 MOD2机关炮提供功率转换、分配以及电路断电保护等功能。EPM系统安置在封装罩内,接入三相440 V,60 Hz的舰艇电力线路(TLS系统所需总功率约为75 kW)。

2011年,MK38-TLS演示样机在埃格林空军基地成功进行了作战能力评估试验。试验中,MK38-TLS系统对空中和水面目标进行了射击,试验表明TLS系统能够区分敌我活动目标。此次试验与以往的战术舰载高能激光(HEL)系统试验不同:1) MK38型机关炮平台仍然作为主要探测和演示平台;2) TLS系统进行了

从探测到交战杀伤的完整演习环节,演示了HEL系统识别和确认目标的能力及范围;3)收集了针对典型武装小艇的激光效应数据,以制定新的作战概念。

目前,BAE系统公司和波音公司正在通过内部资助,积极推动TLS系统试验,并希望在未来几个月进行舰载试验。下一步重点可能是继续进行下一级外场演示试验,在保持高光束质量的同时,提升激光模块的输出功率。

2.4 自由电子激光器

与其他各类激光器相比,FEL具有波长可调、输出功率大和效率高的点,因而受到美国海军的青睐。1995年,海军放弃“海石”计划后,启动了高能自由电子激光武器计划。FEL项目最初是一项基础研究项目,但在2010财年,该项目转变为创新性海军原型计划(INP),即研制100 kW的FEL样机,提高技术成熟度级别。ONR希望最早能够在2018年对该系统进行海上试验^[1,14-15]。

2006年,托马斯·杰斐逊国家实验室将FEL的输出功率提高到了14.2 kW^[16]。然而时至今日,FEL系统功率没有任何进一步的突破。2010年,波音公司成功完成FEL武器系统的初始设计,迈出了建立FEL原型进行海上测试的重要一步。

2010年,FEL项目取得了突破性进展,成功演示验证了FEL项目的关键技术部件——电子束注入器。随后通过了2011年的初步设计评审。然而在2011年,美国参议院军事委员会认为该项目的投资过大,技术成熟期过长,不确定性太高,而且武器系统最终应用于海军的技术风险太高,因而取消了2012财人对FEL项目的继续投资。但100 kW FEL系统所需组件、演示计划、制造、集成、测试等工作仍在继续^[1]。

就目前发展情况来看,海军的FEL计划发展一直比较缓慢。现阶段,海军一直在研究输出功率100 kW的自由电子激光器,并希望最终研制出输出功率1 MW的激光武器。将其功率提升到兆瓦级仍是首要挑战。此外,安全问题、舰载安装、可操作性、大气传输等一系列问题也亟需解决。总之,FEL系统要达到海军期望的目标还有很长的路要走。

2.5 舰载激光武器面临的问题

尽管美国国防部和海军的研究部门在激光武器开发过程中克服了众多技术挑战,取得了重大进展,但仍然存在一些困难。

在舰载激光武器技术成熟度方面,这些技术挑战主要可分为四类^[1]:

- 1) 在保持或提升光束质量、解决热管理问题的同时,将光束功率提升到更高水平;
- 2) 将各种武器原型机和演示验证机转化为适宜舰载安装、长时间运行和易于维护、批量生产的型号;
- 3) 将激光器与目标探测、跟踪设备以及光束定向器集成,构成完整的激光武器系统;
- 4) 激光武器系统与舰艇电力系统、舰艇作战系统的集成(舰艇传感器、计算机、显示器、武器集成等)。

比如,对FEL来说,面临激光束功率提升和舰载适宜性问题。LaWS等系统的列装问题已基本解决,更多的困难是将激光武器从陆地转移到海上环境中所遇到的工程问题,比如光学部件在海上潮湿环境中的维护、维修,武器系统体积、重量的缩减等问题。

在舰载激光武器搭载平台方面,由于舰载激光武器电力消耗极大,能否搭载该型武器主要取决于舰艇的供电和冷却能力^[1]。目前,美国海军现役水面舰艇中,没有一种舰型能够提供足够的电力和冷却能力,以搭载功率高于100 kW的固体激光器。即使“提康德罗加”级巡洋舰、Flight III DDG-51型驱逐舰、“圣·安东尼奥”级两栖登陆舰也只具备在作战条件下搭载略高于100 kW激光武器的能力。为此,造船厂已开始投资利用2.5万吨“圣·安东尼奥”级两栖登陆舰研究下一代两栖登陆舰技术,将充分考虑电能供应和可利用的内部空间,从而有效搭载高能激光武器。

3 结束语

近年来,随着固体激光器技术水平和作战效能的提高,美国海军舰载激光武器已经能够摧毁数公里外的水面和空中目标。这给美国海军在未来数年内装备舰载激光武器的计划带来了巨大希望。美国海军正在积极稳步地推进舰载激光武器的试验和应用,已经开始在驱逐舰上开展舰载试验,为今后几年实现舰上安装做好准备。更强大的舰载激光武器有望在未来数十年内研制成功,最终将使美国海军舰艇具备弹道导

弹末段防御的能力。未来20年,美国海军激光武器技术将进入快速发展、全方位部署与实战应用阶段。

参考文献

- 1 O' Rourke R. Congressional Research Service. Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress [EB/OL]. <http://www.fas.org/sgp/crs/weapons/R41526.pdf>, [2013-07-27] [2013-08-02]
- 2 Teng Xiaoli. The latest developments of the U.S. Navy shipborne laser weapons [J]. *OE Product & News*, 2013, 4(6): 27-30.
滕晓丽. 美国海军舰载激光武器的最新进展[J]. *光电产品与资讯*, 2013, 4(6): 27-30.
- 3 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.
- 4 Jay Marmo, Hagop Injeyan, Hiroshi Komine, *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[J]. *Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications 2009. Proc. of SPIE Vol. 7195 719507:1-6*.
- 5 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. The history, development and trend of coherent combining of laser beams [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2221-2234.
刘泽金, 周 朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2221-2234.
- 6 Ching Na Ang. Analysis of High Energy Laser Weapon Employment from a Navy Ship [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2012.
- 7 Robin Staton, Robert Pawlak. Laser Weapon System (LaWS) adjunct to the Close-In Weapon System (CIWS) [J]. *Leading Edge*, 2012, 7(4): 36-43.
- 8 Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(7): 16-29.
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(7): 16-29.
- 9 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1605-1618.
- 10 Zong Siguang, Wu Ronghua, Cao Jing, *et al.*. Developments and trends of high energy laser weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080016.
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): 080016.
- 11 Xu Dawei. Development trend and analysis of the shipborne laser weapon abroad [J]. *Ship Electronic Eng*, 2012, 32(1): 7-9.
徐大伟. 国外舰载激光武器的发展动向与分析[J]. *舰船电子工程*, 2012, 32(1): 7-9.
- 12 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.
- 13 Stephen Sohm, Pradip Kar, Kami Burr, *et al.*. American Society of Naval Engineers. MK38 Tactical Laser System [EB/OL]. <https://www.navalengineers.org/ProceedingsDocs/ASNE%20Day%202012/Papers/Sohm.pdf>, [2012-03-02] [2013-08-02].
- 14 Ren Guoguang. FEL opened door for extensive applications [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, 42(1): 3-6.
任国光. 自由电子激光器为广泛应用开启大门[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(1): 3-6.
- 15 Du Ruo, Zhu Aiping. U.S. Navy development of carrier-based free electron laser weapon [J]. *Cruise Missile*, 2009, (12): 20-22.
杜 若, 朱爱平. 美国海军发展舰载自由电子激光武器[J]. *飞航导弹*, 2009, (12): 20-22.
- 16 Mai Qing. US free-electron laser outputs power up to 14.2 kW [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(12): 7.
麦 青. 美自由电子激光器输出功率达14.2 kW [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(12): 7.