

高功率激光装备小型化轻量化技术

安海霞, 邓坤*, 闭治跃

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:自激光器问世以来,激光在各领域的需求和应用非常广泛,而随着高功率激光装备输出功率不断提高,重量与体积已成为制约高功率激光装备应用与发展的关键问题之一。由于当前高功率激光装备仍将提高输出功率作为其发展目标,加之高功率激光装备结构功能复杂、能量转换效率低等特点,制约了高功率激光装备小型化、轻量化的实现。本文在介绍高功率激光装备的特点及其小型化、轻量化技术约束的基础上,综述了装备常用小型化、轻量化技术应用、新型高功率激光技术应用、提高能量转换效率及散热效率等高功率激光装备小型化、轻量化实现途径,以及各种技术途径在高功率激光装备中已有的应用。根据高功率激光装备现状及特点,其在小型化、轻量化方面具有很大的发展空间及应用前景。

关键词:高功率激光装备;小型化;轻量化

中图分类号:TH745 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20171003.0321

Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment

AN Hai-xia, DENG Kun*, BI Zhi-yue

(*Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail:414dengk@caep.cn*

Abstract: Since the laser was invented, laser is widely demanded and applied in various fields. With the increase of the lasers' output power, the heavy weight and huge volume has become one of the restrictions for the development of high-power laser system. Because of the requirement for high power output, the complicated structure and low energy conversion efficiency, it is difficult for high-power laser systems to realize the miniaturization and lightweight. Features of high-power laser system and the restrictions in miniaturization and lightweight are introduced in this paper. On the basis of this, approaches such as application of miniaturization and lightweight technology for common equipment, new high-power laser technologies, methods to improve energy conversion efficiency and heat radiation efficiency which can match the characteristics of the high-power laser system as well as their use in high-power laser systems are reviewed. According to the characteristics and development situation of high-power laser system, these technologies have great potential in reducing the weight and volume efficiently.

Key words: high-power laser equipment; miniaturization; lightweight

1 引言

自 1960 年梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器以来^[1],激光因具有亮度极高、颜色单纯、相干性强、方向性好及通过凸透镜后能高度集中的特点在工业、医疗、信息科学、生物技术等领域获得广泛应用,高功率激光装备在军事领域的应用尤其有潜力^[2],同时很多高功率激光器的突破也来自军事应用需求。由于激光武器具有其他武器无可比拟的优势,如无后坐力、单次发射成本、后勤保障费用低等^[3]。各国争相研究将高功率激光技术应用于军事打击与军事防御,应用平台除了海基、地基外,还包括了陆军的坦克、装甲车,海军的舰船、潜艇,空军的轰炸机、无人机及歼击机等众多移动平台^[4]。应用于各平台的高功率激光装备经过多年的研究与试验,部分已实现了工程化的应用。

高功率激光器是高功率激光装备的核心部件,具有输出高功率、高光束质量激光束的功能^[5],随着激光技术飞速发展,激光输出功率大幅提升。高功率激光器种类繁多,已实现高功率输出的激光器包括二氧化碳激光器、HF/DF 化学激光器、氧碘化学激光器、固体激光器、半导体泵浦碱金属激光器、光纤激光器^[6]等。而随着激光输出功率的提升,激光装备的体积与重量也快速增长,一方面限制了高功率激光装备在移动平台上的搭载应用,另一方面阻碍了高功率激光装备总体性能的提高^[7]。无法满足平台对装备重量、

体积的要求,已成为制约高功率激光装备发展与工程化应用的重要问题之一。高功率激光装备输出功率及光束质量的发展现已能满足应用要求,但重量和体积是决定其能否工程化应用的重要因素,如何在保证激光装备输出功率及光束质量的前提下,减少激光装备的重量与尺寸,降低成本与能耗、扩大应用范围,对高功率激光技术的应用及发展具有重要意义。

小型化轻量化技术的研究与应用目前主要集中在航天、航空、汽车等领域,并取得了显著的效果^[8]。高功率激光装备作为一个复杂的光机系统,由多个分系统构成,包含的零部件众多,因此零部件的优化设计、复合材料等轻型材料的使用等常用的小型化轻量化技术的应用使高功率激光装备小型化轻量化研究方面已取得了较多进展,但自身的特点及约束决定了高功率激光装备集成到移动平台并实现成熟工程应用,在其小型化轻量化方面仍需大量的研究与探讨。

2 高功率激光装备小型化轻量化约束及特点

2.1 约束

2.1.1 结构功能复杂

高功率激光装备包含多个分系统:高功率激光器、总体控制分系统、光束控制与传输分系统和平台与能源辅助分系统,如图 1 所示。用以产生高功率高质量光束的高功率激光器是其核心组

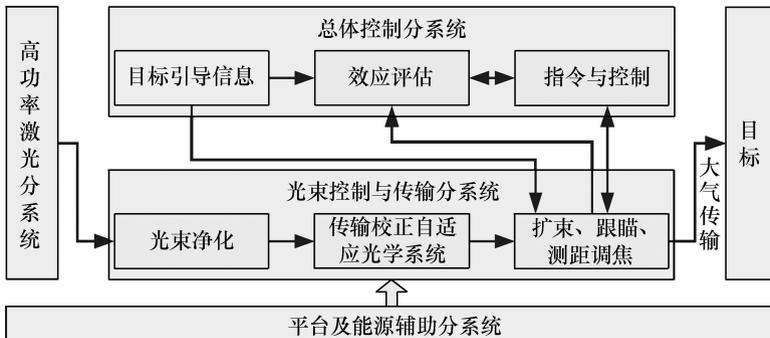


图 1 高功率激光装备系统构成

Fig. 1 Components of a high-power laser equipment system

成;平台与能源辅助分系统具有机械支持连接,保证光学系统稳定工作,实现精确跟瞄的功能,并为高能激光器及其他分系统提供电能及废热管理平台,是高功率激光装备正常工作的基础和保障;光束控制与传输分系统包括光束净化,传输校正自适应光学系统,扩束、跟瞄、测距调焦等部分,是高质量激光光束精确输出的直接保证;总体控制分系统具有提供目标引导信息、效应评估及下达指令与控制功能,各分系统在总体控制分系统的管理下协调工作,实现高功率激光装备的功能。

对于高功率激光装备这样一个庞杂的光机系统来讲,在设计、装配的过程中,满足各系统间集成要求的同时,需考虑各分系统功能实现的最优化。运用一体化设计、布局优化等小型化轻量化手段的过程中,还应该考虑到各复杂分系统后期维护及故障排查的工作空间。许多高功率激光武器方案,由于具有平台难以接受的系统尺寸和重量,限制了其在军事领域的应用。图2与图3分别给出了机载激光武器系统及其激光发射系统结构,曾一度停止研制的机载激光武器在发展实施过程中遇到困难之一同样是武器系统过重,新计划中美军仍将提高机载强激光武器系统效率和作战距离,减少系统尺寸与重量作为努力的方向^[9-10]。

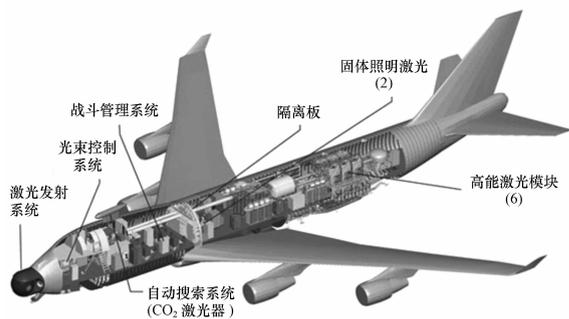


图2 机载激光武器系统

Fig.2 Airborne laser weapon system

高功率激光装备作为一个复杂的光机系统,其高功率激光器、光束控制与传输系统中包含众多光学器件。光学器件的尺寸及性能通常由出光功率及光束质量等的要求确定,且由于光学元件对安装位置、使用稳定性等要求很高^[11],光学器

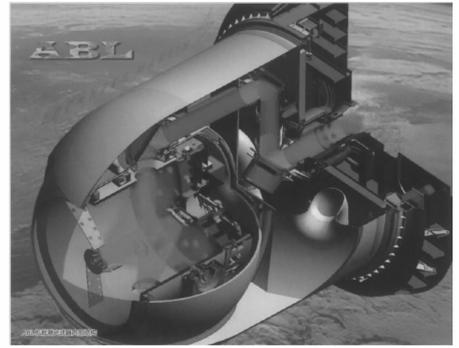


图3 机载激光武器激光发射系统

Fig.3 Emission system of the airborne laser weapon system

件的设计更多是满足并提高光学元件的各项性能,从而限制了小型化轻量化技术的应用发展。

2.1.2 能量转换效率低

激光系统由于能量转换效率普遍较低,能源及散热问题成为导致系统体积重量庞大的原因之一。表1中给出了用于舰载激光武器的各固体激光器的输出功率及转换效率^[12-14],虽然相较于化学激光器与气体激光器,固体激光器具有体积小、重量轻的优点,但由于其转换效率限制,工作产生废热多,造成冷却系统却十分笨重,导致固体激光器在集成到飞机、无人机等平台时仍存在很多困难。

表1 舰载激光系统固体激光器参数

Tab.1 Parameters of solid-state lasers for shipboard laser system

系统名称	激光器类型	转换效率/%	输出功率/kW
MLD	板条固体激光器	20~25	105
LaWs	光纤固体激光器	25	32.4
MK38-TLS	光纤固体激光器	30	10

液体激光器及化学激光器冷却系统相对比较简单,体积重量较小,但其能源及燃料供应系统却具有庞大的体积重量。

另外,高功率激光装备结构非常复杂,在实验室环境下能够满足出光功率及出光质量要求的激光系统,但在装配、集成进移动平台方面存在较大困难,同样也是制约其小型化轻量化的一个重要

因素。

2.1.3 特点

由于现阶段高功率激光装备发展重点仍多是提高激光器输出功率及光束质量,对高功率激光装备的优化设计并不多,因此装备常用小型化轻量化手段,如结构优化设计、工艺优化及材料优化等技术手段在实现高功率激光装备小型化轻量化方面具有很大潜力。

高功率激光装备结构复杂,包含零部件众多,各分系统及其部组件间的连接在激光装备重量中占有较大比例,通过轻量化工艺技术及模块化结构设计等轻量化手段,以及重心、整体布局合理配置等小型化手段的应用,可有效地实现小型化与轻量化。

在利用上述手段进行现有激光系统小型化轻量化的同时,探索发展新技术,设计制造更小、更轻的激光器、提高激光系统能量效率、提升冷却系统性能等对高功率激光装备尤为重要。

3 高功率激光装备小型化轻量化技术

3.1 装备常用小型化轻量化技术应用

装备常用小型化轻量化技术包括结构设计优化、一体化设计、工艺设计改进、轻型材料的匹配应用及布局优化等。长春光学精密机械与物理研究所采用真空辅助凝胶注模和反应烧结法等工艺制备了直径分别为 200 mm 和 500 mm 的两块超轻量化 SiC 反射镜^[15]。通过这些技术手段在高

功率激光装备综合应用研究中采用理论计算、有限元、数值优化及多目标优化等方法,应用相关的优化软件进行结构及材料的优化,以达到小型化轻量化的目的。通过综合考虑结构优化、材料和工艺各要素,在零部件层面能有效实现小型化轻量化。长春光学精密机械与物理研究所通过优化设计实现了主镜厚度减薄 20%,轻量化率 80%^[16]。Coleman B. Cobb 等通过改造为高能激光系统供电的发电机结构,利用高温超导线代替传统的铜线圈,实现了发电机的小型化与轻量化,有利于高功率激光系统在移动平台上的集成与应用^[17];在总体布局层面,通过合理设计,将各分系统内各仪器设备尽量集中布置,分系统间有连接关系的设备靠近布置,有效降低分系统间设备连接件的体积与重量。

通过采用新的结构或机构或原有机体的创新应用,尽可能减少零部件数量,使结构更紧凑,也是高功率激光装备模块小型化轻量化的重要手段。针对高功率激光装备这一庞杂的系统,尽量使总体布局设计合理,分系统内各仪器设备尽量集中布置,分系统间有连接关系的设备需靠近布置,以减少分系统间设备连接件的体积,降低整个系统中连接件重量。光机系统应合理设计光束传播路径,使光路尽量简单、紧凑,减少光路传输及支承等结构重量;同时,布局时进行质量特性的计算,将质心配平到系统理论质心,以减轻系统后期在质量测试过程中配平质心时所需配重块的重量,从而有效降低系统的体积,从而实现高功率激

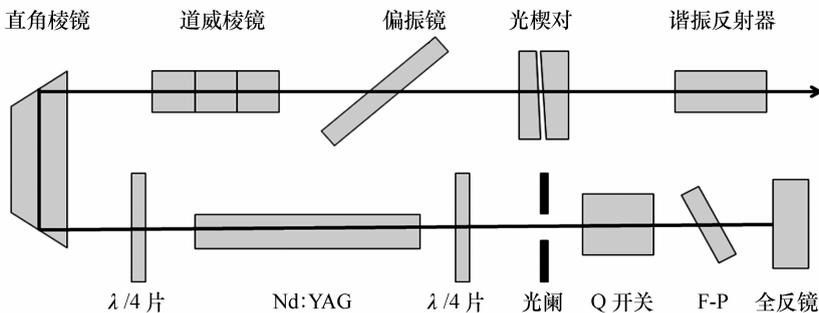


图 4 激光器系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the lasers

光装备的小型化、轻量化。由于对优化设计及布局考虑不多,已有的高功率激光装备大多体积比较庞大、构型比较笨重,优化空间很大。采用新结构实现光路优化是实现小型化轻量化的一个手段,例如,在二极管泵浦激光器中通过采用如图4所示的折叠或双层叠加结构,使用屋脊状棱镜形成折叠腔,达到了结构紧凑、小型化的目的^[18-19]。

根据不同应用平台进行高功率激光装备系统布局及整体结构的优化改进,采用多功能结构,既有利于平台本身能力的发挥,也有利于激光装备小型化轻量化发展。多功能结构指不仅具备传统结构支撑和传递载荷的性能,还具有集成电、热、提供能量等功能的作用。根据平台特点,采用新方法新技术将光路及支架、连接电缆、机箱、热控等集成为一体,最大限度的嵌入到结构的复合材料中,可以实现承受载荷、热传导、数据传输等功能^[11],是实现小型化轻量化的有效方法。现有陆基与海基激光武器较多,虽然他们对激光武器重量、体积及外形的要求较宽松,但庞大的质量与体积仍给平台带来了能源及强度各方面的压力。邵明振等在高功率脉冲 TEA 二氧化碳激光器中,利用环形流道式主机结构代替筒形主机结构^[20],如图5所示,将气体循环冷却系统直接作为激光器工作腔使用,将储能装置放在气体流场结构的中空部位,通过采用这些结构优化、功能结构合并及布局优化的方式实现了小型化与轻量化,体积、质量分别减少了30%和40%,效果显著。

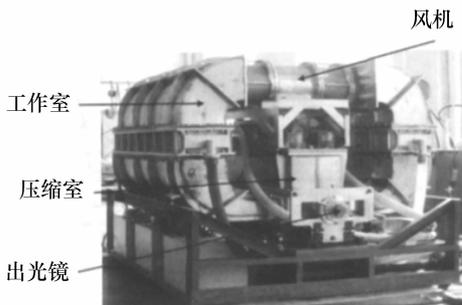


图5 环形通道式激光器主机

Fig. 5 Host of laser with cylindrical structure

3.2 新型高功率激光技术

探索新型高功率激光技术,是实现高功率激

光装备小型化与轻量化有效途径。早期高功率激光器应用多是化学激光器:HF/DF 化学激光器、氧碘化学激光器的输出功率都达到了兆瓦水平,从美国“星球大战”计划、弹道导弹防御计划、机载激光武器到战术高能激光武器,大部分研究与应用都是利用化学激光器作为其高能激光源^[21]。自由电子激光器作为有望达到兆瓦水平的高功率激光器,同样存在体积重量过大的问题,在军事应用方面多在对重量体积要求较低的海军领域^[22]。随着二极管泵浦技术的提高,二极管泵浦固体激光器输出功率大幅提高,超过了百千瓦水平,且因其用电驱动,不需要体积庞大的化学能源和后勤保障,体积与重量大大低于化学激光器,尤其是其寿命长、体积质量小、结构紧凑等优点,因而在军事领域发展迅速,在军事应用方面有很大潜力。如图6所示为1996年美国与以色列联合研制的高能激光武器采用了化学激光器,当时需要8个集装箱来装载激光系统。图7给出了波音公司研



图6 高能激光系统(HEL)

Fig. 6 High Energy Laser(HEL)



图7 高能激光机动演示器(HELMD)

Fig. 7 High Energy Laser Mobile Demonstrator (HELMD)

制的车载高能激光机动演示器(HELMD),将模块化的高能固体激光器安装在“Oshkosh”装甲车上,小型化、轻量化对比明显,且有效实现了机动平台应用^[23]。

近年来,随着光纤技术进步,光纤激光器以其体积小、高可靠性等优点受到重视,成为固体激光器的强力竞争对手,2010年,单纤输出功率达到了10 kW^[24]。2013年,德国莱茵公司报道了50 kW的高能光纤武器演示系统^[25],而国内武汉瑞科公司推出了10 kW的全光纤激光器^[26],光纤激光器在国内外发展都很迅速,在军事应用方面具有很大的潜力^[27]。

激光器的功率体积比和功率重量比是衡量其小型化轻量化的重要指标,此方面化学激光器最差,光纤激光器和固体激光器。通过提高单纤输出功率、光束合成技术等提高每千瓦输出功率的结构重量与尺寸,从而达到小型化轻量化的目的,但仍存在功率与体积重量比过大的问题。二极管抽运液体激光器系统综合了固体激光器尺寸小和液体激光器热管理简单的优点,具有重量轻、功率高的特点,已实现了比功率仅为5 kg/kW的目标^[7,28],如图8所示^[29-30]。



图8 高能液体激光器

Fig. 8 High energy liquid-state laser

而通用原子公司完成了“第三代激光系统”实验室验证,该技术继承自此前的“高能液体激光区域防御系统”(HELLADS),第三代激光系统采用了多项技术升级以改进光束质量,提高电光

效率,并有效减小尺寸和重量。集成样机非常紧凑,输出功率为150 kW,尺寸仅有1.3 m × 0.4 m × 0.5 m,重量仅为1 316 kg,如图9和图10分别给出了150 kW激光集成样机及其75 kW模块结构。该激光系统能装入通用原子的“复仇者”无人机的武器载荷舱中^[31-32],有效实现了激光器本身的小型化及轻量化及应用。

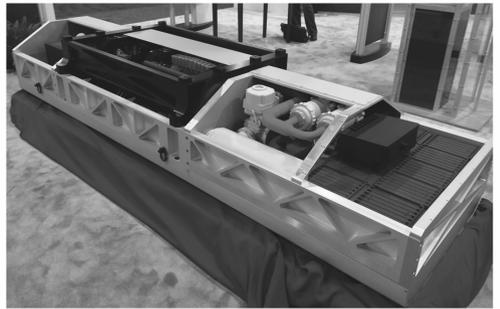


图9 150 kW激光集成样机

Fig. 9 150 kW integrated laser prototype



图10 75 kW激光模块

Fig. 10 75 kW laser module

提高激光器光束质量也是高功率激光装备小型化轻量化途径之一。就激光武器来说,很小的光束质量提高就能带来远距离目标上光斑能量密度的显著提升,对于以能量积累进行目标毁伤的激光武器,光束质量高,消耗的能源和产生废热都会减少。而能源与散热在高功率激光装备重量与体积中所占比例较大,因此能有效实现高功率激光装备的小型化与轻量化。

3.3 提高能量转换效率

提高激光器能量转换效率能有效缩减激光器体积重量^[6]。在保证输出功率的前提下,提高激光器能量转换效率,可大大减少能源部分重量,同时产生的废热会减少,废热管理部分的重量与尺

寸也会大幅降低。化学效率是氧碘化学激光器等化学激光器性能衡量的一个重要标准,表明能源中化学能转化为输出激光的比例。由于化学反应不充分、反应物配比带来的物质损失及产生的激光在激光腔内被吸收、散射、透射及衍射等产生的损失等,都降低了化学激光器的化学效率。要提高化学效率,就要减少各种能量损失,通过反应过程控制、喷嘴等零部件设计来提高化学激光器能量转换效率。美国通过利用重氢化合物取代过氧化氢燃料,在燃料中加入化学物质,改进燃料流速,提高激光器真空度的技术有效减轻了激光器器件的重量^[33]。

半导体激光器及其阵列的进展,推动了具有高效率、高稳定性、高光束质量的二极管泵浦固体激光器及固体激光器技术的发展,取代了传统的弧光灯泵浦,极大地提升了激光器效率。在联合高功率固体激光器(JHPSSL)计划中,由诺斯罗普·格鲁曼公司研制的电驱动固体激光器虽实现了105 kW输出,但激光器体积庞大,且效率只有20%,而提出的坚固型电激光器倡议(RELI)项目旨在将效率提高到30%,并降低系统的重量与体积^[34-35]。激光器输出功率与激光头上所耗电功率的比为电光效率,不仅是评价高功率激光器运行成本的重要因子,而且是度量能耗及热管理需要的重要指标。提高二极管泵浦激光器电光效率的重要途径包括激光腔的优化设计、高吸收效率、高量子效率的激光晶体的选择应用及采用光纤结构的激光介质等。美国洛克希德·马丁公司开发的新型模块化光纤激光器的能量转换效率达到了40%^[36]。

3.4 提高散热效率

转换效率低、废热多使热管理问题成为制约高功率激光装备小型化轻量化的重要因素,尤其是固体激光器。激光器件的优化设计与冷却技术的综合应用是有效提高散热效率的重要手段。以二极管泵浦固体激光器为例,激光介质的几何构型对其散热性能有较大的影响,棒式和板条式激光介质因其尺寸限制存在比较严重的废热问题;将介质棒的长度缩短到远小于其直径而产生了薄片式激光介质,不仅减小了热效应,且增大了散热面积,可直接将薄片晶体固定在热沉上进行散热;

将介质的直径缩小、长度增长而产生的光纤结构的激光介质,可将废热由光纤结构介质侧面排散。随着冷却理论与技术的发展,微通道液体对流换热、固体冷却、喷雾冷却及微热管冷却等多种冷却方式的发展^[37],冷却系统的冷却效率及整体性能不断提升,为高功率激光装备小型化与轻量化提供了基础。杨晓涛^[38]等设计了如图11所示的侧面抽运风冷Nd:YAG脉冲激光器,通过采用半导体热电制冷配合风扇的风冷系统,省去了体积庞大的水冷系统,有效实现了小型化轻量化。

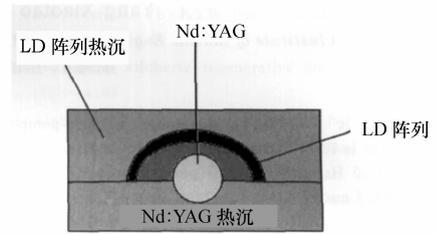


图11 抽运模块结构图

Fig. 11 Structure of pumping module

4 结束语

随着高功率激光装备的不断发展及应用平台范围的不断扩大,高功率激光装备在各领域的需求与应用日益广泛,对其输出功率也提出了更高的要求。而随着高功率激光装备输出功率的不断提高,重量、体积已成为制约高功率激光装备发展与应用的瓶颈问题之一,甚至成为导致高功率激光装备无法在某些机动平台应用的直接原因,发展高功率激光装备小型化轻量化已是大势所趋。

高功率激光装备作为复杂的光机系统,结构功能繁杂,包含了多个分系统及众多的光学零部件。激光系统能量转换效率低的特点使能源及热管理分系统重量与体积增加,导致了高功率激光装备质量大、体积大,在装配及集成进移动平台方面存在较大困难,高功率激光装备小型化、轻量化需求迫切。

现阶段对高功率激光装备小型化、轻量化考虑不多,因此具有很大优化潜力与空间。无论是使用结构优化、工艺优化及轻型材料选用等通用的轻量化手段,还是采用新结构设计、新型高功率

激光技术及能量转换效率提升等都是实现高功率 激光装备小型化、轻量化的重要途径。

参考文献:

- [1] MAIMAN T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. *Nature*,1960,187(4736):493-494.
- [2] SHE HUI,TAN SHENG. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared Laser Engineering*,2002,6(31):267-271.
- [3] ROBERT J. PAWLAK. Recent developments and near term directions for Navy laser weapons system(LaWS) testbed [J]. *SPIE*,2012,8547:854705.
- [4] NA ROSO,RDC MOREIRA,JEB OLIVEIRA. High power laser weapons and operational implications[J]. *J. Aerospace Technology & Management*,2014,6(3):231-236.
- [5] 苏毅,王敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
SU Y,WAN M. *High Energy Laser System*[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2004. (in Chinese)
- [6] 罗威,董文锋,等. 高功率激光器发展趋势[J]. 激光与红外,2013,8(43):845-852.
LUO W,DONG W F,*et al.*. Development trend of high power lasers[J]. *Laser & Infrared*,2013,8(43):845-852. (in Chinese)
- [7] 任国光. 高能液体激光器升温正在走向系统集成[J]. 强激光研究与发展,2005,2:1-8.
REN G G. Development of high energy liquid Laser and its system integration phase[J]. *High Energy Laser Research & Development*,2005,2:1-8. (in Chinese)
- [8] 王存恩. 航天器件微小型化的必要性和紧迫感[J]. 863 航天航空技术,2006,12:8-17.
WANG C E. Necessity and pressure of micro and miniaturized space devices[J]. *863 Technologies of Aviation and Astronautics*,2006,12:8-17. (in Chinese)
- [9] Jane's Electro-Optic Systems. Boeing/Lockheed Martin/Northrop Grumman YAL-1A Airborne Laser Testbed(ALTb) programme[EB/OL]. <http://janes.ihs.com>,2012,1:1-3.
- [10] 杭任. 美国机载激光武器及发展趋势[J]. 航空档案,2015,1:6-10.
HANG R. Progresses and prospects of american airborne based laser weapons[J]. *Aviation Archives*,2015,1:6-10. (in Chinese)
- [11] PAUL R. YODER. *Opto-Mechanical Systems Design*(Third Edition)[M]. SPIE Press,2006.
- [12] WARWICK, GRAHAM. Navy to demo 150-kW laser weapon for destroyers[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2016,1.
- [13] SCOTT,RICHARD. ONR contracts Northrop Grumman for solid-state laser weapon system demonstrator[J]. *Jane's Navy International*,2015,9(120).
- [14] MATRIX Tactical Laser Weapon Demonstrates Counter-Swarm Techniques[EB/OL]. http://defense-update.com/20110830_mk30mod2_tactical_laser_systems.html.
- [15] 董斌超,张弢. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程,2015,8(23):2185-2191.
DONG B CH,ZHANG G. Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,8(23):2185-2191. (in Chinese)
- [16] 李志来,徐宏,关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. 光学精密工程,2015,6(23):1635-1641.
LI ZH L,XU H,GUANG Y J. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,6(23):1635-1641. (in Chinese)
- [17] COLEMAN B. COBB. Lightweight, compact superconducting power sources for solid state high energy lasers[C]. Proceeding of Intersociety Energy Conversion Engineering Conference(IECEC), Washington, DC, USA,2002:66-69.
- [18] AFZAL R S. Performance of the GLAS laser transmitter[J]. *SPIE*,2006,6100:1-9.
- [19] 胡文华,任士龙,刘传胜,等. 小型化单横模单纵模激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器[J]. 光学仪器,2013,3(35):70-76.
HU W H,REN SH L,LIU CH SH,*et al.* Miniature single transverse mode single longitudinal mode LD pumped Nd:YAG

- laser[J]. *Optical Instruments*,2013,3(35):70-76. (in Chinese)
- [20] 邵明振,邵春雷. 高功率脉冲 TEA CO₂激光器主机结构设计与流场优化[J]. *红外与激光工程*,2012,6(41):1508-1513.
SHAO M ZH,SHAO CH L. Design of structure and optimization of flow field for mainframe of high power TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,6(41):1508-1513. (in Chinese)
- [21] 桑凤亭,金玉奇,多丽萍. 化学激光及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
SANG F T,JIN Y Q,DUO L P. *Overview and Usage of Chemical Lasers*[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006. (in Chinese)
- [22] TODD A M M,COLSON W B,NEIL G R. Megawatt-class free-electron laser concept for shipboard self-defense[J]. *Free-Electron Laser Challenges*,1997,2988:176-184.
- [23] LAVAN M J,WACHS J J. U. S. Army High Energy Laser(HEL) technology program[J]. *Technologies for Optical Countermeasures VIII*,2011,9(8187) :818704.
- [24] RICHARDSON D J,NILSSON J,CLARKSON W A. High power fiber lasers:current status and future perspectives[J]. *J. Optical Society of America B*,2010,11(27):B63-B92.
- [25] LUDEWIGT K,RIESBECK T,GRAF A,et al. . 50 kW laser weapon demonstrator of Theinmetall Waffe munition[J]. *Technology and Systems. International Society for Optics and Photonics*,2013,8898:88980N.
- [26] 中国光电网. 武汉锐科推出 10kW 光纤激光器[EB/OL]. <http://www.optochina.net/html/zx/xw/41994.html>,2014-03-18.
Chinese Opt-electrical Web. 10 kW Fiber Laser of Ruike in Wuhan[EB/OL]. <http://www.optochina.net/html/zx/xw/41994.html>,2014-03-18. (in Chinese)
- [27] QU Z,LI Q,MENG H,et al. . Application and the key technology on high power fiber-optic laser in laser weapon[J]. *SPIE*,2014,9294:92940C.
- [28] SWEETMAN,BILL. Laser technology heads for key tests. aviation[J]. *Week & Space Technology*,2015,31(177).
- [29] High Energy Liquid Laser Area Defense System(HELLADS) Programme,United States of America[EB/OL]. <http://www.airforce-technology.com/projects/high-energy-liquid-laser-programme/>.
- [30] HELLADS[EB/OL]. <http://www.ga-asi.com/hellads>.
- [31] WARWICK,GRAHAM. General atomics;third-gen electric laser weapon now ready[J]. *Aviation Week & Space Thchnology*,2015,3(1):30-31.
- [32] General Atomics;Third-Gen Electric Laser Weapon Now Ready[EB/OL]. <http://aviationweek.com/technology/general-atomics-third-gen-electric-laser-weapon-now-ready>.
- [33] 王祖典. 美减轻机载激光器重量[J]. *国防科技-2*,2005,1:29.
WANG Z D. America lose weight of the airborne based laser[J]. *National Defense Technology-2*,2005,1:29. (in Chinese)
- [34] HECHT,JEFF. LOOKING BACK/LOOKING FORWARD;a long way from the ruby laser[J]. *Laser Focus World*,2015,2(51):23-29.
- [35] Joint High Power Solid State Laser(JHPSSL)[EB/OL]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/jhpssl.html>.
- [36] 美国研发新型激光武器有望应用于 F-35 战斗机[J]. *中国光学*,2016,9(1):176-177.
U. S. developed a new laser weapon which is expected to be used to F-35 fighter[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):176-177. (in Chinese)
- [37] 田长青,徐洪波,曹宏章,等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. *中国激光*,2009,7(36):1686-1692.
TIAN C Q,XU H B,CAO H ZH,et al. . Cooling technology for high-power solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*,2009,7(36):1686-1692. (in Chinese)
- [38] 杨晓涛,马修真,刘友. 高能激光二极管侧面抽运风冷 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. *激光与光电子学进展*,2011,11(48):11405.

YANG X T, MA X ZH, LIU Y. High-energy LD side-pumped Q-switched air cooling Nd:YAG laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 11(48): 11405. (in Chinese)

作者简介:



安海霞(1989—),女,甘肃临夏人,硕士,助理工程师,主要从事光机结构设计等方面的研究。E-mail: ahxbuaa@126.com



邓坤(1987—),男,四川南充人,硕士,助理工程师,主要从事系统总体设计等方面的研究。E-mail: 414dengk@caep.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail: yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com