

文章编号: 1001-3806(2006)04-0418-04

## 新型战术高能液体激光器

任国光

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 评论了化学激光器和固体激光器的现状和主要问题, 介绍和讨论了高能液体激光区域防御系统的特点、任务、发展规化和现状, 以及主要组成和关键特性。

**关键词:** 战术激光武器; 高能液体激光区域防御系统; 高能液体激光器; 化学激光器; 固体激光器

**中图分类号:** E928.9      **文献标识码:** A

## New tactical high energy liquid laser

REN Guo-guang

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The developing status and major problems of chemical and solid-state lasers are briefly reviewed. Subsequently, the features and mission, the developing plan and status, as well as the major constitutions and key characters of high energy liquid laser area defense system are described and discussed.

**Key words:** tactical laser weapon; high energy liquid laser area defense system (HELLADS); high-energy liquid laser; chemical laser; solid-state laser

### 引 言

军用高能激光器经过 30 多年的发展, 正处在成为实用武器的边缘, 它们目前面临的主要挑战是如何把激光器系统集成进对重量和体积敏感的飞机、地面车辆和舰只上。自上世纪 70 年代开始发展激光武器技术以来, 研究与发展工作的 3 个重点是提高激光器的平均输出功率、改善光束质量和使系统小型轻量化。从目前的发展来看, 平均输出功率和光束质量已达到了实战的要求。DF/HF 化学激光器系统和化学氧碘激光器的平均输出功率已达到兆瓦级, 并具有优良的光束质量。美国陆军的固体热容激光器的输出功率已达 29kW, 采用腔内自适应光学系统有望使光束质量达到 1.5 倍衍射极限。空军的 Nd:YAG 激光器最近输出功率也达 23kW, 工作时间达 300s, 从诺·格公司以往在大功率固体激光器系统中采用受激布里渊散射池校正系统畸变的效果来看, 使光束质量  $\leq 1.5$  倍衍射极限似乎不成问题<sup>[1]</sup>。今年将开始研制 100kW 的固体激光器, 预计 3 年内完成。

重量和体积是决定激光系统能否部署的重要因素, 尽管通过提高激光器的效率, 采用非冷却高功率光

学部件, 采用复合材料和陶瓷材料制作激光器的零部件和使压力恢复系统小型化等措施, 已使激光器在小型化、轻量化方面取得了许多进展。但即使是成熟的化学激光器, 要把它集成进平台仍面临严峻的挑战。美国陆军开发的战术高能激光系统 (采用 DF 化学激光器) 已成功地拦截了火箭弹、大炮炮弹和迫击炮弹, 但整个武器系统重 180T, 运输时要装 8 个集装箱。现在为了机动化要把它缩小 4/5 装在车上, 就遇到了麻烦。由于陆军担心系统太笨重, 已决定终止机动战术高能激光计划<sup>[2]</sup>。空军的机载激光计划已研制出兆瓦级的化学氧碘激光器, 但要把它集成进改装的波音 747 货机仍面临挑战。若按原计划要将 14 个模块装入飞机, 那可能还需要一个长期的小型轻量化过程<sup>[3]</sup>。下一代的固体激光器虽然比化学激光器小得多, 但为了保持激光器的冷却所需的气体、液体和喷雾装置也是十分笨重的, 所以, 要把固体激光器集成进喷气战斗机和无人作战飞行器, 在相当长的一段时间里仍然是一大难题。因此, 在继续使化学激光器和固体激光器小型轻量化的同时, 还必须找到一条能制造更轻和更小激光器系统的道路。

美国国防部正在为战斗机和无人作战飞行器开发一种先进的轻量战术激光系统。这种称为高能液体激光区域防御的系统 (HELLADS) 所采用的激光器是目前国防部正在开发的高能激光器中两种更小、更轻的激光器之一 (另一种是空气激光器)。HELLADS 的设

作者简介: 任国光 (1938-), 男, 研究员, 主要从事强激光技术发展研究工作。

E-mail: ren\_huang@sina.com

收稿日期: 2005-07-11; 收到修改稿日期: 2005-08-16

计目标是比质量小于  $5\text{kg/kW}$ ,这就使其质量比目前正在开发的高能激光器系统轻一个量级,从而使高能激光器可以方便地集成进小型、机动的战术平台,因此,它算得上是一种独特的突破性概念。

HELLADS计划已取得很大的进展,目前,正处在该计划5个发展阶段中的第3阶段。2005-05-05,洛·马公司被选为HELLADS的集成者,这意味着系统开始走向集成阶段。

## 1 HELLADS的特点和任务

美国国防高级研究计划局一直在推动能集成进战术飞机和无人作战飞行器的小型机动系统,它能用于广泛的战术平台,能安装在地面战车、喷气战斗机、直升机和无人机上。好几年以来,美国国防高级研究计划局一直在资助用液体冷却高能激光器的研究项目,采用这种方法,即使是处在冷却中的激光器也能不断地发射激光。这就为高能激光器装上地面战车、喷气战斗机和直升机铺平了道路。

2003年3月,美国国防高级研究计划局局长TETHER在国会作证时说,为了有助于装备战术平台,HELLADS计划正在开发一种新型的高能激光战术系统,它独特的冷却技术可使新系统比目前正在开发中的高能激光系统轻10倍,尺寸小得多,而且成本可以降低一半<sup>[4]</sup>。

HELLADS是一种先进的二极管抽运液体激光器系统,它综合了固体激光器和液体激光器技术的优点,使其具有重量轻、功率高的特点。HELLADS的设计将有比固体激光器更小的尺寸和与固体激光系统不相上下的高功率输出,同时具有液体激光器的热管理特性。现正在开发的大功率固体激光器要受器件产生热量的限制。相比之下,液体系统有随着液体介质通过系统流动而把热量排出的优点,从而避免了在玻璃和晶体基质中必然产生的光畸变和双折射。另外,因为在液体介质中的稀土离子浓度远比玻璃和晶体基质中的稀土离子浓度高,通过利用能量靠近激光发射的较弱抽运吸收带可进一步降低由热引起的畸变。这些都方便地解决了热管理的问题。

HELLADS系统适合装备多种空中和地面的战术平台,用来保护固定的设施和人口中心,用于边界巡逻和非军事区巡逻,有能力对抗敌方的军事行动,并能以光速与战术导弹、火箭、大炮炮弹和迫击炮弹交战。

HELLADS计划将研究和验证能使高能激光武器系统轻量化的革命性激光器设计。这项计划的目标是开发一个具有高束质的  $150\text{kW}$  高能激光武器系统,同时系统的质量将比目前正在开发的激光系统低1个量级。HELLADS计划将设计、制造和试验一个原型激光

器( $1\text{kW}$ ),并将完成关键性能参数的实验室演示验证。随后将制造和试验一个子标度( $10\text{kW}$ )的高能激光器,一旦演示验证了关键的武器系统参数,就将制造和演示全尺寸的  $150\text{kW}$  高能激光器。最后,将把  $150\text{kW}$  的激光器集成进一架代用飞机,并进行关键性能参数的演示验证<sup>[5]</sup>。计划预期在2009年完成。

## 2 HELLADS的发展规化和现状

通用原子公司为美国国防高级研究计划局研制HELLADS样机,已取得进展,将开始走向系统的集成阶段。最近,它已选择洛·马公司作为系统的集成者,通用原子公司将负责开发轻量激光器、热管理、激光武器的功率和控制子系统,而洛·马公司将负责研制捕获、跟踪和瞄准系统,以及武器系统的系统工程和集成工作。洛·马空间系统公司副总经理MAGNRE说:“HELLADS迄今取得的创新和进展确实令人印象深刻,我们正在与通用原子公司和国防高级研究计划局一起工作,实现这种武器系统的革命性潜力”<sup>[6]</sup>。当然,这个雄心勃勃的设计,还需要发展许多技术。

HELLADS的发展规化是:(1)对共振腔,激光增益和系统热特性进行关键的技术演示;(2)研制和试验  $10\text{kW}$  级的子标度高能激光器系统;(3)完成  $150\text{kW}$  激光武器系统的详细设计和开始建造工作;(4)在地面试验中演示验证  $150\text{kW}$  高能激光系统的性能;(5)把高能激光器集成进代用飞机;(6)在拦截飞行试验中,演示验证  $150\text{kW}$  高能激光系统的性能(2009年完成)。

HELLADS计划目前正处在它的5个发展阶段中的第3阶段,在这一阶段将发展在实验室演示子标度激光系统样机所需的技术。这个子标度演示器应与最后的武器系统有相同的几何结构和在差不多的积分通量下工作<sup>[7]</sup>。同时,在第3阶段也将并行研制一些专用部件,包括先进的照明激光器和轻量的束定向器。

按目前的计划,第4阶段将建造一台接近  $150\text{kW}$  平均功率的地基激光武器系统演示器。在本阶段建造的演示器将采用能演示最后武器系统能力的设计和材料。这种能力包括达到低的比质量( $5\text{kg/kW}$ )和适合部署在战术系统上(如高机动多用途轮式车辆或战斗机)的紧凑的几何结构。在HELLADS计划的第4发展阶段中,政府将选定平台。最后发展阶段(第5阶段),包括工程技术、制造、集成和在一个战术平台上演示一个完整的HELLADS武器系统。

因为激光器、热管理、功率和控制子系统必须与战术平台上的机械、功率、传热和控制系统集成在一起,而且束控、火控与捕获、跟踪和瞄准系统也必须集成在战术平台上。为了便于平台集成和接口控制,确保从

实验室激光器平稳过渡到可部署的武器系统,要求系统的集成者——洛·马公司在目前的实验室阶段就参与 HELLADS 的各种工程活动。另外,集成者也将负责提供输入信号,以便设计第 4 阶段的武器系统演示器,并将负责建造第 4 阶段的各种部件。在第 5 阶段,洛·马公司将协助武器系统的工程制造和在战术平台上的演示。这些任务包括目标的捕获和跟踪、束控/火控,以及各种子系统在战术平台上的集成。

### 3 HELLADS 的主要组成和关键特性

#### 3.1 激光器

近红外波长或更短波长的高平均功率激光器有着许多用途,包括远距离定向传输功率、激光导引星、照明器、材料加工和武器等。染料激光器在可见光和近红外波段能有效地产生高平均功率激光,光束质量因子  $M^2 = 2 \sim 10$ 。能用许多不同的技术来激励增益介质,这就导致了从相同的染料激光器方案可产生超短脉冲的输出光束(飞秒级)到连续波输出<sup>[8]</sup>。染料激光器有许多有价值的特性,以及相当大的适应性,所以有着广泛的应用。经过 30 多年的发展,液相染料激光器已经是成熟的技术。

染料激光器的光学装置非常简单,特别是液相染料激光器。它把装有染料溶液的密封染料盒放在一对反射镜之间,形成共振腔,将外部二极管产生的激光束聚焦到染料盒中,就能产生激光。以往染料激光器采用闪光灯抽运,近年来已改用二极管激光器抽运,使其性能大有改善。此外,采用激光抽运系统的染料盒很小,因为激光有高的辐射度,所以需要用来激发染料溶液的激光束相互作用长度较短。采用激光抽运时,染料溶液的体积分数大约是  $10^{-3}$ 。然而如果需要获得持续输出,则在机械上就要复杂一些,它需要一个机械泵使染料溶液在贮液器与共振腔中需要的其它部件之间循环流动。

高能液体激光器的一个具体例子是用二极管激光器抽运溶解有稀土离子的无氢(无施受)液体,液体介质的流动依靠由一个泵和一个热交换器组成的闭合回路循环系统完成。若将稀土离子溶解在水或其它含氢的溶剂里,由于振动猝灭将大大缩短这些稀土离子的上激发态寿命,因而,它们不适合用作激光介质。通过去除氢和采用无施受溶剂(例如氧化氯硒),可以解决这一问题。将各种稀土金属溶于无施受溶剂中进行的研究表明,金属钕具有最好的性能。已成功地演示过高功率的无机液体激光器,它是将钕盐溶于无施受的酸性溶液中。

与任何固体装置相比,这种液相技术的一大优点是容易从增益介质中排除热量,这个特性直接导致了

这种激光器能以高能脉冲在高重复频率下工作,这就可以获得高的平均功率输出。利弗莫尔国家实验室在上世纪 90 年代初,利用染料激光器就获得了 2.8kW 的平均功率输出,波前质量小于  $\lambda/10\text{RMS}^{[9]}$ 。2003 年,利弗莫尔又研制了一种具有更高功率的高束质液体激光器,它采用溶有钕盐的无施受液体作激光介质,通过直线通道流过激光腔,用二极管激光器照射流通过道的液体介质。激光器获得了 20kW 的功率输出,光-光效率 28%,电-光效率 13%,增益长度仅 30cm,液流通道宽 1cm,高 2cm,液体流速  $1015\text{galbn/m in}^{[10]}$ 。

最近,染料激光器的研究重点已转向固相技术,研究二极管抽运固体染料激光系统被认为是通向具有长使用寿命,更小型系统的道路。PSI 公司的染料激光器小组在 2004 年,首先报道获得了成功<sup>[11]</sup>。但将染料掺入固体材料中不能很好地解决散热问题,容易引起光学质量变坏,甚至是损坏激光器,所以,目前还只是低功率的装置。

#### 3.2 捕获、跟踪和瞄准

HELLADS 要对付的目标包括(但不限于此):火箭、大炮炮弹、迫击炮弹、巡航导弹、地空导弹和空空导弹。捕获、跟踪和瞄准系统将包括基于雷达/红外的目标捕获系统,它将向基于激光照明器的信标跟踪器提供高分辨的提示信号。由于这些小型武器的尺寸小、速度快和射程短,这就要求捕获、跟踪和瞄准系统响应快、精度高和灵敏度高。另外,由于采用喷气战斗机和无人机作平台,所以,也要求捕获、跟踪和瞄准系统尺寸小、重量轻。

#### 3.3 火控

火控系统包括用作捕获、跟踪和瞄准系统与束控系统之间接口的系统部件。在这种情况下,火控主要与目标的识别、测距、测量大气畸变、波前校正矩阵的产生、获得所需杀伤几率的辐照度和人机接口有关。

#### 3.4 束控

束控涉及到从激光器到武器系统输出孔径的整个光路,束控系统包括把照明光和高功率激光组合进共孔径所需的光学部件,校正大气畸变和瞄准所需的快速倾斜镜和变形镜,以及各种诊断工具。还必须发展一些专用部件,如照明激光器、束定向器等。

#### 3.5 光束质量

HELLADS 的总目标是要在远场产生高的辐照度,它要求激光束有非常好的光束质量,这就需要校正大气畸变,以及可能需要在激光共振腔中进行预校正,因此,HELLADS 需要开发集成的波前传感器/自适应光学组件。该组件要能区分外腔快速倾斜镜与可能是内腔或外腔的自适应光学之间的主要畸变,以产生最佳

的波前控制组件。

### 3.6 激光的杀伤力

虽然,HELLADS的激光器能工作在脉冲和连续波两种模式,但假若主要是与上述那些目标交战,则激光器应工作在连续波模式。通过对系统与靶相互作用的建模、模拟、研究和试验,应就 HELLADS武器系统对各种目标给出杀伤力的估计和分析。

## 4 结束语

迄今,高能激光器通过 30 多年的发展,正处在成为实用武器的边缘,它们目前面临的挑战是如何把激光器集成进对重量和体积敏感的平台。从目前的发展来看,激光器的平均输出功率和光束质量达到了实战的要求。但即使是成熟的化学激光器,要把它集成进平台仍面临巨大的挑战。下一代的固体激光器比化学激光器小得多,但热管理是其巨大的障碍,冷却装置十分笨重,要把它装入战术飞行器在相当长的一段时间里仍是一大难题。因此,在继续使化学激光器和固体激光器小型化、轻量化的同时,还必须找到一条能制造更小、更轻激光器的道路。

美国国防部正在实施高能液体激光区域防御系统计划,它将开发一种先进的轻量战术激光器。这种液体高能激光器的平均输出功率是 150kW,具有优良的光束质量,其质量的设计指标是 5kg/kW,预期 2009 年完成。它将比目前正在开发的大功率固体激光器轻一个量级,尺寸也小得多,而且成本可降低一半。这种激光器是一种先进的二极管抽运液体激光器,它综合了固体激光器和液体激光器技术的优点,使其具有重量

轻、功率大的特点,能方便地集成进各种小型机动的战术平台。

轻量激光器是一种独特的突破性概念,该计划已取得令人印象深刻的创新和进展,但要实现其目标,还需发展许多技术。

### 参 考 文 献

- [1] REN G G The progress of developing 25kW solid-state laser [J]. High Energy Laser Research and Development, 2005 (1): 19~22 (in Chinese).
- [2] ROQUE A. Industry develops 'relocatable' tactical high-energy laser [J]. Inside the Army, 2005, 17 (18): 11~12.
- [3] REN G G, HUANG Y N. Developing status and future of airborne laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2005, 35 (5): 309~314 (in Chinese).
- [4] TETHER T. Statement before the house armed service committee [EB/OL]. <http://www.house.gov/hasc/openingstatementsandpressreleases/108Thcongress,2003-03-27>.
- [5] WOODBURY D. HELLADS [EB/OL]. <http://www.darpa.mil/tto/programs/hellads,2005-04-04>.
- [6] WENBERGER S. Lockheed picked by general atomics for DARPA liquid laser integration [J]. Defense Daily, 2005, 226 (26): 1.
- [7] SHACHTMAN N. Playing with liquid fire: high energy laser cool down [EB/OL]. <http://www.military.com/soldierthch/0,14632,HELLADS,2005-07-07>.
- [8] DUARTE F J. Organic dye lasers [J]. Optics & Photonics News, 2003, 14 (10): 20~25.
- [9] BASS I L, BONANNO R E, HACKEL R P *et al*. High-average-power dye laser at LLNL [J]. Appl Opt, 1992, 31 (33): 6993~7005.
- [10] AULT E R, KUKLO T C, COMASKEY B J. High average power laser using a transverse flowing liquid host [P]. US Patent 6600766, 2003-06-29.
- [11] PACHECO D P, RUSSELL W H, ALDAG H R. Solid-state dye lasers pumped directly by diode lasers [J]. Proc SPIE, 2004, 5332: 180~188.

欢迎向邮局订阅 2007 年度《激光技术》

国内统一刊号:CN51-1125/TN,邮发代号:62-74