

## 国外新型电驱动高能激光技术现状与发展趋势

王辉华, 林龙信, 叶 辛, 吕晓英

(海军研究院, 北京 102442)

**摘 要:** 主要讨论了国外平面波导激光器、固体薄片激光器、浸入式液冷固体激光器、碱金属蒸汽激光器、相干合成光纤激光器等新型电驱动高能激光光源的技术发展现状、关键技术以及未来作为激光武器应用的潜力。它们至少在原理上可以解决当前高能固体激光或光纤激光面临的一些难题,但因为某些缺点或者面临一些待解决技术问题,使其输出功率、光束质量或体积、重量等指标暂时达不到典型高能固体激光或光纤激光的水平。详细讨论了这些新型电驱动高能激光的优缺点,并对其技术发展前景进行初步分析判断。

**关键词:** 新型激光; 平面波导激光器; 薄片激光器; 浸入式液冷固体激光器; 碱金属蒸汽激光器; 相干合成光纤激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220283

## Status and development trend of overseas new type electric drive high-energy laser technology

Wang Huihua, Lin Longxin, Ye Xin, Lv Xiaoying

(Naval Research Academy, Beijing 102442, China)

**Abstract:** The status and development trend of overseas new type electric drive high-energy lasers, such as PWG laser, thin-disk laser, liquid immersed solid-state laser, alkali vapor laser and coherent beam combining of fiber lasers, are discussed in this paper. The applied potential of these new type lasers used as light source of laser weapon is analyzed. They can at least solve some problems faced by high-energy bulk solid-laser or fiber laser. Because of some shortcomings or problems to be solved, its output power, beam quality, or volume and weight cannot reach the level of a typical high-energy solid-state laser or fiber laser. The advantages and disadvantages of these new electrically driven high energy lasers are discussed in detail, and their technical development prospects are preliminarily analyzed and judged.

**Key words:** new type laser; PWG laser; thin-disk laser; liquid immersed solid-state laser; alkali vapor laser; coherent beam combining of fiber lasers

收稿日期:2021-12-04; 修订日期:2022-02-25

作者简介:王辉华,男,高级工程师,博士,主要从事装备论证方面的研究。

## 0 引言

进入 21 世纪后, 研究人员意识到 LD 泵浦的电驱动全固态激光器相对于高能化学激光器具有更高的效率、更紧凑的结构、更方便的能源供给, 具有作为激光武器光源的更大优势。2002 年, 美国启动了联合高能固体激光 (JHPSSL) 项目。2009 年, 诺·格公司在 JHPSSL 项目支持下利用板条激光放大器+相干合成实现了 105 kW 的稳定输出<sup>[1]</sup>, 在国际上率先突破了 100 kW 门槛; 随后, 达信公司也在 2010 年利用其 ThinZag 板条激光振荡器实现了 100 kW 输出<sup>[2]</sup>。但美国研究人员却发现这种固体激光器尽管输出功率达到要求, 却仍存在光束质量较差、电光效率较低 (~15%)、系统结构复杂等诸多问题, 导致其电源、热管理需求巨大, 附属的电源和热管理系统体积庞大, 难以满足机动平台装载对体积、质量、光机结构稳定性等实战化要求。因此, 在 JHPSSL 项目结束后, HEL-JTO 办公室随后启动了鲁棒电激光倡议项目 (RELI), 实现单模块功率 25 kW, 电光转换效率大于 30%, 接近衍射极限的光束输出, 能够定标放大至 100 kW<sup>[3]</sup>。RELI 项目支持了平面波导激光器、固体薄片激光器、分布式增益激光器、光纤激光共孔径相干合成、光纤激光光谱合成等多种技术方案。2017 年, 洛马公司通过光纤激光光谱合成实现了 58 kW 近衍射极限激光输出<sup>[4]</sup>。2019 年, 美国防部针对大功率、高效率、高光束质量激光光源需求, 提出了高能激光定标放大倡议 (HELSDI), 布局了相干合成光纤激光、光谱合成光纤激光、碱金属蒸汽激光、分布式增益激光四种技术路线, 希望 2022 财年将高能激光武器的功率水平从目前可行的 150 kW 提高到 300 kW, 2024 财年达到 500 kW, 2030 财年达到 1000 kW<sup>[5]</sup>。

总体而言, 美国针对高能激光武器大功率、高效率、高质量、高功率/重量比、高体积/重量比的实战化应用, 先后提出许多新型电驱动激光技术发展路线。之所以这些新型激光技术备受关注, 是因为它们至少在原理上可以解决当前产生电驱动高能激光的两条主要技术路线——固体板条激光器和光谱合成光纤激光器——面临的一些技术困难 (诸如板条激光效率

低、光束质量随功率增大而劣化, 光谱合成光纤激光的窄谱线高功率输出难度大等); 而它们之所以被称之为新型, 则是因为它们至少也存在一些缺点、或者面临一些待解决的技术问题。文中主要从这些新型激光的基本原理出发, 梳理其发展现状, 分析发展趋势, 研判未来发展与应用潜力, 希望牵引推动高功率激光技术发展。

## 1 平面波导激光

### 1.1 基本原理

平面平行波导激光综合了光纤激光和块状固体激光的优点, 同时避免两者的缺点。光纤激光的优点在于结构紧凑、效率高、废热导致的光束质量退化较小, 缺点在于由于激光亮度极高, 非线性效应直接限制最高输出功率; 块状固体激光定标放大时则基本不存在非线性效应问题, 缺点在于废热导致的光束质量退化严重, 同时结构难以实现小型紧凑化。典型的平面波导激光结构如图 1 所示。其芯层为 Nd:YAG 或 Yb:YAG; 内包层为无掺杂的 YAG, 用以耦合泵浦光; 外包层为蓝宝石, 利用它的高导热性能以及极高的热断裂极限 (3 倍于 YAG) 来移除废热。激光在平面波导芯层传播时, 在平面波导宽度方向以平行光方式传播, 在平面波导厚度方向的光场分布则由导波效应主导, 因此可以在很大程度上降低冷却带来的温度梯度造成的严重光束质量退化。

尽管平面波导激光具有很多优点, 雷神公司宣称将其定标到 100 kW、甚至 MW 级也不存在技术障碍。但平面波导激光的技术难点同样突出: (1) 是材料的生长、加工、键合等工艺存在较大的技术挑战, 特别是芯层和包层之间大尺寸表面的光学级别键合难度极大; (2) 是非导波方向 (宽度方向) 的泵浦不均匀性极易产生严重的热致相差, 导致光束质量严重退化<sup>[6]</sup>。此外, 由于波导芯层很薄 ( $\mu\text{m}$  量级), 将前级放大器输出的高功率激光通过空间光路高效率地耦合进入芯层的难度很大, 多块平面波导实现多级放大则难度更大 (基于多级放大的光纤激光器快速走向工业化很大程度上依赖于光纤激光熔接技术问题的解决)。

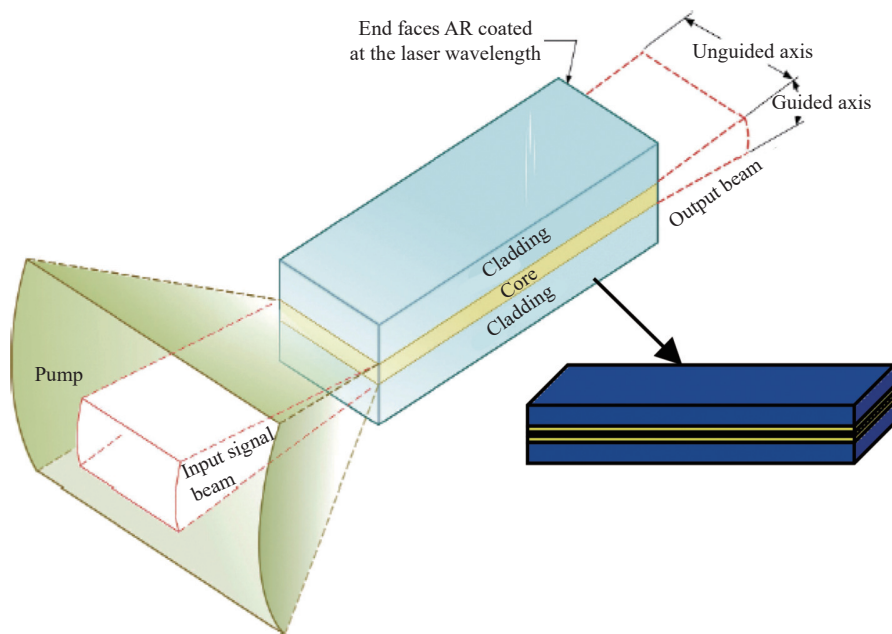


图 1 典型的平面平行波导激光结构示意图<sup>[7]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of typical planar parallel waveguide laser structure<sup>[7]</sup>

### 1.2 发展现状

雷神公司是高能平面波导激光技术的主要推动者。2006 年,该公司利用一块平面波导放大器实现了 16 kW 输出,但光束质量较差<sup>[7]</sup>。2011 年,雷神公

司获得 RELI 计划支持,开始大力解决复杂结构的平面波导材料制备技术。2013 年,雷神公司在 5 kW 水平验证了 AO 技术对该相差的校正能力(图 2),校正后光束质量达到近衍射极限水平<sup>[8]</sup>。但更高功率水平

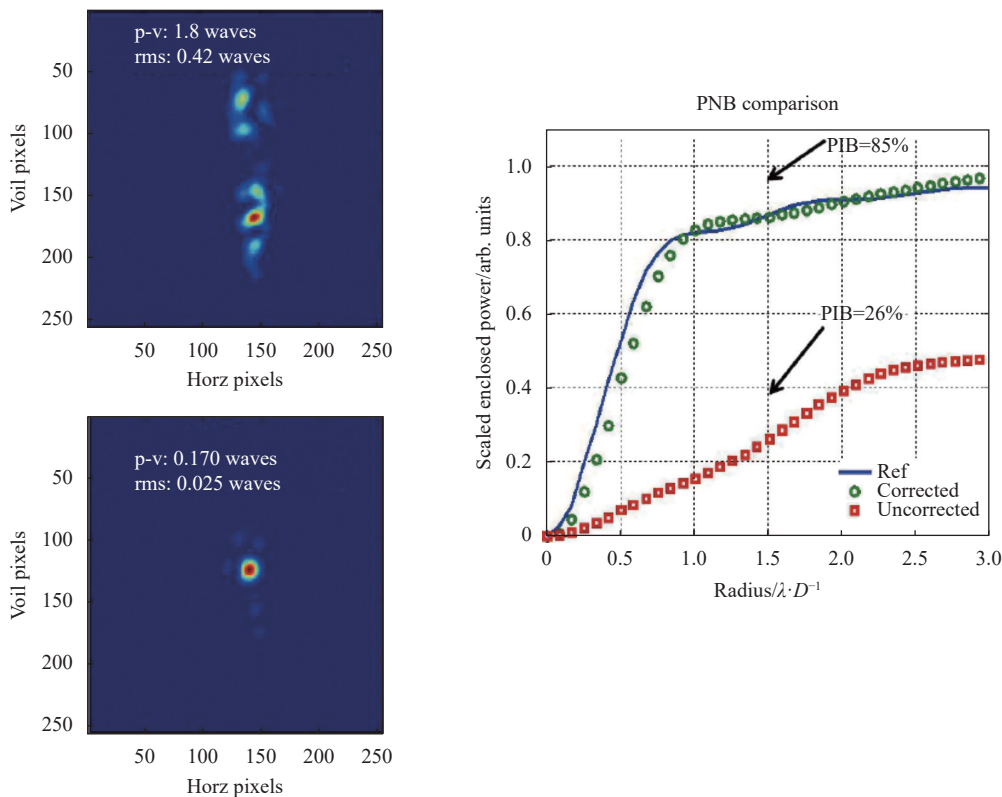


图 2 雷神公司 AO 校正前后的 5 kW 平面波导输出激光<sup>[8]</sup>

Fig.2 5 kW planar waveguide output laser before and after AO correction by Raytheon<sup>[8]</sup>

的 AO 校正尚未见报道。同时,雷神公司宣称已经完成了可满足 RELI 计划第一阶段目标——输出功率大于 25 kW,电光效率大于 30%——的平面波导激光设计。此后该技术转由美海军陆战队支持,为其研制 30 kW 级轻小型低空防御激光武器,并已安装在越野吉普车上进行了外场测试(图 3)<sup>[9]</sup>。



图 3 吉普车上的移动式地基防空定向能激光武器<sup>[9]</sup>

Fig.3 Mobile ground-based air defense directed energy laser weapon on a jeep<sup>[9]</sup>

### 1.3 发展趋势

相对于其他类型激光器,平面波导激光增益模块可以很高。以 Yb:YAG 晶体(芯层)、无掺杂 YAG 晶体(内包层)和蓝宝石晶体(外包层)键合组成的 5 层结构平面波导增益模为例,利用无穷大平板的弹性力学方程,其最大应力为:

$$\sigma_{\max}^{(YAG)} = \frac{\alpha_{YAG} D^2}{8\kappa_{YAG} l} - \frac{E_{YAG} Q d}{1 - \nu_{YAG}} \left(1 - \frac{D}{l}\right) \times \left[ (\alpha_{YAG} - \alpha_{Sph}) \frac{1}{2h} + (2\alpha_{YAG} - \alpha_{Sph}) \frac{l-D}{8\kappa_{Sph}} \right] \quad (1)$$

式中:  $l$ 、 $D$  和  $d$  分别为平面波导的全厚度、内包层厚度和芯层厚度;  $Q$  为芯层热负载功率密度;  $E_{YAG}$  和  $\nu_{YAG}$  分别为 YAG 晶体的杨氏模量和泊松比;  $\alpha_{YAG}$  和  $\alpha_{Sph}$  分别为 YAG 晶体和蓝宝石的热膨胀系数;  $\kappa_{YAG}$  和  $\kappa_{Sph}$  分别为 YAG 晶体和蓝宝石的热导率;  $h$  为表面换热系数。以全尺寸 120 mm×30 mm×1 mm、内包层厚度 0.4 mm 的双端泵浦平面波导为例,其安全泵浦负载可达到 200 kW。

因此,在同功率水平下,高能平面波导激光的体积、质量原则上可以做到最小,因此美海军陆战队支持了该技术的后续发展和应用。但平面波导激光在高功率状态下的多级放大难题和非导波方向光束质量控制困难是制约其走向高功率的技术瓶颈。高能平面波导激光实现更高功率的一种可能技术措施

是,直接使用一块平面波导激光输出 100 kW 级激光(在 200 kW 的泵浦功率下保守的假设光光效率只有 50%),这样通过沿导波方向进行空间合束就可以将功率提升至满足更多战术应用场景的要求。但这要求平面波导的制备工艺获得大幅进步,并且解决满足极高功率密度的光学薄膜、光束整形和 AO 技术。

## 2 固体薄片激光

### 2.1 基本原理

薄片激光器的核心是采用薄片构型的激光介质,通过单面冷却并将该冷却面作为反射镜使用。这样,激光从薄片上表面入射、冷却面反射并从上表面出射,避免了冷却带来的垂直于光轴平面内的温度梯度带来的相位畸变,这是薄片激光与早期棒状激光相比的最大优势。

薄片激光器的激光晶体背面镀有激光和泵浦光的高反膜,前表面镀有高透膜。薄片被焊接在背面水冷热沉上(图 4(a))。泵浦光以一定倾斜角度从晶体表面入射,受限于晶体厚度和掺杂浓度,只有很少的泵浦光被晶体吸收,大部分泵浦光经过晶体背面反射后从前表面出射。一种提高泵浦光吸收的有效方法是增加其穿过薄片的次数,如图 4(b) 所示。首先,将用于薄片泵浦加载的激光二极管辐射出的泵浦光通过光纤耦合输出,之后通过准直元件和抛物面镜将其投射到薄片上,这样可以使得泵浦尽量均匀以保证输出激光具有较好的光束质量。未被吸收的部分泵浦光被准直到对面的抛物面镜上,之后经过两个反射镜和抛物面镜的另一部分从另一个方向重新聚焦到薄片上。这个再成像过程可以反复操作直到整个抛物面镜都被利用起来。这种复杂的泵浦耦合系统可以使得泵浦光被晶体的吸收次数达到 32 甚至更高,吸收效率达 90% 以上。这种方案的好处是提高了有效泵浦加载功率密度,使得 Yb:YAG 这种准三能级激光晶体的应用成为可能<sup>[10]</sup>。

薄片激光的技术难点:首先,为发挥薄片介质的热管理优点,Yb:YAG 晶体厚度通常约 100~200 μm,这么薄的晶体在加工和焊接中非常容易变形,需要在其上表面键合一层毫米级厚度的无掺杂 YAG,这种大尺寸光学面的键合技术是关键技术之一。其次,薄片的焊接面也是激光的反射面,其表面平整性要求极

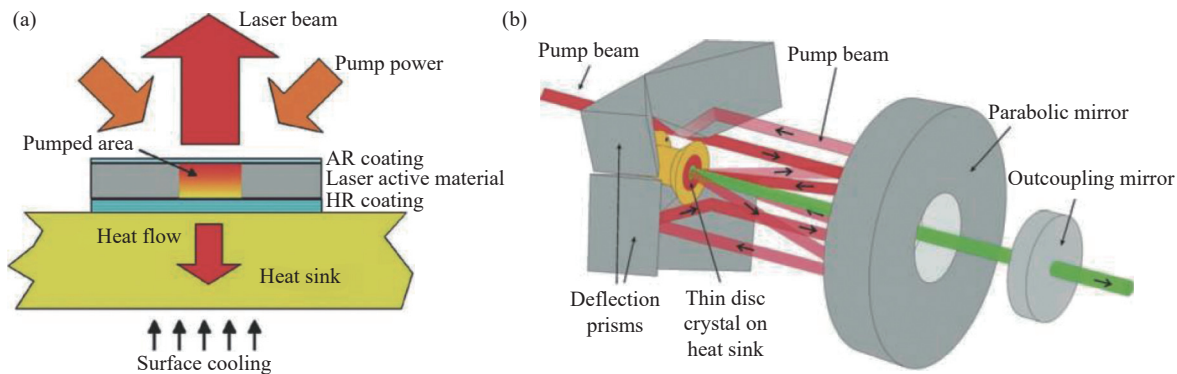


图 4 薄片激光热管理结构 (a) 及多通泵浦耦合结构 (b) 示意图<sup>[11]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of thin-film laser thermal management structure (a) and multi-pass pump coupling structure (b)<sup>[11]</sup>

高,可能会严重影响到光束质量。最后, Yb:YAG 晶体的储能密度非常高,放大的自发辐射 (ASE) 可能会严重消耗增益介质的储能,进而从物理上限制了薄片晶体可实际用来泵浦的横向尺寸<sup>[12]</sup>。

## 2.2 发展现状

1992 年 1 月,德国航天航空中心 (DLR) 的 Uwe Brauch 和斯图加特大学的研究小组,开始了薄片激光器的研究。1993 年,薄片激光器在瓦级功率水平首次演示成功。1994 年,该研究小组提出多通泵浦 Yb:YAG 薄片激光的技术思想<sup>[13]</sup>,随后通快 (Trumpf) 等大公司开始了高能薄片激光技术的推进攻关<sup>[14]</sup>,使其迅速成为材料加工领域激光技术的领先者。但他

们几乎不关心薄片激光的光束质量,也很少追求 10 kW 以上的输出功率。

波音公司期望将薄片激光定标至更高功率,进而作为战术激光武器的主战光源。其在车载高能激光战术演示系统 (HEL-MD) 主要以薄片激光进行了设计。波音公司的高能薄片激光增益模块早期主要采购自通快公司,2009 年,他们在非稳定谐振腔内使用 10 个增益模块实现了 27 kW 单束激光输出 (图 5)<sup>[15]</sup>,2013 年,波音公司将输出功率进一步提高至 34 kW,光束质量达到 2 倍衍射极限,电光效率提升至 30%,但稳定运行时间仍然只有 12 s。近年来,未见进一步报道。

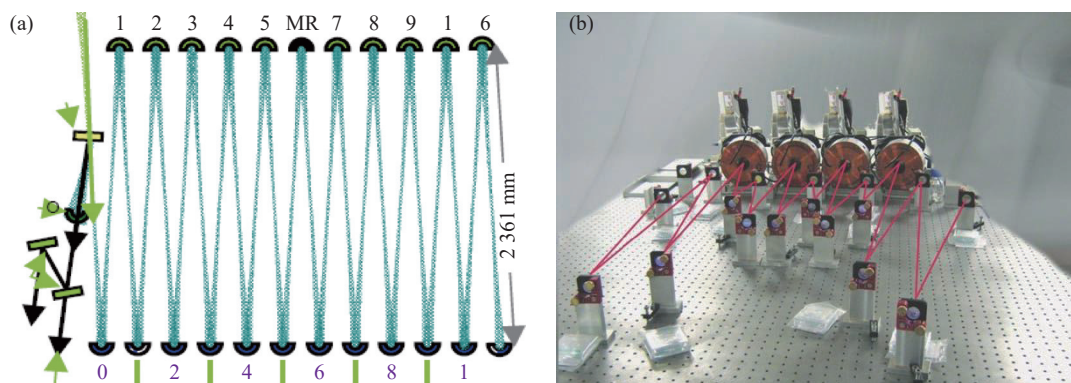


图 5 波音公司谐振腔式 Yb:YAG 激光器<sup>[10,15]</sup>

Fig.5 Boeing's resonant cavity Yb:YAG laser<sup>[10,15]</sup>

## 2.3 发展趋势

薄片激光焊接面变形、ASE 对单模块储能的限制、大量增益模块串联的不稳定性等技术难题,迄今仍未解决。与达信公司当年的 ThinZag 激光的状态

类似,这些问题限制了薄片激光的功率定标能力。在这些问题解决之前,尚看不到固体薄片激光定标到 100 kW 以上功率水平的可行性。因此,固体薄片激光作为激光武器主战光源的前景并不明朗。

### 3 浸入式液冷固体激光

#### 3.1 基本原理

早期,液体激光器使用液体自身作为激活介质,既具有固体介质储能密度高的特点、又具有气体介质热管理方便的优点,但这些液体激活介质上能级寿命通常较短,难以实现高功率输出。于是人们又提出将稀土激活离子(如  $Nd^{3+}$ )溶解到液体中的方案。但为避免液体中轻质量原子导致的强烈荧光淬灭,已知的能够溶解稀土激活离子的溶液都是有腐蚀性的,并通常有毒(如氢氧化硒),给应用带来很多困难。美国通用原子公司(GA-ASI)将固体增益介质浸入折射率匹配的冷却液中,以解决荧光淬灭的问题,国内称为“浸入式液冷固体激光器”。通用原子通过 LD 代替闪光灯有效降低了冷却液温度,同时通过减小增益介质厚度增加介质数目,既大幅降低固体材料所受到的热应力,又保证了高功率输出的可行性。通用原子称其为“分布式增益激光器”<sup>[16]</sup>。

“浸入式液冷固体激光器”主要特点是通过折射率匹配的冷却液实现冷却,可以避免固体增益介质焊接到冷却板时带来的表面形变,以及由于反射面变形带来的光轴漂移等诸多问题。此外,就结构而言,采用单孔径的谐振腔产生大于 100 W 的激光输出,远比采用多链路合束的板条激光放大器方案更紧凑和可靠。但是,由于激光在谐振腔内振荡时将穿过大量的冷却流道和增益介质的固液界面(图 6),其首先需要解决的核心技术问题,是选择对激光无吸收的冷却液和抑制固体增益介质的插入损耗。同时,由于激光需要穿过大量冷却流道,冷却液在垂直于光路的平面内

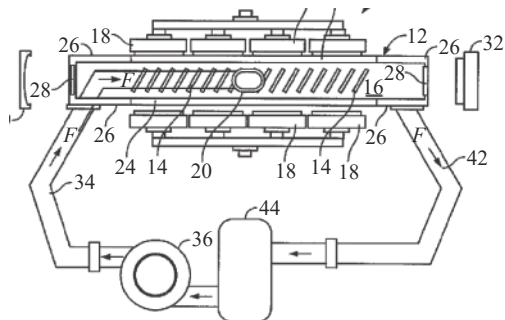


图 6 通用原子的浸入式液冷固体激光器原理示意图<sup>[16]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of general atomics' immersion liquid-cooled solid-state laser<sup>[16]</sup>

流动,其轻微的温度不均匀性就会导致相当大的折射率不均匀,进而严重影响到光束质量。因此,在流场设计中均压分流技术和对湍流的抑制技术也是核心技术之一。由于冷却液流动和热梯度对光束质量存在较大影响,“浸入式液冷固体激光器”必须使用自适应光学技术才能实现高光束质量激光输出。

#### 3.2 发展现状

2002 年, DARPA 启动了高能液体激光区域防御系统(HELLADS)项目,主要由通用原子公司(GA-ASI)承担。HELLADS 最初计划在 2009 年底完成设计指标,但直到 2011 年通用原子才完成了项目第三阶段的单增益模块技术验证,实现了功率 34 kW、光束质量 2 倍衍射极限的激光输出。2015 年 4 月,通用原子利用放置在大口径谐振腔内的一个单元模块,实现了 50 kW 以上激光输出、光束质量“非常优秀”,激光器尺寸仅为 1.3 m×0.5 m×0.4 m(图 7)<sup>[17]</sup>。该激光器中使用了校正精度和空间分辨率均非常高的 AO 装置。2021 年 10 月,报道称通用原子公司联合波音公司获得了 300 kW 固态激光武器研发合同<sup>[18]</sup>。

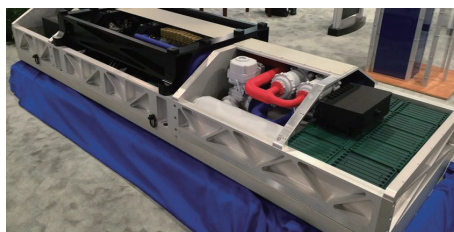


图 7 通用原子浸入式液冷固体激光实物图(单模块激光振荡器)<sup>[19]</sup>

Fig.7 Physical picture of general atomic immersion liquid-cooled solid-state laser (single-module laser oscillator)<sup>[19]</sup>

#### 3.3 发展趋势

通用原子的浸入式液冷固体激光是迄今各方面综合性能最好的一款电驱动高能激光器。利用该激光器的一些特殊性能,将输出功率提升至 300 kW 以上,同时保持良好的光束质量具有一定可行性。但是,据报道称美国陆军授予通用原子、波音公司的 300 kW 激光武器样机,没有纳入高能激光-间接火力防御原型开发项目,陆军希望通过该项目验证分布式增益激光技术在未来陆军武器应用的可行性。分析其主要原因,可能是机动条件下能否保证激光器性能的稳定尚存在疑问。

## 4 碱金属蒸汽激光

### 4.1 基本原理

碱金属蒸汽激光的历史非常悠久。1958 年, 汤斯等首先提出了光泵浦钾蒸汽激光的概念(在梅曼发明第一台激光器之前)。随后在 1962 年实现了铯蒸汽在 7.18  $\mu\text{m}$  激射出光, 但效率和输出功率极低。进入 20 世纪 90 年代后, 先后实现了钛蓝宝石激光泵浦的铷、铯、钾蒸汽激光输出; 但真正的进展出现在使用半导体激光作为泵浦源后, 这被称之为半导体泵浦碱金属蒸汽激光(DPAL)。

化学氧碘激光可以在实现非常高输出功率的同时保持优秀的光束质量, 其关键点是以低压气体作为增益介质, 并通过气体流动将废热带走。这是近年来电驱动碱金属蒸汽激光获得较大关注的主要动力之一。尽管如此, 研制出一台能够高平均功率运转的 DPAL 难度很大。DPAL 最主要的关键技术有两个。首先, 其泵浦能级吸收线宽非常窄——即使吸收线宽最宽的 Cs 原子, 也只有目前商用大功率 LD 发射光谱的四千分之一。这使得碱金属蒸汽对大功率半导体泵浦激光的吸收效率非常低。其次, 要使碱金属蒸汽循环起来, 需要整个循环管道都处于 100~200  $^{\circ}\text{C}$  左右的高温环境; 且碱金属原子会吸附光学窗口表面并造成污染。此外, 实现高效率、高功率和高光束质量的激光输出, 还需进一步优化其理论模型和实验方案<sup>[20]</sup>。

### 4.2 发展现状

过去 15 年, 研究人员通过两方面努力来解决 DPAL 的泵浦吸收问题: 其一是提高缓冲气体的压强(通常需要提高至 1 个大气压以上), 通过缓冲气体分子与碱金属原子间的碰撞来展宽泵浦吸收线宽, 目前最好的水平已经能够将泵浦吸收线宽展宽 300 倍到 0.3 nm (Cs 蒸汽); 其二是发展 LD 波长锁定技术, 目前尾纤耦合的大功率单管 LD 已经能够将其输出光谱宽度锁定至 0.1 nm 以内, 但大功率 LD 巴条的波长锁定技术目前尚未能够完全成熟。以上两方面相结合, 就基本可以解决对 LD 泵浦光吸收的难题。

此外, 为在碱金属蒸汽循环装置中, 是不能采用甲烷作为缓冲气体的(但甲烷的分子振动能级提供了从泵浦能级从上激光能级间最合适碰撞弛豫速率); 并且碱金属原子会吸附在光学窗口表面并造成污

染。在化学氧碘激光中, 研究人员对避免这种污染产生已经深有心得; 但 DPAL 的增益池循环压力比化学氧碘激光高数百倍, 相应的避免循环污染的难度也要大得多。直到 2012 年起, 俄罗斯核子研究中心的研究人员才通过气流保护和隔离等方法初步解决了 Cs 蒸汽的循环难题, 因而将 DPAL 的输出功率从此前的数十瓦直接提高 1 kW。

在这两个关键技术初步解决后, 美国空军实验室、劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)以及俄罗斯核子研究中心是高能 DPAL 技术的主要推动者。2007 年, 空军实验室的半导体泵浦铯蒸汽激光的输出功率首先突破 10 W, 随后其铷蒸汽激光达到 17 W 输出功率。2012 年, 俄罗斯核子研究中心输出功率提升至 1 kW, 光光效率接近 50%<sup>[21]</sup>。2015 年, 利弗莫尔实验室通过强光光学器件与涂层的改进、“之”字形光路设计等, 实现 DPAL 的 14 kW 功率输出, 碱金属蒸汽连续循环时间超过 100 min<sup>[22]</sup>, 随后在 2016 年输出功率进一步提高至 17 kW。这是在美国导弹防御局(MDA)的高空长航时无人机反弹道导弹项目下支持的, MDA 从 2011 年启动计划, 目标是在 2025 年将兆瓦级电驱动激光器的质量功率比降低至 2 kg/kW 的水平<sup>[23]</sup>, 满足在未来的重型无人机上搭载兆瓦激光武器的要求。按照 MDA 的原定计划, LLNL 应于 2017 年演示 30 kW 的 DPAL 系统, 光束质量 1.5 倍衍射极限(DL), 2019 年演示 120 kW 的 DPAL 系统, 功率密度可能达到 3 kg/kW; 但目前未看到最新进展的报道。

### 4.3 发展趋势

对激光武器的聚焦能力而言, 碱金属蒸汽激光的短波长(800~900 nm)特性非常具有吸引力, 但目前尚缺乏该波段激光在各种条件下的大气透过率数据。虽然 MDA 对此在进行持续支持, 碱金属蒸汽激光的功率定标能力并未得到充分验证, 而且波长锁定的大功率半导体激光成本很高。2017 年, MDA 要求 LLNL 开始验证高功率下的光束质量。但直到现在, 从公开报道中未看到 LLNL 完成高光束质量演示。因此, 碱金属蒸汽激光的输出功率提升至 100 kW 后, 是否会遇到光束质量控制难题尚待观察。可能光束质量问题是最近几年美国 DPAL 技术未得到进一步发展的原因之一。此外, 碱金属蒸汽循环过程造成的管路污染需要进行定期清除, 这可能带来后勤保障上的困难。

## 5 相干合成光纤激光

### 5.1 基本原理

相干合成<sup>[24]</sup>被广泛应用于半导体激光、固体激光、气体激光和光纤激光等多种激光器阵列的亮度提升,当各路光束重叠到一起时,整个光场呈现出相干相长的干涉效果。当前主要的主动光束控制型相干合成可区分为两种子结构:共孔径合成和拼接孔径合成方式。在共孔径合成方式中,相干发生在近场,其合束器件可以认为是一个分束器件的逆向使用(图 8(a))。为了将所有输入的功率转换为输出功率,需要满足一些条件。各路光束的偏振态必须一致,各路光束的功率必须匹配,为了实现相干,各路光束的相位必须进行控制,各路光束在近场和远场必须是重叠的。在拼接孔径合成方案中,各子束并行排列,相干只能发生在远场(图 8(b))。这种方案可以认为是一种组合的平面波实现方式。为了减少旁斑能量从而获得最大的远场中央光强分布,必须提高填充因子。对于这两种合成方式,参与合成的各子束必须保证同时的相干性以保证相干相长。因此,各子束的光谱必须保证相同,而且各子束必须在其相干长度之内。

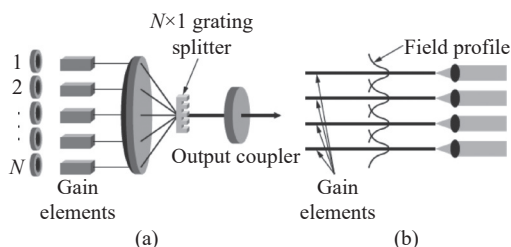


图 8 (a) 共孔径相干合成示意图; (b) 拼接孔径相干合成示意图<sup>[11]</sup>

Fig.8 (a) Schematic diagram of coherent synthesis of common apertures; (b) Schematic diagram of coherent synthesis of spliced apertures<sup>[11]</sup>

### 5.2 发展现状

麻省理工大学林肯实验室(MIT/LL)、AFRL<sup>[25]</sup>、诺格公司是国际上光纤激光相干合成的主要研究机构。在MDA的高空长航时无人机反导项目支持下,MIT/LL近年来在拼接孔径相干合成技术方向取得了快速发展(图 9)。2014年,采用了42单元的光纤阵列和1kW的光纤放大器,获得了34kW高合成效率激光输出;2015年将输出功率进一步提高到44kW,并将光束质量提升到近衍射极限,但其体积仍然太大

(按MDA的说法是“Room Size”)<sup>[23]</sup>。根据MDA的要求,MIT/LL目前正在研制比功率5kg/kW的相干合成系统,原计划2018年底实现50kW演示,但最近几年未看到进一步进展。

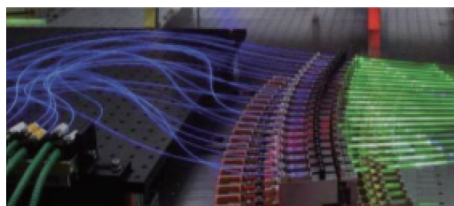


图 9 MIT/LL 的 21 束光纤激光相干合成技术演示<sup>[26]</sup>

Fig.9 Demonstration of MIT/LL's 21-beam fiber laser coherent combining technology<sup>[26]</sup>

拼接孔径相干合成在通过大气后,难以保持光束的相干性。光学相控阵列(OPA)希望通过大气影响的校正来解决问题。OPA技术最早可以追溯到DARPA在2006年启动的APPLE项目。此后,2010年DARPA又启动“亚瑟王之剑(Excalibur)”项目进行OPA技术研究。2014年,进行了首次系统(图 10)演示:系统由21束1.5kW光纤激光组成,每7束组成一个模块,直径10cm,3个模块合成的激光功率超过30kW。该技术的另一个核心目标是进行大气湍流控制。2014年的演示试验中,使用“目标在回路”技术,在低功率水平下的试验表明该系统的大气湍流校正能力“近乎完美”,在亚毫秒时间量级上对近地面7km传输距离上静态光学大气相差进行了补偿<sup>[27]</sup>。该装置使用光纤激光阵列作为激光源,种子光纤激光经过预放大器后分为多路光束,各光束依次经过控制器件组、级联放大器后由阵列准直器进行发射。控制器件组可对各单元光束的光强、相位、偏振进行控制;放大器对各路激光进行功率放大。放置于发射望远镜旁边的接收望远镜可从接收的目标散射回光中获取性能评价函数,并将其送入控制器件组中,进而使用延迟随机并行梯度下降算法对活塞相位进行控制,使用随机并行梯度下降算法对波前倾斜进行控制,同时实现了光强均衡、相位和偏振锁定,从而在目标处得到高效的相干合成激光。这些实验证明OPA技术可应用于对激光武器的大气湍流扰动进行补偿。基于衍射光学元件(DOE)的共孔径相干合成技术,在HEL-JTO的RELI计划支持下,诺格公司从



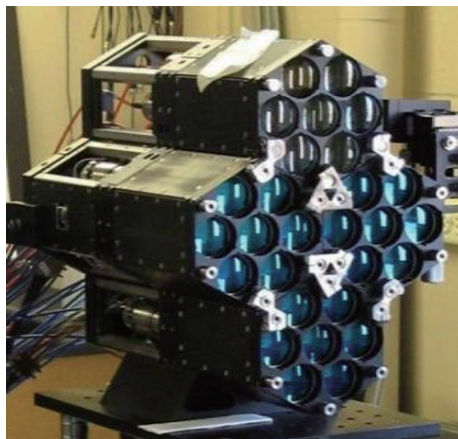


图 10 4 个模块组成的光学相控阵列 (蓝色镜面的为目前实际出光的 21 束光纤激光)<sup>[28]</sup>

Fig.10 Optical phased array composed of four modules (the blue mirror is the 21 beams of fiber laser that actually emit light at present)<sup>[28]</sup>

2011 年开始关键技术攻关,但由于子激光束的多参量同步控制难题,进展不大<sup>[29]</sup>,至 2016 年,仅验证了 3 束光纤激光合成 3 kW 激光输出,合成效率不到 80%。

### 5.3 发展趋势

拼接孔径式相干合成的衍射旁斑问题使得该技术在战术激光武器中的应用能力一直为人们所质疑,因此 OPA 技术和共孔径相干合成技术相继获得重视。但目前看来,这两种技术应用在高功率光纤激光相干合成时还存在各种各样的问题,诸如锁相器件的

强光耐受性、超大带宽控制、共孔径相干合成路数受限等,因此美军方目前已暂停对这两种技术的支持。随着美海军 LaWS 舰载激光武器的成功演示,表明多光束空间拼接在特定应用场景下是完全可行的;特别是在 MDA 的无人反导项目支持下,MIT/LL 的拼接孔径相干合成技术取得长足发展,但未来尚需进一步增加合成规模、提升总的合成功率;特别是对于全系统的轻小型化,目前看起来仍然是一个较大的难题。

## 6 结束语

文中主要讨论了平面波导激光器、固体薄片激光器、浸入式液冷固体激光器、碱金属蒸汽激光器、相干合成光纤激光器等新型电驱动高能激光光源的技术发展现状、关键技术、以及未来作为战术激光武器应用的潜力。相对固体板条激光和光纤激光,这些新型激光在功率定标能力、体积重量等方面具有潜在优势,因此近年来在国际上获得较广泛关注,部分技术体制还获得相当大的突破。特别是 HEL-JTO 支持下的 RELI 项目,支持了平面波导激光器、固体薄片激光器、浸入式液冷固体激光器、共孔径相干合成光纤激光器等多种新型激光技术。

表 1 所示为不同技术体制激光的优缺点与关键技术对比。具体到新型电驱动高能激光的武器级应用,应结合装载平台自身的特性。目前看来,在这些

表 1 各种新型激光优缺点及关键技术

Tab.1 Advantages, disadvantages and key technologies of various new lasers

Technical system	Advantage	Shortcoming	Key technology
Planar waveguide laser	High light to light conversion efficiency; No non linear effect; High output power of single module	Material preparation is difficult; Multi level amplification is difficult; Difficult to control beam quality in non waveguide direction	Fabrication technology of planar waveguide; Efficient uniform pump coupling technology; High efficiency seed injection technology
Sheet laser	High light to light conversion efficiency; High thermal management efficiency	Sheet welding is difficult; Beam quality control is difficult; Small energy storage of single module	Low deformation welding technology of thin sheet; Multi pass pump coupling technology; High efficiency laser extraction technology; Beam quality control technology
Immersion liquid-cooled solid state laser	Small size and light weight; High energy storage of single gain module; Easy power scaling and amplification	Beam quality control is difficult; The coolant is toxic	Solid liquid interface loss suppression technology; Laminar cooling technology; Pressure equalizing and shunt technology; Beam quality control technology
Alkali metal vapor laser	Small size and light weight; High light to light conversion efficiency; Efficient thermal management	Low pump light absorption efficiency; Alkali metal vapor is easy to cause pollution of optical devices	Pump band broadening Technology; LD wavelength locking technology; Steam cycle technology
Coherent synthesis of fiber laser	High light to light conversion efficiency; Easy power scaling and amplification	Sub laser output power is limited; Complex system and difficult integration	High power single frequency fiber laser technology; Large scale compact integration technology

新型激光中, 浸入式液冷固体激光作为战术激光武器的主战光源具有很好的应用前景, 但需要提升其电光转换效率, 延长激光器的可持续工作时间。其他新型激光中, 平面波导激光在高功率状态下的多级放大难题和非导波方向光束质量控制困难是制约其走向高功率的技术瓶颈, 平面波导的制备工艺获得大幅度进步前, 预期平面波导激光的输出功率难以满足多数作战场景要求。目前尚看不到固体薄片激光定标到 100 kW 以上功率水平的可行性, 因此其为战术激光武器主战光源的前景并不看好。碱金属蒸汽激光的输出功率应该能够提升至 100 kW 以上, 但其是否能实现高光束质量产生、以及工程化应用是否存在问题尚待观察。拼接孔径相干合成的光纤激光看起来突破 100 kW 并不存在大的技术困难, 但全系统的轻小型化仍然是制约其作为战术激光武器应用的关键问题。

#### 参考文献:

- [1] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at northrop Grumman [C]//Proc of SPIE, 2009, 7195: 719507.
- [2] Mandl A, Klimek D. Textron's J-HPSSL 100 kW thinzag® laser program[C]//Conference on Lasers and Electro-optics, 2010.
- [3] Neice M W. High energy laser joint technology office- A mission overview[C]//Conference on Lasers and Electro-optics, 2017.
- [4] Lockheed Martin News Release. Lockheed martin to deliver world record-Setting 60 kW laser to US. [EB/OL]. (2017-03-16)[2022-04-23]. <http://news.lockheedmartin.com/2017-03-16-Lockheed-Martin-to-Deliver-World-Record-Setting-60-kW-Laser-to-U-S-Army>.
- [5] Trebes J. Advancing high energy laser weapon capabilities: What is OUSD (R&E) doing[Z]. Presentation at IDGA, 2020-10-21.
- [6] Wang Xiaojun, Ke Weiwei, Su Hua, et al. Thermal-induced two dimensional beam distortion in planar waveguide amplifiers [J]. *Opt Express*, 2013, 21(15): 17999-18010.
- [7] Raytheon. Next-generation lasers for advanced active EO systems[Z]. Raytheon Tech, 2008-09-01.
- [8] Filgas D, Clatterbuck T, Cashen M, et al. Recent results for the raytheon RELI program[C]//Proc of SPIE, 2012, 8381: 83810W.
- [9] Raytheon. Raytheon pairs laser weapon with NASAMS air defense system[EB/OL]. (2022-04-08) [2022-04-23]. <https://milmag.pl/en/raytheon-pairs-laser-weapon-with-nasams-air-defense-system/>.
- [10] Injeyan H, Goodno G, Palese S. High Power Laser Handbook[M]. US: McGraw-Hill, 2011: 227.
- [11] Contag K, Karszewski M, Stewen C, et al. Theoretical modeling and experimental investigations of the diode-pumped thin-disc Yb: YAG Laser [J]. *Quant Electron*, 1999, 29(8): 697.
- [12] Speiser J. Scaling of thin-disc lasers-influence of amplified spontaneous emission [J]. *Opt Soc Am B*, 2009, 26(1): 26-35.
- [13] Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Diode-pumped high-power solid-state laser: Concept and first results with Yb: YAG[C]//Conference on Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America, 1994.
- [14] Erhard S, Karszewski M, Stewen C, et al. Pumping schemes for multi-kw thin disc lasers[C]//OSA Trends in Optics and Photonics, 2000.
- [15] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S, et al. Physics of high performance Yb: YAG thin disk lasers[C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2009: 1-2.
- [16] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, et al. Laser containing a distributed gain medium. US. 20036937629[P]. 2003-08-28.
- [17] GA-ASI News Release. Gen 3 high energy laser completes beam quality evaluation[EB/OL]. (2005-04-08) [2022-04-23]. <http://www.ga-asi.com/gen-3-high-energy-laser-completes-beam-quality-evaluation>.
- [18] GA-ASI News Release. GA-EMS and boeing team to develop 300 kW-class HELWS prototype for US army[EB/OL]. (2021-10-25) [2022-4-23]. <http://www.ga-asi.com/ga-ems-and-boeing-team-to-develop-300-kw-class-helws-prototype-for-us-army>.
- [19] General Atomics Says. Gen 3 electric laser weapon ready now[EB/OL]. (2021-11-17) [2022-04-23]. <https://aviationweek.com/general-atomics-says-gen-3-electric-laser-weapon-ready-now>.
- [20] Ji Yanhui, He Yang, Wan Haohua, et al. Research progress on the high power flowing-gas circulation diode-pumped alkali vapor laser (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201080. (in Chinese)
- [21] Bogachev A V, Garanin S G, Dudov A M, et al. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(2): 95-98.

- [22] CSIS. Department of defense fiscal year (FY) 2016 president's budget submission[D]. US: Missile Defense Agency, 2015: 34.
- [23] Office of the US. Secretary of Defense: Ballistic missile defense review[EB/OL]. (2010-02-16) [2022-04-23]. <http://www.defense.gov/bmdr>.
- [24] Cheng Xue, Wang Jianli, Liu Changhua. Beam combining of high energy fibre lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103011. (in Chinese)
- [25] Wagner T J. Fiber laser beam combining and power scaling progress[C]//Proc SPIE, 2012, 8237: 823718.
- [26] Missile Defense Agency. Fiscal year (FY) 2017 budget estimates: overview[EB/OL]. [2022-04-23]. <https://www.mda.mil/global/documents/pdf/budgetfy17.pdf>.
- [27] Tamir Eshe. Successful EXCALIBUR test brings DARPA closer to compact high energy lasers[EB/OL]. (2014-03-07) [2022-4-23]. [https://defense-update.com/20140307\\_successful-excalibur-test-brings-darpa-closer-compact-high-energy-lasers.html](https://defense-update.com/20140307_successful-excalibur-test-brings-darpa-closer-compact-high-energy-lasers.html).
- [28] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(4): 840-843.
- [29] Menaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0901008.