

高平均功率固体激光器研究进展

甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 姜益光, 陈水林, 张 龙

中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 从激光器热效应出发,由热效应的产生、危害以及解决方案入手,分类详细阐述了薄片激光器、热容激光器、板条激光器以及光纤激光器的基本原理及其在高功率输出方面的进展。以激光武器作为实际应用典例,综述了近年来各国激光武器的项目概况及进展,在此基础上提出了高功率固体激光器的发展趋势,即运行维护成本低、结构紧凑及无人机装载应用,阐述了复合结构激光器的发展优势及其趋势。

关键词 激光器; 热效应; 高功率固体激光器; 板条激光器; 复合结构激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010003

Research Progress of High Average Power Solid-State Lasers

Gan Qijun, Jiang Benxue, Zhang Pande, Jiang Yiguang, Chen Shuilin, Zhang Long

Key Laboratory of Materials for High Power Lasers, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Based on the generation, harmfulness and solution of thermal effects of lasers, different kinds of lasers are illustrated in detail from the perspective of their principle and recent progress on high power, including thin disk lasers, heat capacity lasers, slab lasers and fiber lasers. As practical application on laser weapons, projects and progresses of laser weapons are classified. The development trend of high power solid-state lasers is proposed, which is low cost for operation and maintenance, compact structure and unmanned aerial vehicle (UAV) loading. Furthermore, the development advantage and the tendency of composite lasers are addressed.

Key words lasers; thermal effect; high power solid-state lasers; slab lasers; composite lasers

OCIS codes 140.3580; 140.3070; 140.3380

1 引 言

1960年7月8日美国科学家梅曼发明了第一台激光器——红宝石激光器,这标志着激光器开始进入人类文明历史。激光器的功率也从毫瓦级发展到瓦、千瓦级,甚至兆瓦级。激光具有优异的相干性、单色性和方向性,其亮度比普通光源高1000倍,因此高功率激光器在光电对抗、激光致盲、材料加工及生物医学等领域有广泛的用途。同时由于其潜在的巨大破坏力,高功率激光器成为各国军事领域争相研究的热点。

美国国防科学委员会出版的《定向能武器》中对高能激光系统的任务使命的定义为:广泛的战略使命是太空控制和提供防御;战术使命是为海上舰船提供反巡航导弹和战术弹道导弹的防御,为地面提供反火箭弹、炮弹、迫击炮弹的防卫,并能摧毁对方的无人机,为飞机提供反单兵防空导弹的防御。为了满足上述需求,激光器的功率必须达到千瓦级。10 kW级的激光武器可以破坏一些光电系统的传感器;50 kW级的激光武器可以毁伤近距离的无人机;100 kW级的激光武器可以毁伤火箭弹、迫击炮弹;300 kW级的激光武器可以拦截亚声速的反舰导弹;500 kW级的激光武器可以毁伤有人驾驶的飞机;兆瓦级的激光武器可以拦截

收稿日期: 2016-08-25; **收到修改稿日期:** 2016-10-08; **网络出版日期:** 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61378069)、上海市启明星计划(14QB1400900)、中国科学院青年创新促进会

作者简介: 甘啟俊(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光陶瓷方面的研究。E-mail: chesleygan@siom.ac.cn

导师简介: 姜本学(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光与光电子材料方面的研究。

E-mail: jiangsic@foxmail.com(通信联系人)

超声速的战术导弹以及弹道导弹^[1]。

以对激光武器研究最为成熟的美国为例,在联合高功率固体激光器(JHPSSL)项目中,诺格公司和达信公司分别于2009年和2010年实现了100 kW激光输出^[2];2012年Raytheon公司成功利用平面波导激光器实现了单模块15 kW激光输出,两年后,该公司设计出计划装载在“悍马”车上的平面波导激光器,其最小功率达到25 kW^[3];2014年安装在“庞塞”号上的高能固体激光武器系统(LaWS)的功率为15~50 kW。同样在2014年,Lockheed Martin公司研制的区域防御反弹药(ADAM)激光武器在加利福尼亚海岸完成测试,功率为10 kW。2015年ADAM系统的改进版先进测试型高能量方案(ATHENA)完成实地测试,激光功率为30 kW。

但所有激光器尤其是高功率激光器存在一个基础但却棘手的问题,即热效应。固体激光器在工作过程中会有大量的能量转化成热量,热问题将直接导致激光光束质量下降,并影响输出功率。国内外各研究机构针对固体激光器的热问题主要开展了相关材料选择、构型设计、冷却设计等方向的研究。本文主要针对固体激光器的热效应,系统总结了薄片激光器、热容激光器、板条激光器以及光纤激光器这几种解决方案的设计以及应用。

2 激光器的热效应

2.1 热效应的产生

产生激光需具备以下三个条件:1)提供放大作用的增益介质,作为激光工作物质,其激活粒子(原子、分子或离子)有适合于产生受激辐射的能级结构;2)外界激励源,使工作物质的激光上下能级之间产生粒子数反转;3)激光谐振腔,可使受激辐射的光能够在谐振腔内维持振荡。

增益介质在抽运源作用下,其激活离子发生跃迁后产生受激辐射,从而产生激光。固体激光器的光-光转换效率最高在30%~40%,因此在激光振荡过程中,除了一部分能量以激光的形式发射出去,一半以上的能量是以晶格振动产生热量的形式释放。而在高功率激光器中,输出功率通常在千瓦级,故而产生的热量同样也是千瓦级,增益介质必须具备优异的热管理性能,才能满足实际应用需求。

2.2 热效应的危害

热效应的产生将严重危害激光器的稳定性,其表现形式主要有以下方面。

1) 温度猝灭:又称为热猝灭,指对各种发光材料,随着温度的上升,其发光强度下降,发射光谱红移。其原因主要有两方面:一是温度的升高,晶格振动加剧,从而使发光中心的晶格弛豫增强,无辐射跃迁几率增大,发光效率降低;二是温度升高导致发光中心的状态或周围的微环境发生某种本质性变化,从而降低了发光效率。

2) 热应力:激光增益介质吸收或者冷却的不均匀性导致内部产生热梯度。不同温度的增益介质因热膨胀不同而在内部产生应力。当应力超出材料可承载范围时,增益介质发生炸裂。同时,内部热应力的产生将引起双折射效应。如YAG晶体是立方晶系,各向同性,但在热效应作用下,会变成各向异性,从而产生热致双折射,影响激光的产生以及其光束质量。

3) 热透镜效应:工作物质在产生激光的过程中,热分布的不均匀引起密度不同程度的改变,使光在传输的过程中经过不同密度的分界线时发生不同程度的折射,这将严重影响激光器的效率和激光光束质量。

2.3 热效应的解决方案

激光器的热管理能力对于结构的稳定性和激光的光束质量至关重要,对高功率激光器尤为重要。热效应的解决方案可以分为以下三大类。

1) 增益介质的选择:对增益介质的筛选,除了其能级结构、发射截面及带宽等性能,其热导率也是考虑的一个关键要素。各种常见激光增益介质的热导率如表1所示,可以看出,钕玻璃热导率极低,这意味着其有效工作时间很短,其余时间都浪费在散热上,这严重限制了它在高功率激光器上的应用。另一方面,基于YAG的增益介质能之所以成为现在的研究热点,除去能级结构等方面的优势,很重要的一点是其优异的导热性,不论是陶瓷还是单晶,良好的导热能力都为它在高功率激光器上的应用提供了坚实的基础。

表 1 常见增益介质热导率

Table 1 Thermal conductivity of common gain materials

| Material | APG-1 (Nd glass) | Nd:YAG crystal | Nd:YAG polycrystal | YVO ₄ crystal | Lu ₂ O ₃ crystal | LiYF ₄ crystal |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|--|---------------------------|
| Thermal conductivity / [W/(m·k)] | 0.67 | 14 | 11.2 | 5.23 | 12.5 | 6 |

2) 增益介质的结构设计:传统固体激光器的增益介质都是均一的块体,在高功率抽运下容易产生局部过热,影响激光器稳定性。为了解决热效应,各国学者提出了不同的增益介质结构设计,包括多层结构^[4]、同心圆柱结构^[5]、平面波导结构^[6],以及浓度掺杂结构^[7]等,均在不同程度上提高了增益介质的热管理性能。

3) 冷却系统,通常激光器都配有水冷系统,而为了提高增益介质的散热能力,还可以在固体介质表面镀钢膜等高热导率的膜。

综上,针对无法避免的热效应,不同结构的固体激光器均有相应的解决方案,并成功实现了高功率激光的输出,达到武器级别或准武器级别。

3 几种有效热管理的固体激光构型

固体激光器是研究最久、也是使用最多的激光器。经过五十几年的改进,目前已经能实现 100 kW 以上的高功率激光输出,达到军事武器级别。为了实现有效散热并提高热管理性,不同的激光器得到发展,包括薄片激光器^[8]、热容激光器^[9]、板条激光器^[10]和光纤激光器^[11]等。

3.1 薄片激光器

薄片激光器是一种新型结构的激光介质,它是将工作介质制备成很薄的圆片(直径几毫米,厚度为 100~200 μm),通过钢锡或者金锡焊料固定在水冷热沉上,以防薄片在抽运过程中发生形变,同时为了减小热沉的内应力,通常会采用热膨胀系数匹配的材料,如铜和钨。另外,薄片和热沉接触的底面作为激光和抽运光的高反射面,另一个面则作为高透射面。因为热流方向和激光传输方向基本一致,温度梯度带来的波前畸变将会大大减弱,从而可获得优异光束质量的激光输出。其工作原理如图 1 所示^[12]。

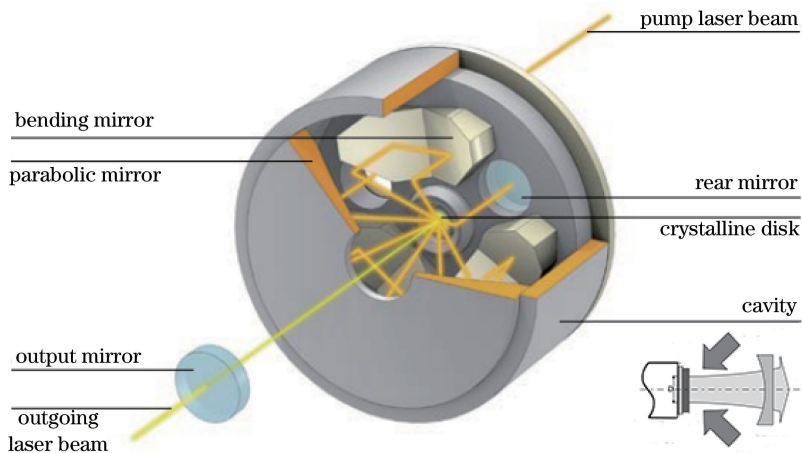


图 1 薄片激光器结构及原理图

Fig. 1 Structure and schematic diagram of thin disk laser

由于单块薄片增益能力有限,目前最高输出功率为 5 kW,为了实现更高能量的激光输出,通常采用多抽运模块或者多个薄片的结构设计^[8, 13],如图 2~5 所示。

在军事应用上,2010 年波音公司利用 10 块 Yb:YAG 薄片激光介质,在数秒的持续时间内,得到激光器的输出功率达到 28 kW,并且光束质量较好^[14]。在 2012 年该公司获得项目支持,研发输出功率为 34 kW、效率在 30% 以上的薄片激光器。

2013 年新加坡防卫科学机构(DSO)国家实验室的 Yb:YAG 薄片激光器仅由一块薄片、一个腔镜实现了功率为 1.1 kW、光束质量因子 M^2 小于 1.4、光-光效率为 40% 的激光输出^[15]。同年,德国斯图加特大学采

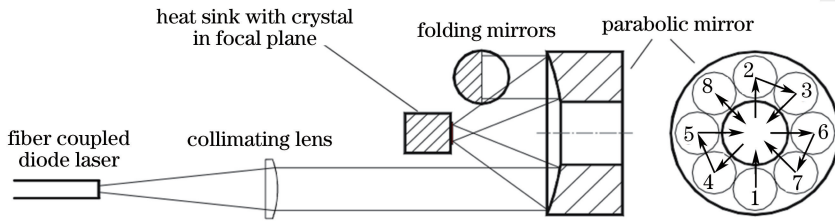


图2 薄片激光器16束抽运光路设计

Fig. 2 Optical design of thin disk laser with 16 pump beams

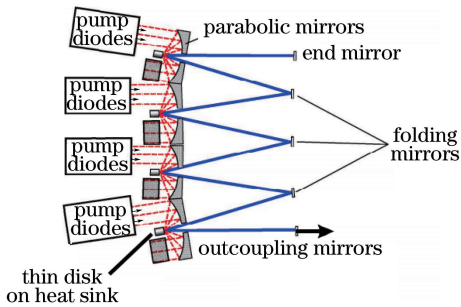


图3 Trumpf公司薄片激光器级联放大设计

Fig. 3 Cascaded amplification design of thin disk laser of Trumpf

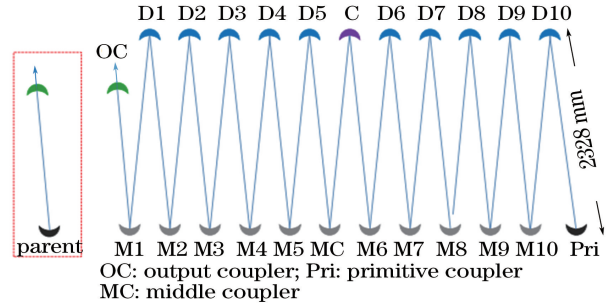


图4 波音公司薄片激光器结构图

(D1-D10为10块薄片激光器)

Fig. 4 Structure diagram of thin disk laser of Boeing (D1-D10 are 10 thin disk lasers)

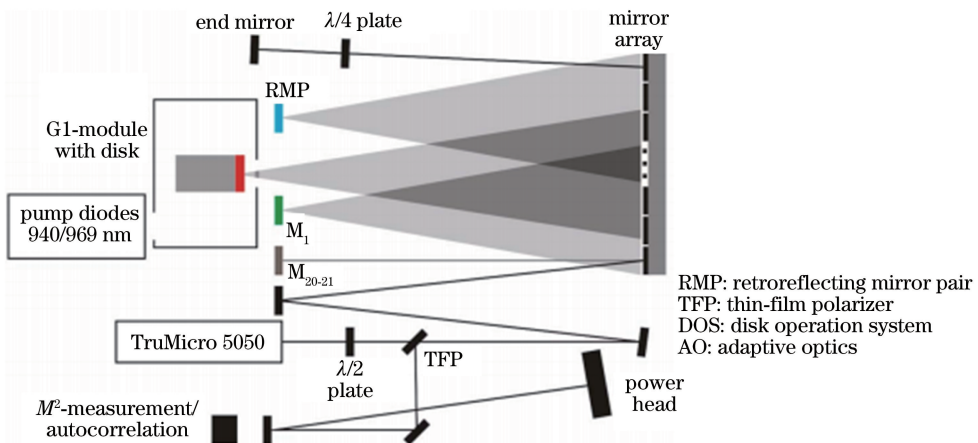


图5 斯图加特大学薄片激光器

Fig. 5 Thin disk laser of University of Stuttgart

用 Trumpf 公司的 TruMicro5050 薄片激光器,实现了 1.1 kW 激光输出^[16]。2015 年德国 Trumpf 公司利用 Yb 离子掺杂的薄片激光器获得了 220 mJ、1 kHz 脉冲激光输出,脉冲宽度为 1.9 ps^[17]。

薄片激光器也存在不可忽视的缺陷:1)在面抽运方式下,太薄的增益介质对抽运光的单程吸收能力很差;2)边缘效应、热应力以及抽运和散热的不均匀使光束质量严重退化;3)单块薄片的增益能力有限,100 kW 的输出功率需要很多块薄片进行级联放大。

薄片激光器的发展趋势:一方面是继续提高单块薄片的增益能力,可以从单块薄片的掺杂离子浓度、厚度、尺寸以及热管理能力上提高;另一方面是改进设计光路,利用多块薄片对激光进行级联放大。

3.2 热容激光器

热容激光器并不是激光器的一种结构设计,而是激光器的一种新型工作模式,最初是由美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)研究发展而来^[9]。其原理是将固体激光器的激光发射与介质冷却过程分离,工作时将废热储存在工作介质内,停止工作后再对介质进行强制冷却。这种激光器的优点在于介质的抽运

功率受介质断裂极限限制小,能有效避免工作过程中介质冷却不均匀的现象,而且由于在抽运过程中介质的表面温度高于内部温度,增益介质表面的应力表现为压力,而传统工作模式中激光增益介质表面的应力是张力,通常来说,增益介质能承受的压力是张力的5倍,由此显著提高了增益介质的破坏阈值,提升了抽运强度。由于热容激光器具有高效的热管理性能,LLNL一直致力于实现其高功率激光输出。图6为LLNL设计的热容激光器增益介质Nd:YAG陶瓷(10 cm×10 cm×2 cm)及Sm:YAG包边Nd:YAG陶瓷。图7为二极管抽运热容激光器的结构示意图。

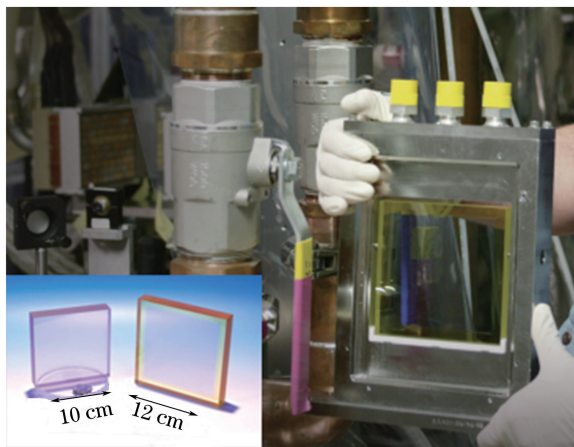


图6 LLNL设计的热容激光器增益介质Nd:YAG陶瓷(10 cm×10 cm×2 cm)及Sm:YAG包边Nd:YAG陶瓷
Fig. 6 Nd:YAG polycrystal (10 cm×10 cm×2 cm) and Nd:YAG polycrystal with Sm:YAG cladding
as gain materials for heat capacity laser by LLNL

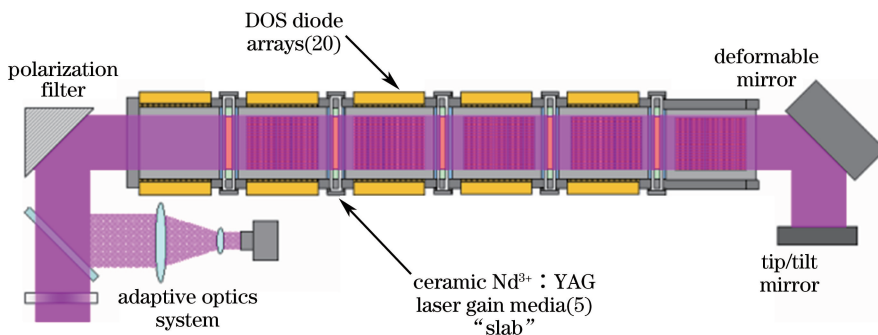


图7 二极管抽运热容激光器结构图

Fig. 7 Structure diagram of LD pumped heat capacity laser

早在1997年LLNL就开始了固体热容激光器的研制,先后采用了钕玻璃、掺钕钆石榴石(Nd:GGG)晶体和Nd:YAG陶瓷作为增益介质^[18]。2001年LLNL利用闪光灯抽运9块10 cm×10 cm的钕玻璃,实现了13.4 kW的激光输出。2006年1月LLNL通过抽运5块Nd:YAG陶瓷片,实现了平均功率67 kW的激光输出,相应的脉冲重复频率为200 Hz,单脉冲能量为335 J,其工作周期为20%,即一个周期内的20%时间是激光发射阶段,其余80%为介质冷却阶段。通常来说,热容激光器的激光持续时间在10 s以内。LLNL在之后的研究中将光束质量提高到2倍衍射极限,持续时间为5 s^[19-21]。

热容激光器的缺点为:1)激光的光束质量随出光时间的增加而迅速退化,不能满足实际需求;2)增益介质冷却过程短则几十秒,长则几分钟,相对只有10 s的工作时间难以符合实用要求。

热容激光器低效的工作循环限制了它的应用,难以满足实际需求,发展趋势渐缓。

3.3 板条激光器

单一的块体激光增益介质由于本身的放大自发辐射(ASE)效应以及热效应问题,并不能很好地满足实际应用需求。因此,复合结构固体激光器成为了解决这一难题的新方案。下面将通过三个代表性的复合结构进行阐述,包括板条水冷复合结构(Thinzag)、传导冷却端面抽运结构(CCEPS)以及平面波导结构(PWG)。

3.3.1 板条水冷复合结构

美国国防部高能激光联合技术办公室(HEL-JTO)于2002年9月开始了HPSSL计划^[14,22],该计划的目的是研制平均功率为100 kW的固体激光器,并于2013年前演示其作战能力。该计划的主要性能指标有:1)平均输出功率大于100 kW;2)电光效率大于19%;3)光束质量 $\beta=1.2 \times X_{DL}$, X_{DL} 为衍射极限;4)功率质量比为50 W/kg;5)运行时间为300 s;6)启动时间为1 s。达信公司凭借基于Nd:YAG板条设计的Thinzag结构获得合同。

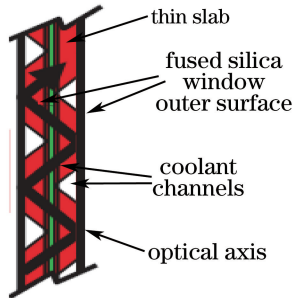


图8 达信公司Thinzag激光器结构

Fig. 8 Thinzag laser structure by Textron

如图8所示,Thinzag结构是将陶瓷Nd:YAG薄板条夹于两片熔石英窗口之间形成“三明治”结构,抽运光通过耦合导管、熔石英窗口抽运陶瓷Nd:YAG薄板条的两个大侧面。激光束在石英窗口外表面形成全内反射,限制在Thinzag结构中。在薄板条和熔石英间通入冷却液,以层流方式冷却板条。为了提升冷却效果,将板条两侧冷却液以相反的方向流动。由于激光需要穿过冷却液,如何避免冷却液对激光的吸收是一个难点。达信公司采用的方法是重水冷却,和普通水相比,重水的吸收光谱在 $1 \mu\text{m}$ 处显著减弱。Thinzag结构的优势在于利用全内反射实现激光光路“之”字形传输,结合独特的重水冷却系统能够实现光束质量更好、功率更高的激光输出。同时,在需要更高功率激光输出的场合,只要增加板条数量或者增加板条长度即可实现。

在2005年底,达信公司利用上述结构成功实现了输出功率为15 kW,持续工作时间为10 s的双板条陶瓷Nd:YAG激光器。随后串联15 kW的增益模块形成非稳腔结构实现了平均功率超过39 kW的激光输出。并于2010年2月18日,该公司对外宣布其承担的JHPSSL计划中的陶瓷板条激光器,通过串联6个17 kW的模块单口径实现了平均功率为100 kW的激光输出^[2,10]。据称,该板条激光器可装载到F-35联合攻击战斗机上,用于击落敌方的飞机和导弹,并摧毁地面目标。

Thinzag结构的核心在于其独特高效的冷却方式以及抽运方式,良好的热管理性能保证了100 kW的激光输出。由此可看出,除了在激光增益材料本身上投入精力,激光器结构设计也是不可忽视的环节。

3.3.2 传导冷却端面抽运结构

同样是JHPSSL项目的合同商,诺格公司采用激光主振荡功率放大器(MOPA)方案结合传导冷却端面抽运技术^[23],增益介质取Nd:YAG和YAG的复合结构,如图9和图10所示。其中单个板条模块实现4 kW激光输出,4个板条模块形成的单链路最高输出功率达15 kW,光束质量接近衍射极限。再将7个15 kW的MOPA链路相干合成,最终实现105.5 kW的激光输出,电光转换效率为19.3%,光束质量优于3倍衍射极限,连续工作时间超过300 s,且启动时间小于1 s。诺格公司的项目进展如表2所示^[22,24]。

表2 诺格公司JHPSSL项目进展

Table 2 JHPSSL progress of Northrop Grumman

| Time | Number of chains | Output power /kW | Beam quality / X_{DL} | Percentage of main lobe /% |
|-----------|------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|
| Sep.,2005 | 2 | 19 | 1.73 | 33 |
| Dec.,2007 | 1 | 15 | 1.58 | 40 |
| Jul.,2008 | 2 | 30 | 2.15 | 22 |
| Mar.,2009 | 7 | 105 | <3 | 11 |

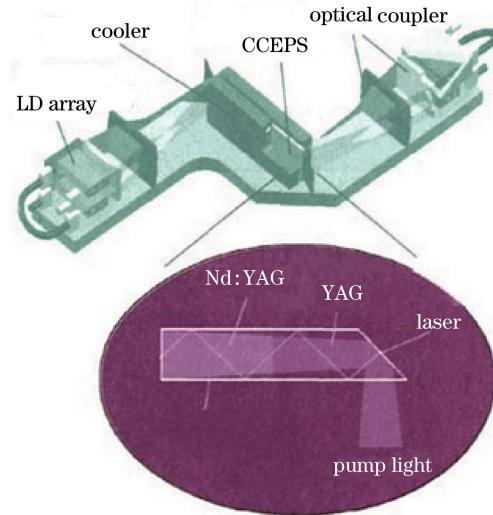


图 9 诺格公司 100 kW 激光器单链路图

Fig. 9 Single module in 100 kW laser by Northrop Grumman

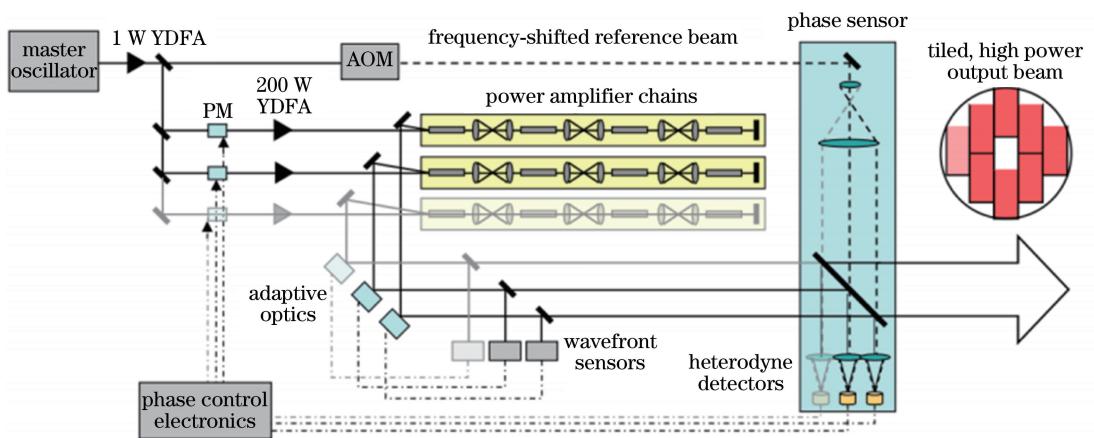


图 10 诺格公司 100 kW 激光器结构图

Fig. 10 Structure diagram of 100 kW laser by Northrop Grumman

由表 2 中可以看出,随着链路数的增加,合成光束主瓣内功率(第一衍射亮环直径内)在总功率中的比例降低,相干合成效果不理想。在海基激光(MDL)项目中,美国海军利用诺格公司研制的上述激光器实现舰载,并成功摧毁 1 mi (1 mi \approx 1.6093 km)外的小船的发动机。

诺格公司设计的亮点在于采用 YAG 和 Nd:YAG 复合结构作为增益介质,YAG 一方面作为热沉,另一方面作为抽运光缓冲区,缓解了端面热效应,提升了结构的热管理性能。但其结合面将是最薄弱的环节,在材料的制备过程中必须保证结合面的平整。

3.3.3 平面波导结构(PWG)

雷声公司作为全球第四大军工企业,在激光器领域同样取得了卓越的成就。它专注于平面波导激光器的研制,主导了其在军事上的测试以及应用。

平面波导通常包含三层或三层以上的复合结构,中间核层为增益层,其余为包层,抽运光耦合进入中间核层(通常为 50~200 μm),如图 11 所示。通过选择合适的材料制备核层和包层,使核层折射率高于包层折射率,这样当激光和抽运光在界面的入射角满足一定条件时,就可以通过全反射将其限制在二维波导结构中,获得更高的抽运效率和更优异的激光输出。另一方面,平面波导较大的纵横比提升了结构的热管理性能,通过侧面进行抽运,利用大面积散热,可以实现更高功率的激光输出^[25-29]。

在耐用电子激光倡议(RELI)项目中,雷声公司采用 Yb:YAG 作为波导增益层,结合平面波导以及

MOPA 方案设计,于 2014 年实现了单个波导 25 kW 的激光输出。雷声公司的 PWG 激光器示意图如图 12 所示^[3]。

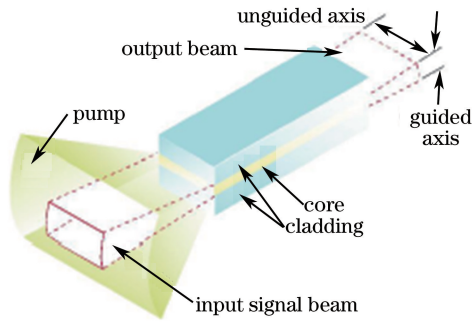


图 11 平面波导结构图

Fig. 11 Structure diagram of planar waveguide

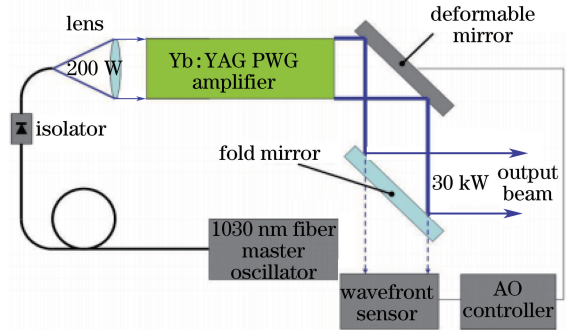


图 12 雷声公司 PWG 激光器示意图

Fig. 12 Schematic of PWG laser by Raytheon

由于 PWG 结构的自身优势,输出的激光光束质量比其他激光器好。雷声公司最终目标是实现主振荡器(MO)功率低于 1 kW 的同时,输出功率达到 200 kW。最近,雷声公司又申请了一项复合结构平面波导的专利^[30],中间增益层在抽运端面较薄,沿光路方向逐渐增厚。这种锥形结构的优势在于,通过降低抽运端面增益层厚度,减弱端面热效应,可以获得更加均匀的热分布。

平面波导激光器由于其自身结构的优势,在高功率激光器领域占据重要的地位。为了进一步提高其性能,主要研究数值孔径匹配、增益介质层厚度比例及激光模式的影响因素等。同时,平面波导作为一种多层结构,其制备工艺也将是研究方向之一。

3.4 光纤激光器

光纤激光器最早由 Snitzer^[31]在 1961 年提出,并于 3 年后实现^[11],前期主要应用于高速通信和数据传输。随着输出功率的提高,光纤激光器逐步进入激光武器领域。

相比传统激光器,光纤激光器具有低阈值、高效率、全固化和结构紧凑的优点,且其比表面积大,因此具有更好的热管理性能。为实现高功率激光输出,通常采用 MOPA 结构。美国的 IPG 公司一直主导着商用光纤激光器领域,目前已实现了 10 kW 单模激光输出,光束质量接近衍射极限,采用 Yb 掺杂内核,内核直径为 30 μm 。由于单根光纤的输出功率有限,为了实现更高功率的激光输出,一般将多个高功率光纤的输出进行合成,该合成从相干原理可分为相干合成和非相干合成。近几年,国内的各个科研机构相继实现了若干千瓦的激光输出:2015 年国防科学技术大学实现了 3.15 kW 全光纤单模激光输出^[32],2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所实现了 2.5 kW 近衍射极限激光输出^[33],中国工程物理研究院实现了 9.6 kW 多路窄线宽光纤激光输出^[34],2016 年国防科学技术大学采用 MOPA 结构实现了 4.1 kW 全光纤激光输出^[35]。

在激光武器应用上,光纤激光器颇受青睐。美国洛克希德马丁公司研制的 ADAM 区域激光武器由 10 kW 的光纤激光器组成,该系统安装在可移动的设备上,同时配备有可瞄准目标的红外线系统,可追踪 5 km 外的物体,激光范围在 2 km 内。2012 年 12 月 10 号,ADAM 成功摧毁一发从 1.6 km 外飞来的火箭弹,而这个过程仅仅用了 3 s。2014 年 5 月 ADAM 在加利福尼亚海岸击沉一艘 1.5 km 外的小船。另在 2015 年 3 月洛克希德马丁公司对基于 ADAM 激光武器系统改造的新型光纤激光武器 ATHENA 进行了实地测试,使用 30 kW 自主加速激光,在数秒内摧毁一辆卡车的引擎^[14,22],演示图如图 13 所示。

2013 年德国莱茵金属公司对其 30 kW 光纤激光武器进行演示,将 1 km 外的一枚 82 mm 炮击跑弹击毁,精确跟踪目标 6 s 后激光照射 4 s 将其摧毁。同时,还成功研发了装载在改进型 M113 履带式装甲输送车上的 5 kW 级系统,集成在“家犬”8×8 多用途装甲车上的 20 kW 级系统,以及安装在 Tatra 卡车上集成在符合 ISO 弹道保护标准 ICC 集装箱上的 50 kW 系统^[36]。

光纤细长的结构特点保证了足够的散热面积和优异的热管理性能,但光纤激光器的固有缺陷是内部较高的功率密度会导致受激布里渊散射(SBS),这将限制光纤激光器的输出功率。此外,光学非线性效应、光纤内部损伤以及掺杂不均匀性都是光纤激光器需要改进的地方。



图 13 ATHENA 激光武器演示

Fig. 13 Demonstration of ATHENA

4 结束语

高功率固体激光(千瓦级)因其巨大的定点打击能力成为各国争相研究的热点。不论是薄片激光器、热容激光器、板条激光器还是光纤激光器,都已经取得了阶段性的发展,输出功率从几千瓦提高到 100 kW,而且兆瓦级的输出也不再遥不可及。所有激光武器的发展方向除了实现更高功率外,还有以下几个特点。

1) 低成本:固体激光器的成本相较于传统武器来说,成本以及维护费用相当低廉。安装在美军“庞塞”号两栖运输舰上的 AN/SEQ-3 激光武器系统 LaWS 因为每次激光发射只需 59 美分而备受青睐。这正体现了未来激光武器的发展趋势,即廉价的发射成本,合理的维护费用,这使得激光武器的推广成为可能。

2) 结构紧凑:无论是机载、陆基还是舰载激光武器,紧凑的结构都能节约大量成本,并且使得武器系统更加灵活、便携。早期的机载激光武器(ABL)计划要求激光器系统平均 55 kg 能产生 1 kW 激光输出,而在之后的项目调整中减小到每 2~5 kg 即可产生 1 kW 激光输出。因此减小激光武器系统的体积和重量至关重要。

3) 无人机:在寻求机载、陆基和舰载激光武器发展的同时,美军将视线聚焦到无人机上。高空无人机可以在高于普通客机的高度飞行。美军在 2013 年就开始研究将 ABL 项目中的成果应用在高空无人机上,相关报道显示在 2015 年美国导弹防御局(MDA)已经着手将高能激光武器装载在无人机上。

4) 热管理性能:热管理性能作为所有激光器必须面对的基础问题,在高功率激光器的应用上更是至关重要。无论是薄片激光器、热容激光器、板条激光器还是光纤激光器,针对热管理性能都采用了不同的创新解决方案,比如增大散热面(薄片激光器、PWG 以及光纤)、新型冷却系统(Thinzag 以及 CCEPS)和改变工作模式(热容激光器)。而从目前分析,工作模式的优化难以满足实际应用需求,因此未来更多的热管理性能解决方案更多的将集中在结构上的优化和创新。

面向以上发展需求,除了传统的薄片和光纤激光器,复合结构激光器正成为越来越重要的角色。无论是达信公司的 Thinzag 结构、诺格公司的 CCEPS 结构还是雷声公司的 PWG,在结构设计上远远领先于传统激光材料并表现出非常优异的激光性能。同时,灵活的结构设计使得它能满足不同的实际应用需求。因此,复合结构激光器必将成为未来发展的一个大趋势。

参 考 文 献

- [1] Liu Xiaoming, Ge Yuetao. Analysis of development of high energy laser weapon[J]. Tactical Missile Technology, 2014 (1): 5-9.
刘晓明, 葛悦涛. 高能激光武器的发展分析[J]. 战术导弹技术, 2014(1): 5-9.
- [2] Lei Xiaoli, Sun Ling, Liu Yang, *et al.* Laser with 100 kW output power developed by the Textron company[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 948-952.
雷小丽, 孙玲, 刘洋, 等. 达信公司百千瓦陶瓷激光器技术综述[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 948-952.
- [3] Filgas D, Clatterbuck T, Cashen M, *et al.* Recent results for the Raytheon RELI program[C]. SPIE, 2012, 8381: 83810W.
- [4] Yang K, Ba X, Li J, *et al.* Multilayer YAG/Yb:YAG composite ceramic laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in

- Quantum Electronics, 2015, 21(1): 1602705.
- [5] Ikesue A, Aung Y L. Synthesis and performance of advanced ceramic lasers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(6): 1936-1944.
- [6] Beecher S J, Parsonage T L, Mackenzie J I, *et al.* Diode-end-pumped 1.2 W Yb:Y₂O₃ planar waveguide laser[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 22056-22061.
- [7] Li J, Wu Y, Pan Y, *et al.* Laminar-structured YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics for solid-state lasers[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2008, 5(4): 360-364.
- [8] Giesen A. Thin-disk solid state lasers[C]. SPIE, 2004, 5620: 112-127.
- [9] La Fortune K N, Hurd R L, Johansson E M, *et al.* Intracavity adaptive correction of a 10 kW, solid-state, heat-capacity laser[C]. SPIE, 2004, 5333: 53-61.
- [10] Mandl A E, Klimek D E, Hayes R. Zig-zag laser with improved liquid cooling: US7433376[P/OL]. (2008-10-07) [2016-07-15]. <http://www.google.com/patents/US7433376>.
- [11] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. Applied Optics, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [12] Giesen A, Hügel H, Voss A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 365-372.
- [13] Giesen A, Speiser A. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- [14] Kalisky Y Y, Kalisky O. The status of high-power lasers and their applications in the battlefield[J]. Optical Engineering, 2010, 49(9): 091003.
- [15] Yuan H P, Lim Y X, Cheng J, *et al.* Near fundamental mode 1.1 kW Yb:YAG thin-disk laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1709-1711.
- [16] Negel J P, Voss A, Ahmed M A, *et al.* 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5442-5445.
- [17] Klingebiel S, Schultze M, Teisset C Y, *et al.* 220 mJ ultrafast thin-disk regenerative amplifier[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations, 2015, STu4O: STu4O.2.
- [18] Albrecht G, George E V, Krupke W F, *et al.* High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime: US5526372[P/OL]. (1996-06-11)[2016-07-15]. <http://www.google.com/patents/US5526372>.
- [19] Yamamoto R M, Parker J M, Allen K L, *et al.* Evolution of a solid state laser[C]. SPIE, 2007, 6552: 655205.
- [20] Hecht J. Photonic frontiers: laser weapons-pumping up the power[J]. Laser Focus World, 2007, 43(5): 18-21.
- [21] Yamamoto B M, Bhachu B S, Cutter K P, *et al.* The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid-state laser[C]. Proceedings of the Advanced Solid-State Photonics, 2008, WC: WC5.
- [22] Liu Ming. Development of the laser weapon technology abroad[J]. Ship Electronic Engineering, 2011(4): 18-23.
刘 铭. 国外激光武器技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2011(4): 18-23.
- [23] Feng Hanliang, Liu Yansheng, Han Feng, *et al.* Progress on development of US naval shipborne laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020004.
冯寒亮, 刘彦升, 韩 锋, 等. 美国海军舰载激光武器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020004.
- [24] Carroll D L. Overview of high energy lasers: past, present, and future? [C]. Proceedings of the 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2011: 3102.
- [25] Mackenzie J I. Dielectric solid-state planar waveguide lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 626-637.
- [26] Liu Jiao, Wang Juntao, Zhou Tangjian, *et al.* Analysis and developments of high-power planar waveguide lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 061015.
刘 娇, 王君涛, 周唐建, 等. 高功率平面波导激光器研究进展及分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061015.
- [27] Mackenzie J I, Shepherd D P. End-pumped, passively Q-switched Yb:YAG double-clad waveguide laser[J]. Optics Letters, 2002, 27(24): 2161-2163.
- [28] Shepherd D P, Bonner C L, Brown C T A, *et al.* High-numerical-aperture, contact-bonded, planar waveguides for diode-bar-pumped lasers[J]. Optics Communications, 1999, 160(1-3): 47-50.
- [29] Shepherd D P, Hettrick S J, Li C, *et al.* High-power planar dielectric waveguide lasers[J]. Journal of Physics D:

- Applied Physics, 2001, 34(16): 2420-2432.
- [30] Filgas D. Asymmetric PWG with asymmetric cooling: US20160047982 [P]. (2016-02-18) [2016-07-15]. <http://google.com/patents/US20160047982>.
- [31] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(1): 36-39.
- [32] 王小林, 张汉伟, 于海龙, 等. 3.15 kW 全光纤单模激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219003.
- [33] 杨依枫, 沈 辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0419004.
- [34] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjiang, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0901009.
马 毅, 颜 宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901009.
- [35] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, *et al.* Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502002.
王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.
- [36] 席淑楨, 毕忠安, 郑 葆, 等. 莱茵金属公司高能激光器新进展[J]. 国外坦克, 2014(8): 47-50.