

# 高功率激光器发展趋势

罗 威,董文锋,杨华兵,许鹏程,唐志凯  
(空军预警学院五系,湖北武汉430019)

**摘 要:** 对二氧化碳激光器、HF/DF 化学激光器、氧碘化学激光器、光纤激光器、固体激光器、半导体泵浦碱金属激光器等高功率激光系统进行了介绍,并对高功率激光器发展趋势及内在规律进行了讨论。

**关键词:** 高功率激光器; 二氧化碳激光器; 化学激光器; 光纤激光器; 固体激光器

**中图分类号:** TN248.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.08.001

## Development trend of high power lasers

LUO Wei, DONG Wen-feng, YANG Hua-bing, XU Peng-cheng, Tang Zhi-kai  
(No. 5 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Several high power laser systems are introduced, such as carbon dioxide laser, hydrogen fluoride/deuterium fluoride chemical laser, oxygen-iodine laser, fiber laser, solid-state laser, diode-pumped alkali metal vapor lasers. The development trends and inherent laws of high power lasers are discussed.

**Key words:** high power laser; carbon dioxide laser; chemical laser; fiber laser; solid-state laser

### 1 引言

1960年, Maiman 制造出第一台红宝石固态激光器<sup>[1]</sup>, 由于具有高亮度、单色性好、方向性好的特点, 激光自诞生之日起便与军事应用紧密联系在一起, 特别是发展“光速防御/进攻”定向能激光武器的强大吸引力, 一直推动着高功率激光器的快速发展<sup>[2]</sup>。

激光器本质上是将其他能量转换为激光的器件。激光器有多种分类方式, 按工作介质可分为: 固体激光器(红宝石激光器、钕玻璃激光器、Nd:YAG激光器)、气体及蒸汽激光器(氦氖激光器、二氧化碳激光器、铜蒸汽激光器)、液体激光器(染料激光器)、自由电子激光器等, 一些新型独立命名的激光器, 如光纤激光器、半导体激光器等都可归于固体激光器, 而 HF/DF 化学激光器、碱金属激光器等都可归于气体及蒸汽激光器。按泵浦/激励方式的不同可分为光泵浦、电激励激光器(电泵浦)、燃烧驱动激光器(热泵浦)、化学激光

器(化学反应泵浦)等, 在一些激光器中采用组合泵浦方式; 按运转方式又可分为连续波激光器和脉冲激光器<sup>[3]</sup>。

激光器发展至今种类繁多, 某些激光器发展多年技术成熟应用广泛, 但仍停留在低功率输出水平, 如氦氖激光器; 某些新型激光器发明不久, 便被认定为超高功率激光器备选方案并得到大力发展, 如二极管泵浦碱金属激光器, 其原因是因为高功率激光器的发展隐藏着某些特殊要求和一般性规律。本文对已实现超高功率输出及有实现超高功率输出潜质的激光系统进行了归纳总结, 其中包括二氧化碳激光器、HF/DF 化学激光器、氧碘化学激光器、光纤激光器、固体激光器、半导体泵浦碱金属激光器等, 并对高功率激光器发展趋势及内在规律进行了讨论。

基金项目: 装备研究项目(k1223309)资助。

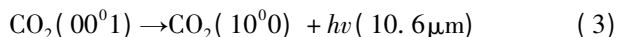
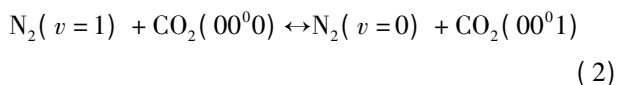
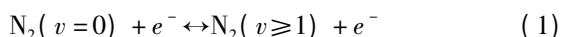
作者简介: 罗威(1985-), 男, 博士, 主要研究方向为光电对抗。  
E-Mail: luowei8786@163.com

收稿日期: 2013-01-31

## 2 高功率激光器

### 2.1 二氧化碳激光器

CO<sub>2</sub> 激光器包括电激励 CO<sub>2</sub> 激光器和燃烧驱动气动 CO<sub>2</sub> 激光器两种类型。Patel 于 1964 年首次提出发展 CO<sub>2</sub> 激光器的设想,并于 1965 年发明首台电激励 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[4]</sup>。电激励 CO<sub>2</sub> 气体激光器的基本原理为:对 N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-He 混合气体进行放电,利用放电将 N<sub>2</sub> 分子激励到振动激发态,随后通过近共振传能将能量从激发态 N<sub>2</sub> 分子转移到 CO<sub>2</sub> 分子,产生激射态 CO<sub>2</sub> 分子并最终形成激射,反应方程式如下:



燃烧驱动气动 CO<sub>2</sub> 激光器反应方程式与之基本相同,但是通过燃烧放热来产生振动激发态的 N<sub>2</sub> 分子,并通过超音速扩张的气动方式来“冻结”能量。

电激励 CO<sub>2</sub> 激光器是最早发展的高能激光系统,目前功率水平在 25kW 左右<sup>[5-6]</sup>。激光器系统具有极高的可靠性、非常稳定的功率输出以及卓越的光束质量,在工业材料处理领域(如激光切割、焊接、打标等)长期占据统治性地位,但电激励 CO<sub>2</sub> 激光器也有缺点:(1) 波长太长限制了光束聚焦的紧密度;(2) 此波长不能通过光纤传输,只能使用反射镜组件将光束从激光器传输到工作场所;(3) 激光器维护时偶尔需要更换放电气体和电极<sup>[7]</sup>。因此在新型固体激光器和光纤激光器出现后,电激励 CO<sub>2</sub> 激光器正在被逐步替代。

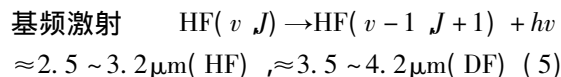
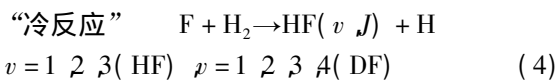
燃烧驱动气动 CO<sub>2</sub> 激光器是最早发展的超高功率激光系统,还是首台连续波千瓦级功率输出同时运行时间到达百秒量级的激光器<sup>[8]</sup>,艾维克·爱弗雷德实验室 135kW 大型气动 CO<sub>2</sub> 激光器则是首台输出功率超过 100kW 的超高功率激光器<sup>[2]</sup>。美国空军“机载激光实验室”(Airborne Laser Laboratory, ALL)项目以超高功率气动 CO<sub>2</sub> 激光器为基础,计划将一台半兆瓦量级的激光器装入改进的波音 707 飞机,并结合光束控制系统来构建整套激光武器系统。ALL 顺利引导激光光束聚焦并引爆拖曳前行的模拟目标——AIM-9B 空对空导弹,并击毁用于模拟海面巡航导弹的海面掠行靶机。由于存在激光波长较长而光学镜面尺寸有限、10km 以

上大气传输性能非常差等缺点,ALL 获得了实验室成功,但不适合作为实战武器系统,1983 年 ALL 项目被终止。

电激励 CO 激光器与 CO<sub>2</sub> 激光器原理相似,最高发展水平为短时间运行 100kW 功率输出系统<sup>[9]</sup>,其系统可靠性、实用性都远不及 CO<sub>2</sub> 激光器,因此没有得到太多关注。

### 2.2 HF/DF 化学激光器

与 CO<sub>2</sub> 激光器相似,HF/DF 化学激光器也包括电激励 HF/DF 化学激光器<sup>[10]</sup>和燃烧驱动 HF/DF 化学激光器,不同的是,HF/DF 激光器中放电和燃烧仅用于解离氟源气体(F<sub>2</sub>,NF<sub>3</sub>,SF<sub>6</sub>等)产生 F 原子,而高功率 HF/DF 化学激光器一般为燃烧驱动类型。激光器泵浦方式为式(4)所示化学反应,一般被称之为“冷反应”,激光的产生见式(5),DF 激光器的泵浦与激射与 HF 激光器类似<sup>[11]</sup>。



1967 年,Kompas 等人首先成功演示脉冲式 HF 激光器<sup>[12]</sup>,1969 年 Spencer 等人引入气动技术实现了连续波 HF 激光器<sup>[13]</sup>。之后 HF/DF 激光器的发展可谓突飞猛进,激光器输出功率在短短十余年就突破了兆瓦级。以 HF/DF 激光器为基础开展了多项激光武器研制计划,其中包括“基本演示激光器”项目(Baseline Demonstration Laser, BDL)、“海军 ARPA 化学激光器”/“先进中红外化学激光器”项目(Navy-ARPA Chemical Laser/Mid-Infrared Chemical Laser, NACL/MIRACL)、“Alpha 天基激光器”项目(Alpha Space Based Laser, SBL)、地基“战术高能激光器”/“机动战术高能激光器”项目(Tactical High Energy Laser/Mobile Tactical High Energy Laser, THEL/MTHEL)等。

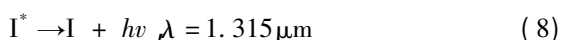
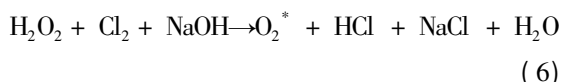
BDL 项目在 1973 年首次出光,并成为世界上首台百千瓦量级 HF/DF 化学激光器。MIRACL1980 年研制成功,成为首台兆瓦级 DF 化学激光器,到 1983 年 MIRACL 最高输出功率达到 2.2MW,输出功率 1MW 时光束质量达 2 倍衍射极限<sup>[14]</sup>,MIRACL 激光器在美军白沙导弹靶场高能激光测试中心(HELSTF)中使用超过 25 年<sup>[2]</sup>,配合“海石”光束定向器完成了对“陶”式反坦克导弹、“大力神”火箭、“火蜂”靶机、“喀秋莎”火箭弹、卫星等多次攻击实验<sup>[15]</sup>。Alpha 激光器为环柱型 HF 化学激光器,

1989年研制成功,到1992年其最高输出功率达到5MW,光束质量达到近衍射极限<sup>[16]</sup>,Alpha激光器曾用于美国首个“天基激光器”(Space Based Laser, SBL)项目,项目所需要的大部分技术已完成研制及组合,但由于其他原因该项目于2002年被终止<sup>[2]</sup>。THEL/MTHEL项目由美国和以色列联合研制,其设计目标是发展成陆军使用的机动平台战术激光武器,用于对抗来袭火箭弹、榴弹炮、迫击炮等,2000年THEL系统成功追踪并摧毁多枚“喀秋莎”火箭<sup>[17]</sup>;MTHEL系统用三辆车装载,一辆装氟化氙激光器,一辆装火控雷达,一辆装激光燃料,在2004年的试验中成功击毁了多发齐射迫击炮弹,由于有效射程不满足实际作战需求,该项目在2006年被终止<sup>[18]</sup>。

HF/DF化学激光器需要在低光腔压力条件下工作,而产生的废气需排入大气。在小型低功率激光系统中可用真空机组来制造低腔压条件,而大型高功率激光系统中只能用扩压器和引射器构成的压力恢复系统来实现废气直排。压力恢复系统器件本身和所需的大量引射气体造成HF/DF化学激光器体积重量庞大,导致机动平台难以负载,这也是制约HF/DF激光器军事应用的主要因素之一。

### 2.3 氧碘化学激光器

氧碘化学激光器工作原理为,首先利用双氧水( $H_2O_2$ )和氯气( $Cl_2$ )发生化学反应来产生单重态氧,单重态氧( $O_2^*$ )在光学谐振器中与碘混合,通过碰撞产生激发态碘原子,然后通过受激辐射产生激光:



氧碘化学激光器(chemical oxygen-iodine laser, COIL)在1978年首次演示成功<sup>[19]</sup>。之后COIL技术经历了长足发展,输出功率快速提升<sup>[20-22]</sup>,COIL与HF/DF激光器一样需要在低光腔压力条件下工作,重量体积同样也成为COIL军事应用的主要制约因素之一,因此过去10年内COIL技术最主要的推动力量是提高系统总压来简化压力恢复系统,方案为通过单重态氧发生器(single oxygen generator, SOG)和光腔内气流混合设计来提高运行压强<sup>[23-24]</sup>。

COIL技术在“先进战术激光”(Advanced Tactical Laser, ATL)和“机载激光”(Airborne Laser, ABL)

项目中达到发展顶峰,在ATL演示中烧穿了运动中卡车的引擎罩<sup>[25]</sup>,在ABL演示中成功击落处于助推段的弹道导弹<sup>[26]</sup>。ATL和ABL项目完成了对组成整套复杂武器系统的各项至关重要技术的全面系统验证,包括激光器、光束控制、自适应光学、大气光学、热管理和流体控制系统、压力恢复系统、远距离追踪等技术。ABL设计指标为:激光器连续波输出功率达到3MW,交战时间5s/10s,最大射程300km/600km,计划用于战区范围内摧毁处于助推段的弹道导弹以及其他各类战略和战术目标。由于激光器体积重量庞大,ABL战场应用面临众多的问题,2011年12月美国国防部正式终止ABL研发计划。

COIL是仍处于发展中的高功率激光系统,发展方向有<sup>[27]</sup>:(1)提高激光器的效率,尽可能地降低单态氧发生器中产生的水,把水对单态氧的猝灭降至最低限制;(2)采用新的燃料和化学混合物,激光器中单态氧发生器占了很大重量,正在研究一些代替单态氧的方法,如全气相碘激光器<sup>[28]</sup>,电激励氧碘激光器<sup>[29]</sup>;(3)燃料循环使用,燃料差不多占了飞机载重的1/3,因此开发循环使用燃料的方法至关重要;(4)采用塑料件代替钢部件,不仅能大大减轻重量,而且注塑成形降低了成本;(5)采用新气源引射器,减小了激光器压力恢复系统的重量和体积;(6)研制高压运行的COIL,减小压力恢复系统的重量和体积。

### 2.4 自由电子激光器

自由电子激光器(free electron laser, FEL)由Madey等人首次演示<sup>[30]</sup>,这是一种完全不同的高能激光系统。自由电子激光是由电子加速器产生的相对论性(接近光速)电子束团在周期性磁场中振荡产生的相干辐射。自由电子与电磁场的经典交互作用产生了激光增益区域,并通过光腔将有用能量以激光光束的形式提取出来<sup>[31]</sup>,其原理如图1所示。

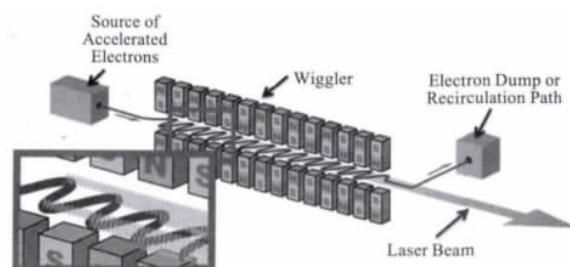


图1 自由电子激光器原理示意图<sup>[7]</sup>

FEL的特点之一是激光波长取决于电子束能量和周期性磁场的磁场强度,而非取决于任何原子或分子的特定量子态,因此FEL具有独特的优点,即

能够在软 X 射线至中红外宽广波段范围内实现波长调谐输出。然而在高功率输出时,同一组镜片只能用于特定较窄波段激光振荡及传输,即波长调谐输出时人们必需更换镜子来适应特定波长,并更换和调试相应部件,这个操作过程不可能很快完成。FEL 的另一传统缺点即存在体积重量大和电效率低的问题。

美国海军一直重点发展 FEL,因为 FEL 波长可调谐的特点使激光能在海面富含水汽的大气环境中更好的传输,同时海军拥有的大型舰船能够容纳 FEL 体积重量大和电效率低的缺点<sup>[7]</sup>。兆瓦级自由电子激光器在理论上可以实现<sup>[32-33]</sup>,但到目前为止,有报道的 FEL 最高水平为连续波 14.3kW 功率输出<sup>[34]</sup>。

## 2.5 固体激光器

利用闪光灯泵浦技术,首台固体激光器(solid state laser,SSL)也是首台激光器由 Maiman 演示成功<sup>[1]</sup>。SSL 的增益介质为掺杂有稀土元素(如钕、钇、镱等)的晶体棒或晶体板(有时极薄);使用不同掺杂物能产生系列不同输出波长,但一般都位于近红外区域。最常见并使用至今的晶体材料之一为掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG),相应激光波长为 1064nm。闪光灯泵浦技术的低效率使 SSL 在很长时间内步履维艰,直到使用二极管激光器作为泵浦源之后,使 SSL 的电光效率大幅提高,其机动平台军事应用潜力才显现出来<sup>[35]</sup>。

世纪之交,二极管泵浦固体激光器(diode pumped solid state laser,DPSSL)发展迅猛。Goodno 等人于 2001 年研制出 415W 连续波 DPSSL,光光转换效率达到 30%<sup>[36]</sup>,之后研制出功率高达 19kW 的锁相 Z 字型板条激光器阵列<sup>[37-38]</sup>。DPSSL 目前最高水平为 105kW 锁相激光系统,在此系统中,对 7 个 15kW 的主振荡功率放大器(master oscillator-power amplifier,MOPA)激光链进行了相干合成,如图 2 所示(直流)电光转换效率达 19.3%,平均光束质量(BQ)为 2.9,运行时间超过 300s<sup>[39]</sup>。

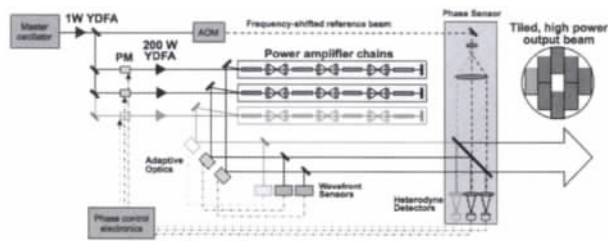


图 2 105kW 锁相 SSL 激光系统示意图<sup>[7]</sup>

YDFA—钕掺杂光纤放大器;PM—相位调制器;AOM—声光调制器

SSL 领域显示出光明前景的一个分支为薄盘片激光器。Giesen 等人在将近 20 年前已提出此概念<sup>[40]</sup>,Giesen 和 Speiser 对此类型 SSL 进行了非常好的专题论述<sup>[41]</sup>。盘片激光器在保持较好光束质量情况下已获得超过 35kW 的功率输出。

最近在“海上演示激光”(Maritime Demonstration Laser,MDL)项目中,美国海军利用诺·格公司建造的 SSL 系统演示了舰船防御,在一英里之外击坏了一座小型船只的发动机<sup>[42]</sup>。在“高能液体激光区域防御系统”(High-Energy Liquid Laser Area Defense Systems,HELLADS)项目中,将系列薄盘片激光放大器浸泡在冷却液中,用这种独特方式来缓解在高功率 SSL 系统中普遍存在的废热管理问题<sup>[7]</sup>。

SSL 存在的主要问题是晶体内废热沉积,产生热梯度并导致光束质量问题。在高功率 SSL 尝试了多种散热方式,如加大晶体散热面积(板条、薄盘片激光器)、预先冷却(热容激光器)、流体流动散热(气冷、水冷)等,SSL 系统的发展方向和实际应用前景也取决于对废热管理的改进程度。

## 2.6 光纤激光器

光纤激光器是指采用掺杂光纤作为增益介质的激光器,与固体激光器类似,其输出波长与掺杂元素相关,一般位于近红外区域。光纤激光器的概念早在 1961 年就已提出<sup>[43]</sup>,3 年之后被 Koester 和 Snitzer 验证<sup>[44]</sup>。之后 20 多年光纤激光系统发展缓慢,但到了 1990 年代,为满足因特网持续快速发展的需求,用于快速通信和数据传输的光纤技术经历了爆炸式发展。近年来,随着大模场面积双包层掺杂光纤制造工艺和激光二极管泵浦技术的发展,单根单模双包层光纤激光器的输出功率迅速提高<sup>[45-47]</sup>。高能光纤激光系统的当前最高技术水平是 IPG 光子公司制造和销售的 10kW 单模光纤激光器<sup>[48]</sup>,插头效率(注:总电光效率)大于 30%。IPG 同时销售一种 50kW 的光纤激光系统,但是其光束质量极差(BQ > 30)。

光纤激光器有个重要的问题难以解决,即单根光纤激光器内部极高的功率密度会不可避免地诱发受激布里渊散射(SBS);这将限制单根光纤激光器输出功率的提高<sup>[49]</sup>,有研究指出单模宽谱光纤的输出功率极限约为 36.6kW<sup>[50]</sup>。进一步提高光纤激光器输出功率的解决方案中,光束合成有一定优势也有潜在局限性<sup>[51]</sup>,对高功率光纤激光器进行相干光束合成的研究也正在进行中<sup>[52]</sup>。

在美国海军“激光武器系统”( Laser Weapon System LaWS) 项目中,最近成功演示了光纤激光器技术的军事应用<sup>[53]</sup>。

光纤激光器是仍处于发展中的高功率激光系统,由于具有电光效率高、热管理方便、结构紧凑、能够实现高功率和高光束质量激光输出等优点,光纤激光器功率提升及军事应用前景被普遍看好,也得到非常多的关注。同时光纤激光器进军材料加工领域后,正在逐步替代 CO<sub>2</sub> 激光器的统治地位,因为其波长能够与大多数金属更好地耦合,并且利用光纤可以很方便地将激光导入到工作台。

### 2.7 碱金属激光器

碱金属激光器全称为二极管激光泵浦碱金属蒸汽激光器(Diode pumped alkali vapor laser, DPAL),碱金属是指锂、钠、钾、铷、铯等元素,研究较多的铷激光波长为 795nm,铯激光波长为 895nm,两种波长均位于大气窗口,大气传输性能极佳。2003 年铷原子激光器完成首次出光演示<sup>[54]</sup>,到 2012 年 DPAL 实现了介质闭环流动 1000W 连续波铯激光输出<sup>[55]</sup>。

DPAL 的发展目前还面临着很多问题,如二极管激光器的泵浦光线宽与 DPAL 系统增益介质吸收线宽不匹配的问题,增益介质流动的问题等等,但这并不妨碍研究者将其定标放大至超高功率输出激光系统的信心<sup>[56]</sup>,原因在于 DPAL 综合了传统气体和固体激光的优势,即气体介质流动散热、采用高功率的二极管激光器阵列来作为泵浦源,其他优点还有全电操作、结构紧凑、高量子效率、介质可循环使用、不存在单口径功率极限等,对兆瓦级 DPAL 进行概念设计的研究工作已然开展<sup>[57]</sup>。

在 DPAL 连续波输出功率刚刚突破千瓦前提下,系统能否顺利扩大规模还有很多问题,因此 DPAL 只能称之为有潜力实现高功率输出的激光系统,本文将 DPAL 列于其中,正是为了分析分析高功率激光系统发展的一般规律。

### 3 高功率激光器发展趋势

从发明至今,激光技术经历了 40 余年的高速发展,根据不同应用需求发展出种类繁多的激光器,而高功率激光器则有其独特的发展规律。作为能量转换器件,激光器可简单分为能量注入、能量转换、激光产生三部分,研制高功率激光器的关键即发展高功率能量注入、能量转换效率高、光束质量好的激光系统。

在能量注入方面,高功率高效率的能量注入是

实现高功率激光输出的基本条件。在激光器中除了使用电(磁)、光、热、电子运动、化学反应等能量形式之外,甚至还尝试过核能、烟火能量等。每种能量又各自包括很多具体实施方式,如电泵浦就包括直流辉光放电、空心阴极放电、弧光放电、微波射频放电等多种方式<sup>[10]</sup>。在很多激光器中实际使用的是组合泵浦方式,如燃烧驱动 HF/DF 化学激光器中,用燃烧放热解离氟源(如 NF<sub>3</sub>、F<sub>2</sub> 等)产生 F 原子,F 原子参与化学反应产生 HF/DF 增益介质;二极管泵浦固体/光纤激光器中先通过电光转换产生宽线宽的二极管激光,再用二极管激光泵浦晶体/光纤产生窄线宽的固体/光纤激光。发展高功率激光系统需要从中选择最易实现稳定连续高功率高效率能量注入的方式,如多种生成卤化氢的化学反应都可用于产生激光,但仅 HF 激光器实现超过功率输出,因为其化学反应放热量最大。

在能量转换方面,高能量转换效率是实现高功率激光输出的必要条件。实现高能量转换效率的一种方式简化为简化转换过程,如化学激光器直接将燃料化学能转换为激光,与其他激光器相比省去了能量转换中间环节,因此发展短短十余年就实现兆瓦级输出并长期在高能激光器领域独领风骚;另一种方式则是提高各能量转换过程的效率,如固体激光器初期采用闪光灯泵浦,闪光灯-激光的低效率使固体激光器的发展一度陷入停滞,但采用二极管激光作为泵浦源后,电能-激光二极管-固体激光的能量转换效率均大为提高,固体激光器也很快重新进入高能激光器行列。高能量转换效率对高功率激光器来说至关重要,并直接影响高功率激光器的发展方向,其作用主要体现在如下两个方面:

一、激光器体积重量。激光器体积重量过大是目前制约激光武器发展的主要因素,激光系统(HF 激光器、氧碘激光器)体积重量庞大导致平台难以负载,是天基激光武器(SBL)和机载激光武器(ABL)项目下马的直接原因,而燃料储罐在激光系统体积重量构成中占据了相当大的比重,提高能量转换效率能有效缩减激光器体积重量。高功率固体和光纤激光器在将来实现机动平台军事应用时,实际上需要三次能量转换过程,即燃料-电能-激光二极管阵列-激光器,任何一次转换若不能足够高效都会导致整套激光器件的体积重量庞大。

二、废热管理。激光器作为能量转换器件,总注

入能量除转换为激光输出外, 剩余能量大部分将会转换为废热。假设一台兆瓦级激光器的总能量转换效率为 20%, 那么会产生将近 4 MW 的废热, 即相当于 3~4 倍的激光能量将会反馈至激光器自身。废热除了会损害激光系统器件, 增益介质中的废热还会直接影响激光光束质量。如何处理废热是发展高功率激光器要解决的首要问题, 也直接限定了高功率激光器的发展思路。外部器件的冷却一般采用常见的风冷、水冷方式, 对激光器内部即增益介质的废热处理方式选择则非常有限: 快速流动( 气体液体介质)、增大散热表面积( 固态介质)。如高功率 CO<sub>2</sub> 激光器、HF/DF 激光器、氧碘激光器均采用增益介质快速流动方式, 将提取过增益的介质快速排出激光器, 废热也随之排出; 高功率固体和光纤激光器均采用增大散热表面积方式, 固体激光器增益介质为板条型或薄片片型晶体, 光纤激光器增益介质则为极细极长的光纤, 其它方式如固体热容激光器尚能在一般高功率下运行, 但无法适应超高功率运行。

在激光产生方面, 光束质量好、大气传输性能好的激光是高功率激光器实际军事应用的有效保障。高光束质量能够保障激光束在远距离传输后仍能很好地聚焦, 光束质量与激光介质( 浓度、折射率、温度等) 均匀性关系密切, 实际运行中废热管理问题对光束质量有较大影响。大气传输性能好主要是指激光波长应位于传输透射率高的大气窗口区, 这样远距离传输后激光功率只会有限衰减。此外, 由于激光“亮度”与波长平方成反比, 为达到更好破坏效果, 倾向于发展波长更短的高功率激光系统<sup>[2]</sup>, 从 CO<sub>2</sub> 激光器、HF/DF 激光器、COIL、固体/光纤激光器到 DPAL 的实际发展历程也显示激光器波长在逐步缩短, 然而为避免激光散射光对人眼造成伤害, 激光波长应处于“人眼安全”范围( 大于 > 1.4 μm)<sup>[7]</sup>, 如何权衡尚无定论。

#### 4 结 论

在军事应用需求的强力推动之下, 高功率激光器技术向着更高功率、更好光束质量、更佳大气传输性能、更高能量转换效率、更紧凑简便的方向发展。二氧化碳激光器、氟化氢/氟化氙化学激光器、氧碘化学激光器、光纤激光器、固体激光器、半导体泵浦碱金属激光器等都是激光技术领域的非凡成就, 本文对其各自发展历程和共同发展规律进行了总结, 指出研制高功率激光器的关键即发展高功率能量注入、能量转换效率高、光束质量好

的激光系统。

#### 参考文献:

- [1] T H Maiman. Stimulated optical radiation in ruby [J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] J A Horkovich. Directed Energy Weapons: Promise & Reality [C]. AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2006, 3753.
- [3] Guo Ruhai, Shi Long, Wang Siwen, et al. Development review of HF/DF chemical lasers [J]. OME Information, 2010, 27(3): 30-35. (in Chinese)  
郭汝海, 施龙, 王思雯, 等. HF/DF 化学激光器的研究进展 [J]. 光机电信息, 2010, 27(3): 30-35.
- [4] C K N Patel, P K Tien, J H McFee. CW high power N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> + He laser [J]. Appl. Phys. Lett, 1965, 7: 290-292.
- [5] E F Plinski, K M Abramski. “DC-Excited Continuous-Wave Conventional and RF-Excited Waveguide CO<sub>2</sub> Lasers” in Gas Lasers [M]. New York: CRC Press, 2007: 239-286.
- [6] A E Hill. “High-Power Electric CO<sub>2</sub> Lasers” in Gas Lasers [M]. New York: CRC Press, 2007: 287-340.
- [7] D L Carroll. Overview of High Energy Lasers: Past, Present and Future? [C]. 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Hawaii, 2011, 3102: 1-21.
- [8] W Duncan, M Holloman, B Rogers, et al. Recent Progress in Hydrogen Fluoride Overtone Chemical Lasers [C]. AIAA Paper, 1991-1480.
- [9] A A Ionin. “Electric Discharge CO Lasers” in Gas Lasers [M]. New York: CRC Press, 2007: 201-237.
- [10] Luo Wei, Yuan Shengfu, Lu Qisheng. Research development of small scale discharge driven continuous-wave HF/DF chemical laser [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 371-375. (in Chinese)  
罗威, 袁圣付, 陆启生. 小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器研究进展 [J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 371-375.
- [11] N G Basov, A S Bashkin, V I Igoshin, et al. Chemical lasers [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [12] K L Kompa, G C Pimentel. Hydrofluoric Acid Chemical Laser [J]. J. Chem. Phys., 1967, 47: 857-858.
- [13] D J Spencer, T A Jacobs, H Mirels, et al. Continuous-Wave Chemical Laser [J]. Int. J. Chem. Kinet., 1969, 1: 493-494.
- [14] Sang Fengting, Zhou Dazheng, Jin Yuqi, et al. Chemical Lasers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 103-105. (in Chinese)  
桑凤亭, 周大正, 金玉奇, 等. 化学激光 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 103-105.

- [15] J R Albertine. Recent High Energy Laser System Tests Using the MIRACL/SLBD [C]. Proc of SPIE ,1993 ,1871: 229 – 239.
- [16] J A Horkovich ,P J Pomphrey. Recent Advances in the Alpha High Power Chemical Laser Program [C]. AIAA 28th Plasmadynamics and Lasers Conference ,1997 ,1 – 24.
- [17] J Shwartz ,J Nugent ,D Card ,et al. Tactical high energy laser [J]. J. Directed Energy 2003 ,1: 35 – 47.
- [18] U. S. Army selects Northrop Grumman Design Concept for Mobile High-Energy Laser Weapon for Tactical Missile Defense [N/OL]. [2003 – 08 – 21]. <http://www.capital.northgrum.com/contracts/ngcontr082103.html>
- [19] W McDermott ,N Pchelkin ,D Benard ,et al. An Electronic Transition Chemical Laser [J]. Appl. Phys. Lett. ,1978 ,32: 469 – 470.
- [20] K Truesdell ,S Lamberson ,G Hager. Phillips Laboratory COIL Technology Overview [C]. AIAA Paper ,1992 – 3003.
- [21] J Kodymova. Overview on the chemical oxygen-iodine laser technology [C]. Proc of SPIE 2007 6346.
- [22] M Endo. Chemical Oxygen-Iodine Laser: Recent Advances as a Chemical Device [J]. Russ. J. Phys. Chem. A 2007 ,81(9) : 1497 – 1501.
- [23] W Shi ,L Deng ,H Yang ,et al. Preliminary study of a centrifugal-flow singlet oxygen generator [J]. Quant. Elect. ,2008 ,38(2) 199 – 203.
- [24] D M King ,D L Carroll ,T F Field ,et al. Performance of a multi-stream injection COIL with starlet ejectors [C]. AIAA Paper 2010 – 4754.
- [25] J Skillings. Laser gunship hits moving ground target [N]. CNET News ,13 Oct. 2009.
- [26] J Skillings. Airborne Laser zaps in-flight missile [N]. CNET News ,12 Feb. 2010.
- [27] Ren Guoguang ,Huang Yunian. Developments and challenges for American high-energy laser weapons( Part 2) [J]. Laser Technology 2001 25(5) : 321 – 327. ( in Chinese)  
任国光 ,黄裕年. 美国高能激光武器的发展及其面临的挑战( 下篇) [J]. 激光技术 2001 25(5) : 321 – 327.
- [28] M Endo ,T Nakamura ,T Masuda ,et al. Theoretical and Experimental Studies of the All Gas-Phase Iodine Laser [J]. Russian Journal of Physical Chemistry A ,2009 ,83(9) : 1452 – 1456.
- [29] J W Zimmerman ,G F Benavides ,B S Woodard ,et al. Electric Oxygen-Iodine Laser Performance Enhancement using Larger Discharge and Resonator Mode Volumes [C]. AIAA Paper ,2010 – 5038.
- [30] J M J Madey. Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field [J]. J. Appl. Phys. ,1971 ,42(5) : 1906 – 1913.
- [31] H P Freund ,T M Antonsen. Principles of Free-Electron Lasers [M]. London: Chapman & Hall ,1992.
- [32] A M M Todd. High-power free-electron laser concepts and applications [C]. Proc of SPIE 2000 3931: 234.
- [33] P Sprangle ,B Hafizi ,J R Penano. Design of a Compact , Optically Guided ,Pinched ,Megawatt Class Free-Electron Laser [J]. IEEE J. Quant. Elect. ,2004 ,40(12) : 1739 – 1743.
- [34] S Benson ,K Beard ,G Biallas ,et al. High Power Operation of the JLAB IR FEL Driver Accelerator [C]. IEEE Proc. Particle Accel. Conf. 2007 ,79 – 81.
- [35] T Y Fan ,R L Byer. Diode Laser-Pumped Solid-State Lasers [J]. IEEE J. Quant. Elect. ,1988 ,24(6) : 895 – 912.
- [36] G D Goodno ,S Palese ,J Harkenrider ,et al. Yb: YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. Opt. Lett. 2001 26(21) : 1672 – 1674.
- [37] G D Goodno ,H Komine ,S J McNaught ,et al. Coherent combination of high-power ,zigzag slab lasers [J]. Opt. Lett. 2006 31(9) : 1247 – 1249.
- [38] G D Goodno ,C P Asman ,J Anderegg ,et al. Brightness-Scaling Potential of Actively Phase-Locked Solid-State Laser Arrays [J]. IEEE J. Select. Topics Quant. Elect. ,2007 ,13(3) : 460 – 472.
- [39] S J McNaught ,C P Asman ,H Injeyan ,et al. 100-kW Coherently Combined Nd: YAG MOPA Laser Array [C]. Optical Society of America 2009.
- [40] A Giesen ,H Hügel ,A Voss ,et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. Appl. Phys. B ,1994 ,58: 365 – 372.
- [41] A Giesen ,J Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws [J]. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr. 2007 ,13(3) : 598 – 609.
- [42] C Keyes. Navy successfully tests prototype ocean-going laser weapon [N/OL]. [2011 – 04 – 14]. <http://www.CNN.com>.
- [43] E Snitzer. Proposed Fiber Cavities for Optical Masers [J]. J. Appl. Phys. ,1961 32(1) : 36 – 39.
- [44] C J Koester ,E Snitzer. Amplification in a Fiber Laser [J]. Appl. Opt. ,1964 3(10) : 1182 – 1186.
- [45] V Gapontsev ,W Krupke. Fiber lasers grow in power [J]. Laser Focus World 2002 8: 83 – 87.
- [46] J Anderegg ,S Brosnan ,E Cheung ,et al. Coherently Coupled High Power Fiber Arrays [C]. Proc of SPIE ,2006 6102.
- [47] R A Motes ,R W Berdine. Introduction to High Power Fiber Lasers [C]. Directed Energy Professional Society ,Albuquerque 2006.

- [48] IPG Photonics. High Power Fiber Lasers for Industrial Applications [N/OL]. [http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP\\_Brochure.pdf](http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf).
- [49] R G Smith. Optical power handling capacity of lowloss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, 11 ( 11 ): 2489 – 2494.
- [50] J W Dawson, M J Messerly, R J Beach, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, 16 ( 17 ): 13240 – 13266.
- [51] J E Rothenberg, G D Goodno. Advances and Limitations in Beam Combination of Kilowatt Fiber Amplifiers [C]. *Proc of SPIE* 2010, 7686.
- [52] P Sprangle, A Ting, J Penano, et al. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications [J]. *IEEE J. Quant. Elect.* 2009, 45( 2 ): 138 – 148.
- [53] J T Schriempf, B J Hankla. Navy Laser Weapon System ( LaWS) prototype development and testing [C]. *Proc of SPIE Photonics West-LASE 2011*, San Francisco.
- [54] W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, et al. Resonance transition 795 – nm rubidium laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28 ( 23 ): 2336 – 2338.
- [55] A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, et al. Diode-pumped caesium vapor laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. *Quantum Electron* 2012, 42( 2 ): 95 – 98.
- [56] W F Krupke, R J Beach, C K Kanz, et al. DPAL: A new class of CW, near-infrared, high-power diode-pumped alkali( vapor) lasers [C]. *Proc of SPIE* 2004, 5334.
- [57] Yang Zining. Study on Diode Pumped Rubidium Vapor Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology 2012. ( in Chinese)  
杨子宁. 半导体泵浦铷蒸汽激光器研究 [D]. 长沙: 国防科技大学 2012.