



·激光的热和力学效应·

二极管泵浦高能激光研究进展和展望*

尚建力^{1,3}, 王君涛^{1,3}, 彭万敬^{1,3}, 刘航^{1,3,4}, 汪丹^{1,3}, 马毅^{1,3}, 付博²,
于益^{1,3}, 冯昱骏^{1,3}, 张黎², 阮旭^{1,3}, 靳全伟^{1,3}, 易家玉^{1,3},
叶先林^{1,3,4}, 孙殷宏^{1,3}, 王伟平², 高清松^{1,3}

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900;
3. 中国工程物理研究院高能激光重点实验室, 四川绵阳 621900; 4. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

摘要: 高能激光广泛应用于材料加工、科学研究、空间碎片清除、军事应用等领域。二极管泵浦高能激光具有结构紧凑, 系统简单、全电驱无限弹仓的特点, 近年来, 各类二极管泵浦高能激光围绕着同时实现高功率、高效率、高光束质量这一总目标发展迅速。详细综述了国内外高平均功率块状固体激光、高功率可见光波段激光、高峰值功率激光、高功率光纤激光、碱金属蒸气激光等二极管泵浦高能激光的研究进展, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 二极管泵浦高能激光; 高平均功率块状固体激光器; 高平均功率光纤激光器; 碱金属蒸气激光器; 高功率绿光激光器; 高峰值功率脉冲激光器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210530

Research progress and prospects of laser diode pumped high-energy laser

Shang Jianli^{1,3}, Wang Juntao^{1,3}, Peng Wanjing^{1,3}, Liu Hang^{1,3,4}, Wang Dan^{1,3}, Ma Yi^{1,3}, Fu Bo²,
Yu Yi^{1,3}, Feng Yujun^{1,3}, Zhang Li², Ruan Xu^{1,3}, Jin Quanwei^{1,3}, Yi Jiayu^{1,3},
Ye Xianlin^{1,3,4}, Sun Yinhong^{1,3}, Wang Weiping², Gao Qingsong^{1,3}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China;

4. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: High-energy lasers are widely used in materials processing, scientific research, space debris removal, and military counter measures. In recent years, various types of diode-pumped high-energy lasers with high power, high efficiency, and high beam quality have been rapidly developed due to their compact structure, simple system, full electric drive, and unlimited magazines. In this review, we describe in detail the research progress of high-average power bulk solid-state lasers, high-power visible light lasers, high-peak power lasers, high-power fiber lasers, alkali metal vapor lasers and other diode-pumped high-energy lasers at home and abroad. Moreover, we conclude with some perspectives and outlook on their future developments.

Key words: diode-pumped high-energy lasers; high-average power bulk solid-state lasers; high-average power fiber lasers; alkali metal vapor lasers; high-power green laser; high-peak power lasers

高能激光广泛应用于材料加工、科学研究、军事应用等领域。现有研究主要集中在通过提升激光器功率、光束质量提升材料加工和目标毁伤效率; 提升短脉冲能量, 利用巨脉冲实现空间碎片高效清除; 开展频率变换, 利用短波长实现材料的高效吸收; 获得超短脉冲超高峰值功率实现硬脆材料的高端精密加工等方面。这些应用的实现机理均是利用激光与物质相互作用中的各种力-热效应, 影响上述应用效果的因素主要即源自不同参数(体制、波长、功率/能量密度)激光与物质相互作用中力热效应的差异。具体的, 这一效应特征涉及激光波长范围从红外到真空紫外波段, 时间结构包括连续、重复频率和脉冲(准连续及单脉冲), 作用时间从亚 ns 至数 h, 靶

* 收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-12-31
联系方式: 尚建力, shangjianli@outlook.com。

面上激光功率密度的范围为 $10^{-6} \sim 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 。不同功率密度的激光辐照靶体,会引起加热、熔融、升华和电离等不同的热致效应,以及热应力与热冲击等静、动力学效应。一般来说,较低功率密度 (10^4 W/cm^2 以下)的激光会引起靶材局部加热、热应力乃至熔融等热效应和热力耦合效应;中等功率密度 ($10^4 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$)的激光辐照下,靶材以熔融、烧蚀、气化等相变行为及其诱导的力学效应为主;激光功率密度在 10^7 W/cm^2 以上,会诱导靶材生成等离子体并引起高幅值冲击波,激光辐照主要表现为冲击效应,在靶材很薄的区域中可能发生层裂形式的动力学破坏^[1-2]。因此,研制不同波长、不同体制激光以实现不同的激光与物质相互作用的力热效应,对于高能激光各种应用发展具有重要意义。

二极管泵浦高能激光具备系统简单、结构紧凑、维护方便、全电驱无限弹仓的同时,具备同时实现高功率、高效率、高光束质量(简称“三高”)的潜力。在相关科学研究的带动以及相关应用实用化需求牵引下,二极管泵浦高能激光的发展始终围绕着这一“三高”目标开展。近年来,基于不同构型、不同体制的二极管泵浦高能激光技术研究取得快速发展,各类激光器性能水平得到了较大提升,也较大地促进了高能激光在材料加工、空间碎片清除、科学研究、安保、国防等领域的应用研究。本文重点介绍了近年来国内外高平均功率块状固体激光、高平均功率光纤激光、高功率可见光波段激光、高峰值功率激光、碱金属蒸气激光等二极管泵浦高能激光的研究进展,并对其发展趋势进行了展望。

1 二极管泵浦的高平均功率块状固体激光

1.1 板条激光

板条激光器采用片状结构增益介质,激光激射在增益介质长度方向,而散热在增益介质厚度方向,由此实现高功率、高能量连续或脉冲激光输出,光束质量优良。2009年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司发布了7路传导冷却端面泵浦板条(CCEPS)相干合成激光输出的实验结果(系统如图1所示):输出功率为105.5 kW,光束质量BQ因子小于 $3^{[3-4]}$ 。这一实验成为高亮度固体激光器发展的里程碑。面向高功率激光输出的板条激光包括大面泵浦和端面泵浦两种构型,国内多家研究单位两种均先后基于Nd:YAG和Yb:YAG材料实现了10 kW级到数十kW级的单孔径激光输出。

2014年中国科学院理化研究所采用LD大面泵浦双面水冷板条结构(如图2所示),板条材质为Nd:YAG,在泵浦激光平均功率9.98 kW、重复频率400 Hz、脉宽200 μs 下,通过稳腔获得输出平均功率4.3 kW,光光效率43.6%^[5]。2019年,中国科学院理化研究所采用Yb:YAG板条作为增益介质,采用大面泵浦低温冷却方式,获得平均功率60 kW,数百 μs 脉宽的QCW激光输出^[6]。

大面泵浦板条激光器泵浦面面积大,可耦合的泵浦能量高,已实现数十kW激光输出,但由于大面泵浦方式中泵浦面和冷却面重合,因此需要采用全透明的非焊接液体直接冷却。另外因泵浦面积大,功率密度较低,吸收长度短,常温下如果板条增益介质采用Yb:YAG等准三能级材料则需要提高掺杂浓度来提高吸收效率,然而高掺杂浓度使得透明阈值相应提高,无法实现高功率输出。而采用低温冷却技术路线虽然提升了Yb材料吸收,并实现四能级高效率运转,但给工程应用带来难以解决的技术困难。

端面泵浦的板条激光构型如图3所示。增益介质直接与铜冷却器焊接,热传导系数大幅提升,加快了散热速度,泵浦光经过整形匀化后从端面注入在材料内长程传输吸收。

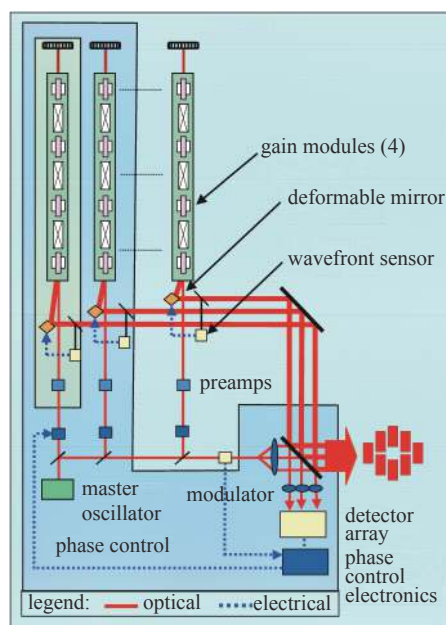


Fig. 1 Schematic diagram of 105 kW laser of Northrop Grumman

图1 美国诺斯罗普·格鲁曼公司105 kW激光光路示意图

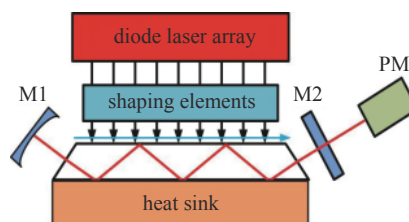


Fig. 2 Schematic diagram of the composite cooling large surface pump slats of TIPC-CAS

图2 中国科学院理化研究所板条大面泵浦复合冷却结构示意图

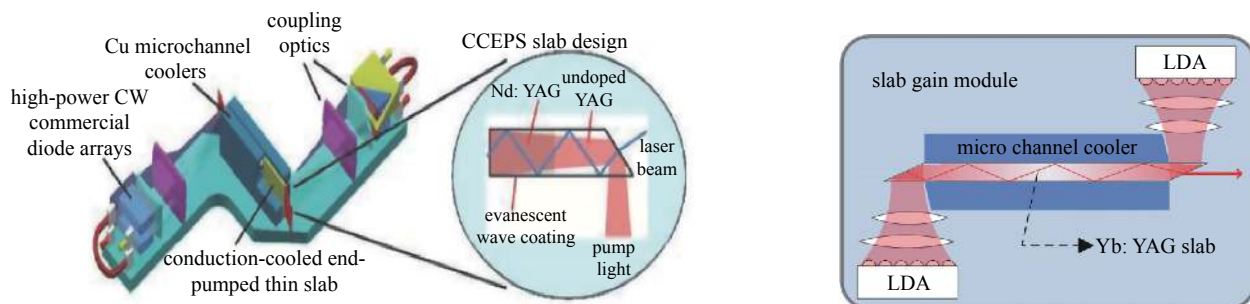


Fig. 3 Schematic diagram of end-pumped slab laser with conduction cooling structure

图3 传导冷却端面泵浦板条激光示意图

在诺斯罗普格鲁曼公司板条激光率先实现单链路 10 kW 以上输出后,国内相关单位也陆续报道了使用端泵浦板条结构获得高平均功率激光输出的结果。2010 年,华北光电技术研究所采用 2.5 W 基模种子源经整形后先后经过预放、4 个功率放大模块和光束净化后获得功率为 11 kW,光束质量为 4.8 的激光输出^[7]。2011 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所报道了一套采用 4 个端泵浦 Nd 板条激光增益模块串接 MOPA 放大的激光器(如图 4 所示),实现输出功率为 11.3 kW,光束质量为 7.56 倍衍射极限^[8]。

因端泵浦板条结构能有效减小泵浦口径,实现高亮度泵浦,较为适合准三能级 Yb 介质激光输出。端泵浦板条的泵浦面一般不到 2 cm²,随着单个 Bar 条输出功率提升到 200 W,通过优化耦合系统,可较为容易实现板条的泵浦亮度 50 kW/cm² 以上,因此理论上采用 940 nm 泵浦 Yb:YAG 材料可以获得较高的输出功率和斜效率。2017 年,中国工程物理研究院李密等在优化板条增益模块和放大链路的基础上实现单个板条 7 kW 连续激光输出^[9]。2018 年,中国工程物理研究院徐浏等通过优化设计泵浦耦合系统,在 Yb 增益介质边缘采用精细化处理技术,在提升板条负载能力的同时降低了宽度方向上的波前畸变。实现连续激光功率 11.9 kW、光束质量 β 优于 9.1 的激光输出。利用主动光学校正系统,光束质量提升至 $\beta=2.8$,但激光器光光效率仅为 23%,单模块效率为 25%^[10]。同年中国工程物理研究院汪丹等通过非球面泵浦耦合技术,进一步优化增益介质表面处理技术,降低激光链路的像差和损耗,大幅增加泵浦亮度和 Yb 板条的负载能力,实现功率大于 22 kW、全链路光光效率优于 30% 的高质量激光输出(β 优于 3.3),光光效率从 25% 提升至 36%^[11]。

随着 Yb 板条输出功率增加,端面泵浦板条构型缺陷正逐渐显现,限制了单模块功率、效率进一步增加。(1)因端面泵浦结构增益介质耦合区域较小,需采用较为复杂的耦合系统对泵浦光进行较大比例的压缩,泵浦耦合效率不高,限制了泵浦功率总量提升。(2)斜面反射的耦合方式使得板条端头不能有效冷却,端头热效应与损伤阈值限制了泵浦功率的提升。(3)为提升输出功率,扩大板条增益介质尺寸,板条内部的荧光强度因增益路径更长而非线性增加,增益介质边缘和各个界面的荧光吸收产热导致的波前畸变,不断恶化输出光束质量。

随着 Yb 板条输出功率增加,端面泵浦板条构型缺陷正逐渐显现,限制了单模块功率、效率进一步增加。(1)因端面泵浦结构增益介质耦合区域较小,需采用较为复杂的耦合系统对泵浦光进行较大比例的压缩,泵浦耦合效率不高,限制了泵浦功率总量提升。(2)斜面反射的耦合方式使得板条端头不能有效冷却,端头热效应与损伤阈值限制了泵浦功率的提升。(3)为提升输出功率,扩大板条增益介质尺寸,板条内部的荧光强度因增益路径更长而非线性增加,增益介质边缘和各个界面的荧光吸收产热导致的波前畸变,不断恶化输出光束质量。

1.2 平面波导激光

平面波导激光结合了板条激光和光纤激光的优势,采用 YAG-Re:YAG-YAG 三明治键合结构激光增益介质(如图 5 所示),是增益光纤和板条激光增益介质的中间状态。宽度方向上为数十 mm 级常规尺寸自由空间,厚度方向上为波导结构。波导结构的芯层为掺杂区,包层为折射率较低的非掺杂区域。平面波导结构激光增益介质只产生一维的热流方向和热梯度,可以更有效地抑制热效应。

2008 年,美国 Raytheon 公司采用 Yb:YAG 双包层平面波导作为增益介质导实现了功率为 16.1 kW 的激光输出,电光效率 20%,引起了国际上的广泛关注^[12]。在 RELI 计划的支持下,2014 年, Raytheon 开展了单个平面波导放大器上输出 30 kW 激光的研究^[13]。采用 200 W 的光纤激光器作为种子源,希望通过平面波导获得 30 kW 的激光输

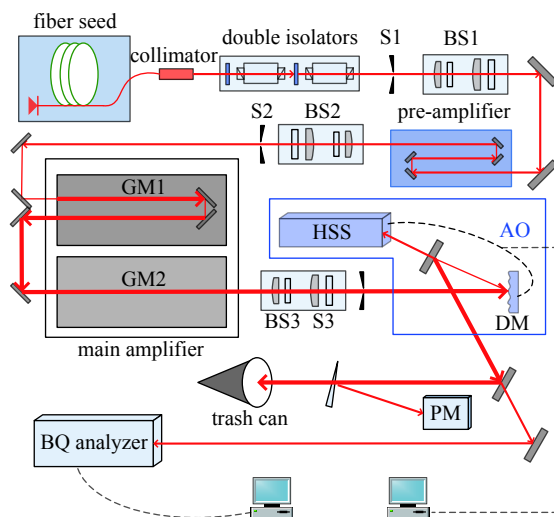


Fig. 4 Schematic diagram of end-pumped YAG slab laser with MOPA structure of CAEP

图4 中国工程物理研究院端面泵浦 Yb:YAG 板条 MOPA 激光器光路示意图

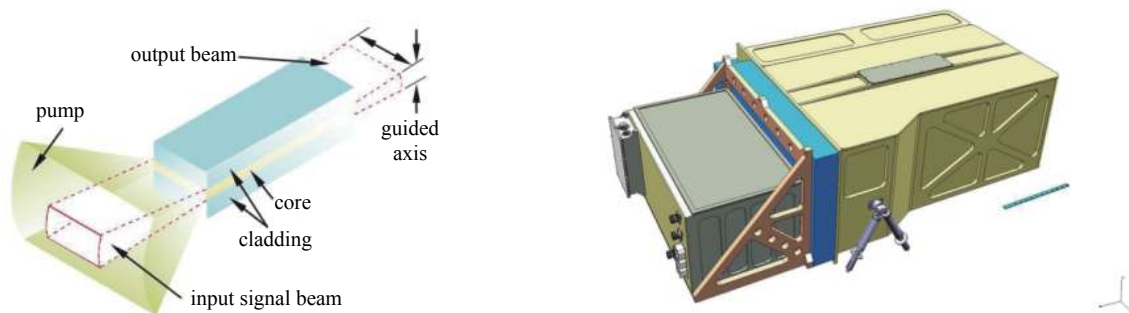


Fig. 5 30 kW laser design concept of Raytheon

图5 平面波导介质示意与美国雷神公司30 kW平面波导激光设计

出,并且通过自适应光学提高其光束质量。Raytheon给出了30 kW激光器概念设计如图5所示,预计其体积小于 0.4 m^3 ,重量小于200 kg,功率体积比为 75 kW/m^3 ,功率重量比为 150 W/kg ,明显优于目前的其他所有介质构型的激光器。

2017年,中国工程物理研究院应用电子学研究所采用MOPA结构和端面抽运Nd:YAG平面波导方式,获得了最高功率1.5 kW的连续激光放大输出,光光效率达到49%;2019年,采用MOPA结构和端面抽运Yb:YAG平面波导方式,获得了最高功率12 kW的连续激光放大输出,电光效率达到30%;2021年,完成了10 kW平面波导激光样机,如图6所示,光束质量 $\beta < 3$,电光效率大于30%,功率质量比达到 107 W/kg ,功率体积比 82 kW/m^3 。通过增大材料尺寸和泵浦功率,在单块材料上实现更高功率输出,功率质量比和功率体积比将会进一步大幅提升。

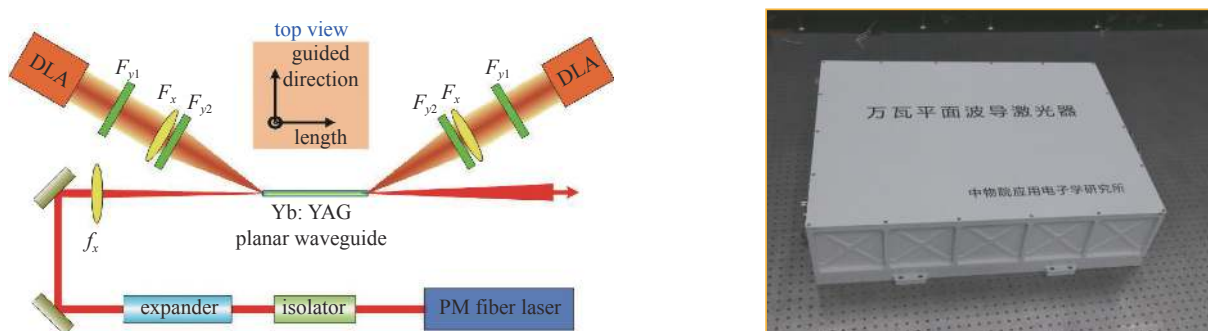


Fig. 6 10 kW planar waveguide laser of CAEP

图6 中国工程物理研究院10 kW级平面波导激光器

1.3 薄片激光

薄片激光器的增益介质为片状结构,通常其厚度为亚mm级,热流方向和激光传输方向平行,且散热路径短、通光孔径大,可实现高功率、高能量的连续或脉冲激光输出。其利用既有空间折叠-成像的多通泵浦机构,实现厚度方向上的高效泵浦吸收,这种泵浦方法最早由德国斯图加特大学Giesen团队提出,很快由德国通快等公司应用形成了最高数十kW的工业用高功率薄片激光器^[14]。2012年,美国波音公司基于该技术,串接多个碟片构成谐振器获得了功率为30 kW的激光输出,电光效率大于30%;主要技术指标达到了耐用电子激光器倡议(RELI)第一阶段要求,如图7所示,后续开展50~100 kW激光器系统研制^[15]。但在单孔谐振腔中,多个反射型薄片引入的波前畸变会导致难于校正的像差叠加和演化,更高功率水平激光器光束质量难于控制。

1.4 直接液冷浸入式激光

浸入式激光技术架构上采用了直接冷却片状介质构型和分布式增益设计;在模块的功率定标放大中采用了“透射式串联”方式,使薄片介质无需焊接在热沉上,不会引入焊接形变;采用侧面泵浦实现泵浦、激光、流场的正交分布,进一步减少了激光器体积的同时保证了系统的功率定标放大能力。

2003年,美国国防部国防高级研究计划局(DARPA)计划资助“高能液体激光区域防御系统”(HELLADS),旨在利用紧凑型激光器发展机载战术自防御系统。在HELLADS支持下,达信公司和通用原子公司研制的高能激光器就采用了直接液体冷却的方式^[16]。如图8所示,达信公司采用稀土掺杂陶瓷板条的Thin-Zag方式,板条浸泡于流动的冷却液中,单口径实现了100 kW的激光输出,但由于湍流体扰动和热不稳定性的影响,未能有效实现像差补偿而导致光束质量较差^[17]。2015年,通用原子公司研制的直接液冷固体激光器,将数百片增益介质以阵列式的堆

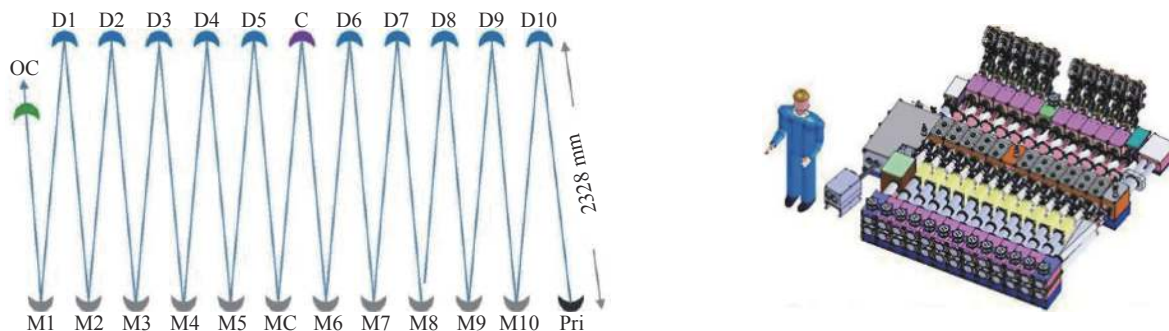


Fig. 7 Packaging evolution from the laboratory demonstration unit, to the optimized 100 kW head

图7 美国波音公司10薄片非稳腔激光器

叠方式浸泡于特种激光冷却液中(如图9所示),采用大模体积非稳腔方式输出了150 kW,其技术方案结合了固体激光器的高储能密度和液体激光器的流动热管理技术。相较于其他激光光源,通用原子的浸入式激光器功率体积比、功率重量比都具有十分明显的优势(见表1)。2021年11月,美国陆军与通用原子公司、波音公司签订了300 kW直接液冷激光武器系统的研制合同。拟采用两个第7代分布式增益模块,将输出功率由100 kW定标放大至300 kW激光,实现免合成、光束质量与光纤激光媲美、更紧凑的高能激光方案^[18]。

在国内,中国科学院西安光学精密机械研究所曾于2014年报道了其使用CCl₄冷却Nd:YAG薄片的浸入式固体激光器实验结果,获得了653 mJ的单脉冲输出,光光效率为30%^[19]。清华大学在分析了层流和湍流对激光器输

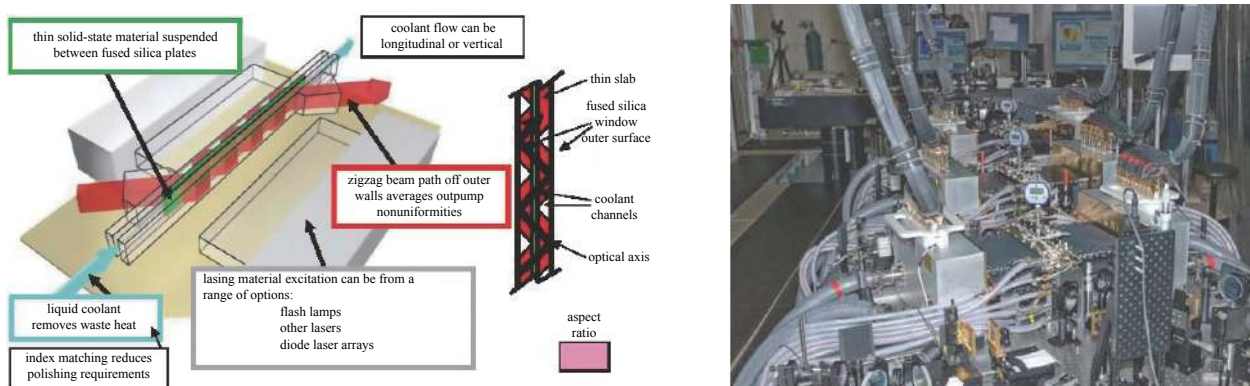


Fig. 8 Direct liquid-cooled ThinZag laser of Textron

图8 美国达信公司ThinZag直接液冷激光器



Fig. 9 Direct liquid-cooled thin-disk array laser of General Atomics

图9 美国通用原子公司直接液冷薄片阵列激光器

表1 通用原子浸入式直接液冷激光光源的功率、体积、重量等参数对比

Table 1 Comparison of parameters about direct liquid cooling laser

generation	power/kW	weight power ratio / (W·kg ⁻¹)	volume power ratio/(kW·m ⁻³)
first	150(synthesis)	200	50
second	100(single)	285	100
third	75(single)	250	280
fourth	122(single)	333	356

出功率和光束质量的影响基础上,采用重水直接冷却端泵多板条增益介质,实现了 3006 W 激光输出^[20];同时分析了该方式实现 30 kW 的可能性,但评估其光束质量只是水平方向的 M^2 为 50 和垂直水平方向的 M^2 为 10^[21]。中国工程物理研究院团队于 2016 年采用折射率匹配液作为冷却液直接冷却 Nd:YLF 增益介质,采用连续工作模式,实现了稳腔单模块输出功率大于 1 kW^[22];2016 年,采用重水冷却液,以 20 片 Nd:YAG 薄片作为增益介质,实现了稳腔大于 7 kW 的激光输出^[23];2018 年,基于重水冷却液方案,采用 40 片增益介质,实现了非稳腔双模块大于 9 kW 激光输出^[24]。

1.5 小结

目前,板条激光器、浸入式液冷激光器等技术路线均实现了 100 kW 级激光输出,数十 kW 级的平面波导激光在小型轻量化方面更具优势。但这些方案或者分立元件多、或者需要工作于低温环境、或者增益模块热、力、流、光强耦合系统复杂、或者增益介质制备困难。且目前 100 kW 级功率水平距离高效应用需求仍有差距,往往需要采用合成等方式实现功率提升,这进一步提升了系统的复杂性。

针对这一问题,国内外多家研究机构着力于更大尺寸的复杂构型增益介质制备、块状固体激光器构型创新、高功率密度泵浦光场分布控制技术、高热流密度传导冷却技术和波前调控技术的研究。这些研究虽然使得该型激光器技术指标能有进一步提升。但基于低导热率 YAG 基块状材料的热问题决定的效率问题(因泵浦光、信号光亮度不足)、波前畸变问题和单孔径功率受限问题,以及这类激光器复杂的工程化问题,都为其形成装备提出严峻的挑战。

2 高平均功率光纤激光

2.1 高功率宽谱光纤激光器

高功率光纤激光器采用双包层的大模场掺镱光纤作为增益介质,具有亮度高、效率高、结构紧凑等优点。同时光纤本身表面体积比大,散热性能优,极大地改善激光器的稳定性和降低散热系统的复杂性,十分适合于先进制造、能源勘探、国家安全等领域的应用。自 2004 年,英国南安普顿大学首次报道了 1.36 kW 的单模连续激光的输出^[25]。美国 IPG 公司先后于在 2009 年和 2013 年报道了单光纤单模 9.6 kW 和 20 kW 的光纤激光输出^[26-27]。国内单高功率光纤激光器的研究也进展十分迅速。2019 年,中国科学院上海光学精密机械研究所基于 Al-P-Si 三元光纤材料组分减小了镱离子的团簇效应,拉制出光暗化抑制和高发光效率的增益光纤,并采用自研光纤器件搭建了全光纤激光实验平台,获得 10.14 kW 的光纤激光输出^[28],实验结构图如图 10 所示。2021 年中国工程物理研究院化工材料研究所高功率光纤激光技术所地联合创新中心团队成功制备了“富磷少铝”抗光子暗化 LMA-48/400-YDF 激光光纤,清华大学光纤激光系统集成测试突破单纤 20 kW 功率^[29]。

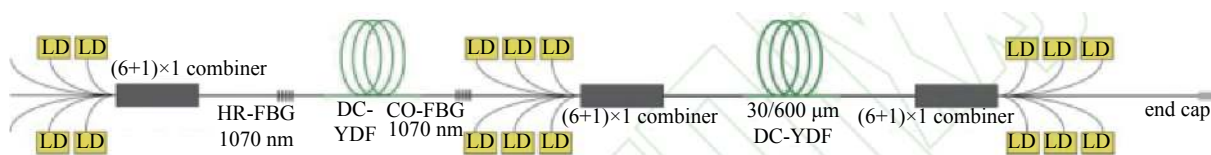


Fig. 10 Diagram of experimental setup of laser system of SIOM of CAS

图 10 中国科学院单纤 10.14 kW 激光输出实验结构图^[28]

不过,单纤功率的进一步提升受到 SRS 效应,模式不稳定,以及光纤热应力、热损伤效应的限制。在不考虑模式不稳定效应的情况下,美国利弗莫尔国家实验室^[30]和德国耶拿大学^[31]分别在半导体激光泵浦和级联泵浦的情况下做了模拟计算,结果显示,掺镱光纤激光器单纤所能达到的极限输出功率分别为 36.6 kW 和 70 kW,光纤激光器单纤存在输出理论上的阈值。

2.2 高功率窄线宽保偏单纤激光器

由于光纤激光器单纤功率提升技术面临非线性、模式不稳定等多方面的瓶颈,为实现更高功率,更高光束质量的激光输出,多纤功率合成是目前公认的最具可实现性和有效性的手段之一。现有的多纤功率合成的主流方案为相干合成和光谱合成^[32-34]。一方面,无论是光谱合成系统的高光谱功率密度要求,还是相干合成应用的高相干性要求,都需要高功率单纤激光的线宽尽可能窄。此时受激布里渊散射(SBS)效应^[35]的局限性随着单纤功率的提升愈发明显,综合考虑到多纤功率合成系统复杂程度、稳定性、合成效率等因素的影响,其输出线宽也不需要严格单频,线宽容忍度可达几十到百 GHz 量级^[36-40]。另一方面,保偏单纤激光器具有很高的线偏振度,不仅保证了相干

合成对子束相干性要求,也降低了光谱合成对合成器件的工艺要求,更适合作为合成子束。因而,高功率窄线宽保偏单纤激光作为一种特殊的高功率光纤激光器,是追求更高功率优质合成光纤激光的关键,近几年越来越被人们所重视。

2016年,美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室采用PRBS相位调制方法展宽单频种子源,基于自主研发的镀金高掺杂大模场掺镱光纤和双向泵浦的空间耦合结构,采用偏振控制技术实现功率3.1 kW、线宽12 GHz的线偏振激光输出,偏振消光比为10 dB,中心波长为1066 nm,光束质量因子 $M^2 < 1.15$,实验结构如图11所示^[41]。

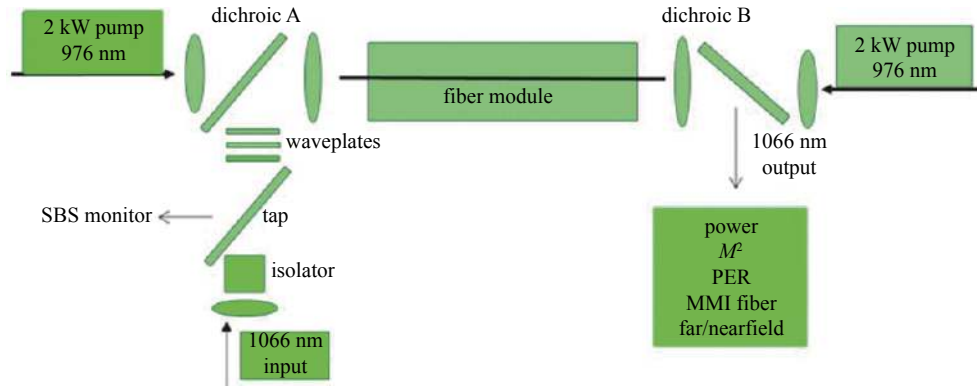


Fig. 11 Experimental setup of 3.1 kW narrow linewidth fiber amplifier based on PRBS phase-modulated seed of MIT

图11 麻省理工学院基于伪随机编码信号调制实现3.1 kW窄线宽线偏振光纤激光结构示意图^[41]

2020年,中国工程物理研究院应用电子学研究所将窄线宽线偏振光纤振荡器种子注入全保偏光纤放大器,实现功率为3.08 kW、线宽为0.2 nm的线偏振光纤激光输出,偏振消光比约为94%,光束质量因子 M^2 小于1.45^[42]。2021年,基于WNS相位调制进一步优化光谱线宽,采取反向泵浦结构提高SBS阈值,最终实现全光纤结构3.25 kW近衍射极限线偏振激光输出,3 dB线宽约为20 GHz,偏振消光比为14.2 dB,光束质量因子 M^2 小于1.3,其实验结构如图12所示,输出光谱和光束质量测量结果如图13所示,这是目前公开报道的基于全光纤结构窄线宽保偏光纤激光器最高输出功率^[43]。

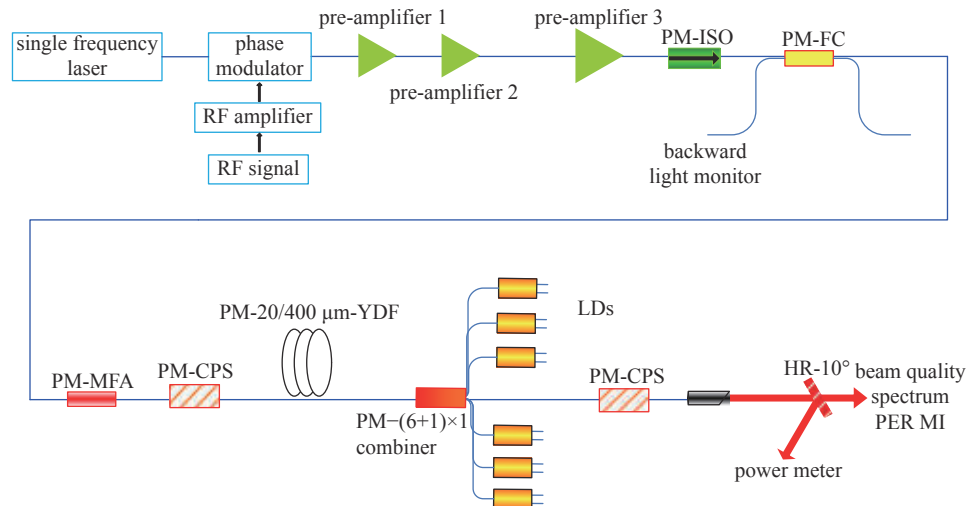


Fig. 12 Scheme of the 3.25 kW all-fiber PM amplifier based on WNS phase-modulated seed of CAEP

图12 中国工程物理研究院基于白噪声相位调制实现3.25 kW窄线宽光纤激光实验结构^[43]

2.3 多纤功率合成

现有的多纤功率合成方案主要分为相干合成和光谱合成^[44-49]。相干合成采用的是多个相同线宽、波长、偏振的光纤激光进行功率合成,而光谱合成采用的是不同波长的窄线宽光纤激光器进行合成。

相干合成是指精确控制各路光束的相位,使多个相同波长子束以相干的方式实现功率叠加。按照各子单元合束方式的不同,相干合束可以分为共孔径合束和分孔径合束。分孔径相干合成指各子光束由分立孔径输出,在发射近场各路光束中心存在一定间距,而在发射远场各路光束进行有效的相干合成;美国麻省理工学院林肯实验室在2014年和2015年,使用相干合成方法,分别实现了34 kW和44 kW接近理想光束质量的激光输出(图14)^[44]。

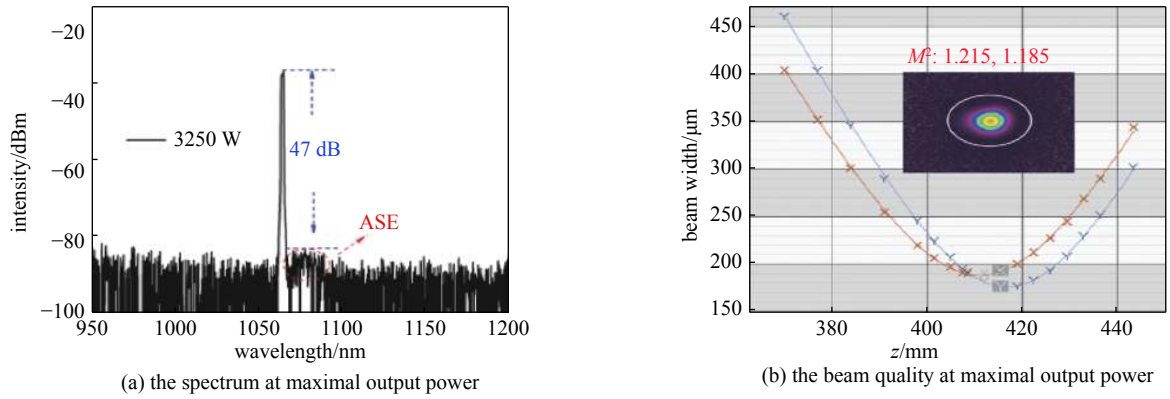


Fig. 13 Experiments results of the 3.25 kW all-fiber PM amplifier based on WNS phase-modulated seed of CAEP

图 13 中国工程物理研究院基于白噪声相位调制实现 3.25 kW 窄线宽光纤激光实验结果^[43]

共孔径相干合成指各子光束由一个共同的孔径发射,在发射近场各路光束中心完全重合,最终表现为一路激光输出。2015 年美国空军实验室利用 5 台 1.2 kW 窄线宽偏光纤激光器,通过 DOE 共孔径相干合成手段,实现了 4.9 kW 单孔径光纤激光输出, $M^2 \sim 1.1$, 合成效率达到 82%, 实验光路如图 15 所示^[45]。

光谱合束可以看做是反向运用了色散过程,利用色散元件,将不同角度入射到色散元件的不同波长的光束实现同角度与共孔径的输出。根据合束系统中使用的色散元件的不同,可以分为基于双色片的光谱合束技术、基于体布拉格光

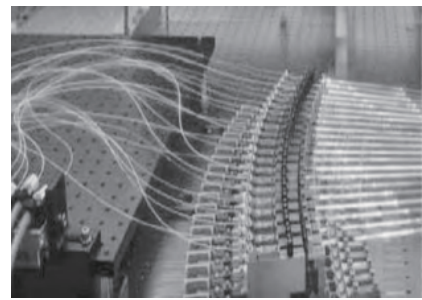


Fig. 14 Experimental setup of fiber laser combining system of Lincoln Laboratory

图 14 林肯实验室光纤激光相干合成实验系统^[44]

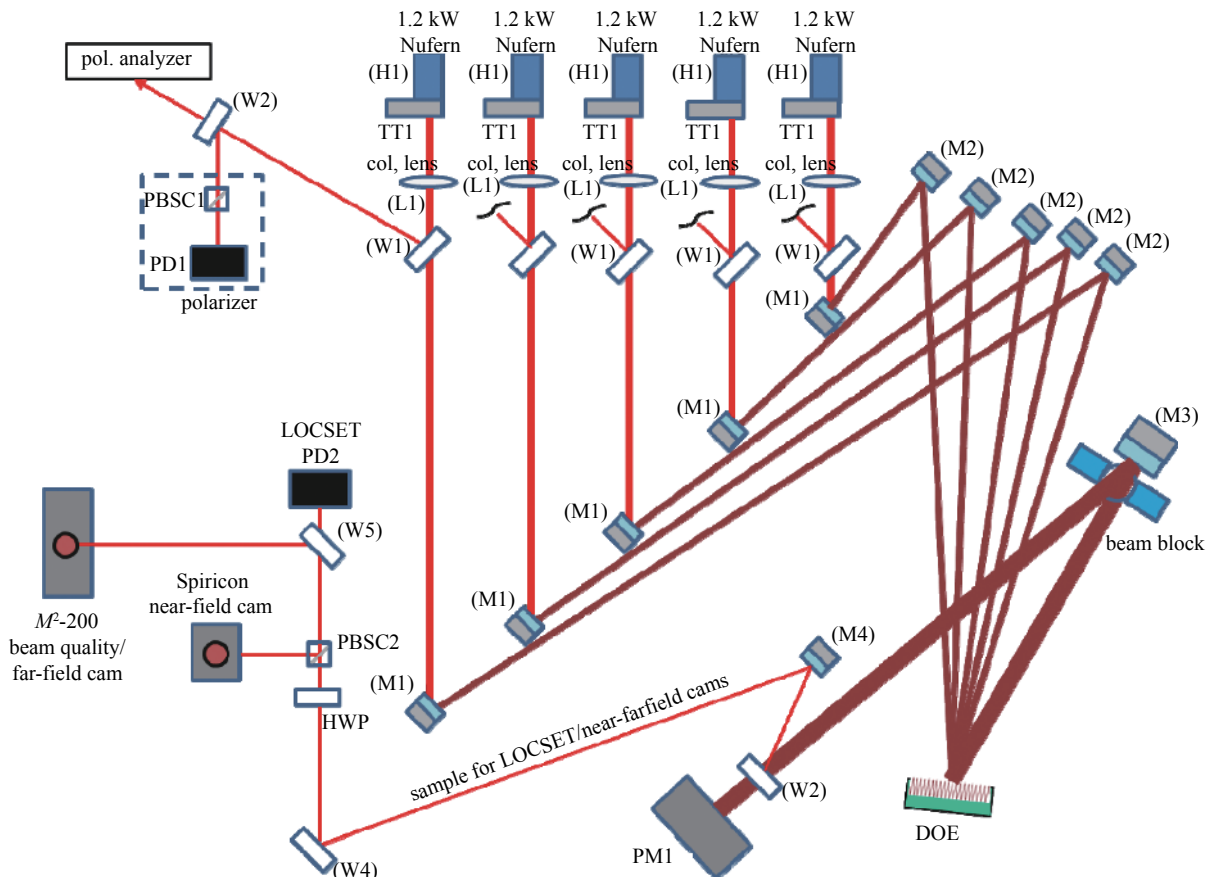


Fig. 15 Schematic of DOE common aperture coherent combining system of AFRL

图 15 美国空军实验室基于 DOE 的共孔径相干合成系统^[45]

栅的光谱合束技术和基于衍射光栅的光谱合束技术。其中基于双色片与基于体布拉格光栅的光谱合成技术都难以实现大阵列规模的合束,基于衍射光栅的光谱合成方案是当前的主流谱合成方案。

2016年,洛克希德·马丁公司实现了96路的密集组束光谱合成,图16为其所采用的光谱结构示意图,实现了总功率30 kW的激光输出^[46],2017年实现了60 kW级的光纤光谱合成光源样机;2019年将功率扩展为150 kW^[47]。2019年,中国航天科技集团采用基于透射式双光栅结构的光谱合束系统的设计,实现了六路激光的稳定合束,最终合束功率10.6 kW^[48]。

2.4 小结

一般的高功率光纤激光器无需考虑线宽和偏振等指标,单纤功率已经能够实现20 kW,但由于存在SBS, SRS效应,模式不稳定,以及光纤热应力、热损伤效应等因素的限制,现有基于双包层光纤的单纤功率理论上不超过70 kW。

针对更高功率多纤功率合成的窄线宽子束需求,高功率窄线宽保偏光纤激光器技术成为了高功率光纤激光领域的研究热点。目前,20 GHz级窄线宽保偏光纤激光器的输出功率已经突破3 kW,并向更窄线宽、更高单纤功率展开探索,而这一过程中,此时SBS效应将会成为导致激光器功率上限的最关键因素。新的SBS抑制方式将是实现窄线宽保偏光纤激光器功率跨越的关键技术。

相干合成方案虽然在原理上可以在保证光谱纯度的前提下实现极高亮度的激光输出,但该合成技术对光源,合成元件,以及相位控制系统均提出了严格要求,研制难度大。光谱合成技术对色散元件的热稳定性也有严格要求,另外,由于单纤激光的工作波段有限(~ 40 nm),因而合成路数不能无限增加,单纤功率直接限制了光谱合成的总功率上限。目前基于光谱合成技术最高可获得150 kW激光输出,基于相干合成技术最高可获得44 kW激光输出,正在研究与发展更高功率的光纤激光技术。

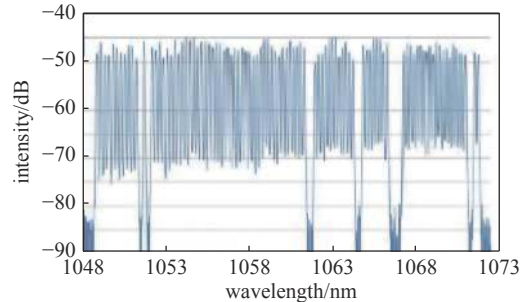


Fig. 16 Spectrum of the SBC output beam at 30 kW of Lockheed Martin

图16 洛克希德·马丁公司30 kW光谱合成输出光谱图^[46]

3 碱金属蒸气激光器

3.1 优势和难点

碱金属原子也具有极低的量子亏损,美国利弗莫尔国家实验室的Krupke最早申请了半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPALs)的专利,并提出了单口径MW级系统的概念设计。DPALs以流动碱金属饱和和蒸气做增益介质,以碱金属D双线分别作为泵浦上能级和激光上能级,形成三能级激光系统。但其能级结构上也决定了其产生高能激光存在着严重的技术困难,包括极窄的泵浦带宽(< 1 nm),泵浦上能级和激光上能级间的弛豫困难等。

碱金属激光主要研究集中在K, Rb和Cs碱金属元素。碱金属原子能级结构相似,最外层均只有一个价电子。由于碱金属原子激发态与激光上能级间隔很小,使得碱金属激光跃迁具有极高的量子效率(K为99.6%, Rb为98.1%, Cs为95.3%, 固体Nd: YAG为76%, Yb: YAG为91%)。

以铷原子为例说明碱金属的能级结构, DPAL是单个电子跃迁的三能级系统,中性碱金属原子有三个活跃的电子能级:基态能级 $5^2S_{1/2}$,两个激发能级 $5^2P_{3/2}$ 和 $5^2P_{1/2}$ 。在二极管泵浦下碱金属原子由基态 $5^2S_{1/2}$ 跃迁到激发态 $5^2P_{3/2}$ (泵浦上能级),在被激发原子发生自发辐射之前,它与缓冲气体碰撞被快速弛豫到最低的激发态 $5^2P_{1/2}$ (激光上能级)。受二极管的强泵浦产生了具有增益的粒子数反转,当它们以受激发射的方式由 $5^2P_{1/2}$ 回到基态 $5^2S_{1/2}$ 时导致共振 D_1 跃迁产生激光。

钾、铷和铯蒸气相关参数见表2。其基本参数决定了碱金属激光器的一些基本物理性质、运行参数及不同路线的优缺点。这些基本参数决定了碱金属激光具有以下特点。(1)介质浓度随温度变化敏感;(2)自然线宽窄,需高压运行;(3)泵浦上能级到激光上能级的弛豫速率设计影响激光系统运行状态;(4)极短的能级寿命要求高强度泵浦和高强度提取;(5)高量子效率带来的强泵浦要求。

3.2 发展概况

1999年, Konefal采用钛宝石激光器在添加乙烷缓冲气体的条件下对铷原子 D_2 线进行光泵浦,观察到了放大自发辐射现象;并基于该实验结果进一步指出纵向泵浦的碱金属-分子气体放大器在理论上是可行的。在这一推动下,美国利弗莫尔国家实验室的Krupke等人于2001年首次提出半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPAL)的概念^[49],

表 2 钾、铷、铯蒸气激光器相关参数

Table 2 Parameters of potassium, rubidium and cesium vapor lasers

element	atomic weight	melting point/°C	boiling point/°C	D ₂ line/nm	D ₁ line/nm	$\Delta E/cm^{-1}$	D2 Doppler linewidth (373 K) /nm
K	39.0983	63.65	770	766.70	770.11	57.7	0.00164
Rb	85.4678	38.89	688	780.25	794.98	237.5	0.00116
Cs	132.9054	28.84	678	852.35	894.59	554.1	0.00102

element	He ² P mixing rate/ (10 ⁴ s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)	He ² P _{3/2} broadening rate/ (10 ⁻⁵ nm·Pa)	He ² P _{1/2} broadening rate/ (10 ⁻⁵ nm·Pa)	quantum efficiency/%	energy level lifetime/ns	spontaneous emission rate/(10 ⁶ s ⁻¹)
K	8.0	0.034	0.026	99.56	26.7(D ₁)/26.3(D ₂)	
Rb	0.044	0.044	0.036	98.1	27.7(D ₁)/26.2(D ₂)	36.1(D ₁)/38.1(D ₂)
Cs	0.0005	0.072	0.069	95.3	≈30.5	

并于2003年利用功率为500 mW连续输出的钛蓝宝石激光器做泵浦源,泵浦光波长780 nm,线宽为50 GHz,池内充入69 825 Pa的He,9975 Pa的C₂H₆和Rb蒸气,系统工作温度维持在(120±1) °C。实验得到波长为795 nm,功率为30 mW的接近衍射极限的线偏振激光输出,激光器的斜率效率约为54%^[50]。

2005年,美国空军军官学校的Zhdanov等采用谱宽200 kHz的掺钛蓝宝石激光器端面泵浦Cs蒸气^[51]。该实验充分优化了泵浦结构、工作温度和耦合输出率等参量,斜率效率高达81%、实现了光光转换效率为63%的0.35 W高效激光输出。实验获得的效率已十分接近最大的理论斜率效率85.8%,这是碱金属激光器研究到目前为止获得的最高斜率效率。

2008年,通用原子的Zweiback等人利用橄榄石激光器作为泵浦源,光谱线宽(~0.2 nm)与VBG耦合半导体泵浦源相当,脉宽(~300 ns)相对于碱金属原子的弛豫时间可以模拟CW泵浦情形,单脉冲能量~40 mJ,重复频率10 Hz,能够较好的模拟无热效应条件下高功率半导体泵浦的情形;利用此泵浦源实现了光-光效率64%、斜率效率72%的铷激光^[52],且在最高峰值功率73 kW(23 kW/cm²)条件下输出激光能量保持良好的线性增长,这一结果说明DPAL在高泵浦强度下不存在或至少不显著存在严重的负面寄生效应,其高功率定标放大不存在基础的物理限制。

2011年,空军理工学院和空军研究实验室采用脉冲泵浦源对铷蒸气激光器在高泵浦强度下的动力学过程、铷原子循环时间,以及双光子过程等展开了深入研究;其中Miller等报道了铷蒸气激光器在3.5 MW/cm²极端泵浦条件下(>1000倍阈值)的运转性能^[53],结果表明此时转换效率仍能达到36%(相对吸收泵浦光子),瓶颈仅在于精细结构弛豫速率的不足,并且没有证据表明碰撞能量合并、电离以及其他非线性效应等导致了激光性能的下降。

2010年7月,空军研究实验室首次成功实现了横向泵浦流动介质DPAL,并将其命名为FDPAL(flowing DPAL),标志着碱蒸气激光器的发展进入了功率提升的实质性阶段^[54]。2012年,俄罗斯核物理中心(Russian Federal Nuclear Center)的科学家们采用弱压窄(线宽~0.7 nm)的高功率半导体系统泵浦闭环流动(流速20 m/s)碱蒸气增益介质,成功实现了~1 kW的CW铯激光输出^[55],光光转换效率~48%,系统紧凑轻巧,循环流动系统体积仅为3000 cm³。这是关于FDPAL系统性能首次公开报道的实验结果,充分验证了流动散热的有效性,并将功率推进至kW级水平,是DPAL发展中的重大突破和里程碑式成果。

LLNL于2015年成功实现了14 kW的铷激光(图17)^[56]。2016年,LLNL获得了MDA约1.6亿的资助^[57],进一步将功率提升至30 kW^[58],并计划于2019年将功率提升至120 kW^[59]。

3.3 小结

碱金属激光对泵浦提出了远高于固体激光的要求,其一,其需要足够高的亮度实现三能级系统阈值;其二,必须实现快速的吸收和受激发射抑制极强的泵浦上能级自发辐射;其三,碱金属蒸气泵浦吸收带宽较常见固体激光增益材料低1个量级;最后,碱金属蒸气无法形成类似块状固体的边界对泵浦光实现约束,长程均匀传输更加困难。在工程上,需要突破上述泵浦技术难题的同时,还需要解决高温、高压气

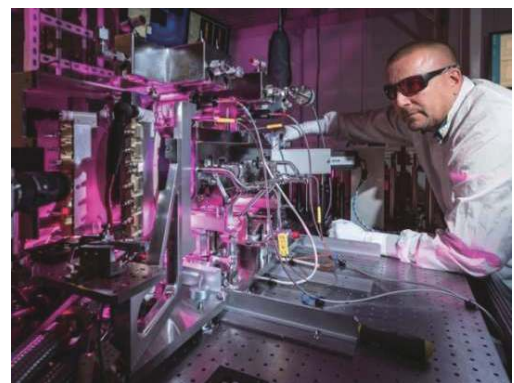


Fig. 17 14 kW rubidium laser output at Lawrence Livermore National Laboratory

图 17 美国利弗莫尔实验室实现 14 kW 的铷激光输出

体的受控流动和像差控制问题,以及光学元件在高温、高压、强光和腐蚀环境中的吸收和损伤问题,碱金属激光才可能实现高功率激光输出。从目前研究看,上述难题均为工程问题,并不存在物理层面的问题,随着近年来泵浦源技术的发展和相关工程技术的突破,碱金属激光输出功率水平将快速提升,并逐渐开始关注光束质量控制、构型优化和工程应用问题。碱金属激光技术途径有望实现单孔径谐振器 MW 级激光输出,并可实现与光纤激光相媲美的电光效率,远超现有各技术路线的紧凑轻量型,最终成为一种近乎理想的高能激光器。

4 高功率绿光激光器

相比于常见高功率块状固体激光和光纤激光 $1\ \mu\text{m}$ 附近激光波长,相同光束质量的绿光激光在理想情况下到靶功率密度是近红外激光的 4 倍左右,且金属材料对绿光激光的吸收率是波长为 $1\ \mu\text{m}$ 附近的近红外激光的数倍,在金属结构目标上将产生更显著的力-热效应。目前高功率绿光激光器一般是利用了 LD 泵浦激光增益介质产生 $1\ \mu\text{m}$ 附近的近红外激光结合非线性晶体倍频过程获得的。其中倍频方式一般采用内腔倍频、腔外单通倍频、外腔谐振倍频三种方式。

4.1 内腔倍频

内腔倍频是将倍频晶体放置在基频光激光器的谐振腔内实现倍频转换,由于腔内基频光功率密度较高,内腔倍频往往可以获得较高的倍频转换效率。

20 世纪 90 年代以来,随着高效高功率的半导体激光技术和新型非线性倍频晶体的迅速发展,绿光激光的功率进一步提升。1998 年, Eric C. Honea 等人采用端面泵浦和双调 Q 以及 V 型腔腔内倍频技术,实现了 140 W 的绿光输出^[60]。2004 年韩国的 Jonghoon Yi 等人采用 Z 型腔在 398 W 泵浦功率下输出 101 W 的绿光,光光效率达到 25.4%^[61]。2009 年,如图 18 所示,美国相干公司采用可退偏补偿的双 Nd:YAG 棒状增益模块串接的稳腔结构和 II 类匹配的 LBO 晶体,获得平均功率 420 W、重复频率为 10 kHz 的绿光输出,其光束质量 M^2 因子为 24^[62]。

Yb:YAG 薄片激光器由于优越的热管理方式,其输出功率远高于 Nd:YAG 棒状激光器,薄片激光器采用内腔倍频可获得更高的倍频效率和更高功率的绿光激光输出。

2012 年,通快公司在单个 Yb:YAG 薄片模块稳腔中采用内腔倍频方式获得平均功率为 255 W、光束质量 M^2 因子为 1.15 的连续 515 nm 绿光输出,光光效率达到 30%。为进一步提升倍频效率和绿光功率。通快公司采用倒空腔设计将腔内峰值激光功率提升到 MW 级,在 2070 W 泵浦功率条件下,获得大于 700 W 绿光输出,光光效率接近 35%(原理如图 19 所示)^[63]。

内腔倍频绿光激光器腔内基频光通常为多纵模振荡,这些纵模通过倍频晶体的和频作用发生耦合,同时腔内还存在纵模间的交叉饱和效应。和频和交叉饱和效应使得内腔倍频绿光激光器输出激光功率随着时间发生无规则波动,该波动又被称作“绿光噪声”。同时,内腔倍频激光器谐振腔多采用稳腔,模体积较小,为提升效率多采用多横模输出,其光束质量往往较差。

4.2 外腔谐振倍频

不同于内腔倍频和腔外单通倍频,外腔谐振倍频是指在某频激光外部独立设计谐振倍频腔,通过选取合适的倍频腔的耦合和输入镜反射率,并利用压电陶瓷和电学反馈控制系统精确控制其腔长,使得在倍频腔内注入的基频光功率密度由于谐振得到极大增强,并且能多次通过倍频晶体增加倍频次数,提高倍频转换效率。

2010 年,德国汉诺威莱布尼茨大学的 Tobias Meier 等人采用 LBO 晶体,将 1064 激光进行外腔谐振倍频,获得了

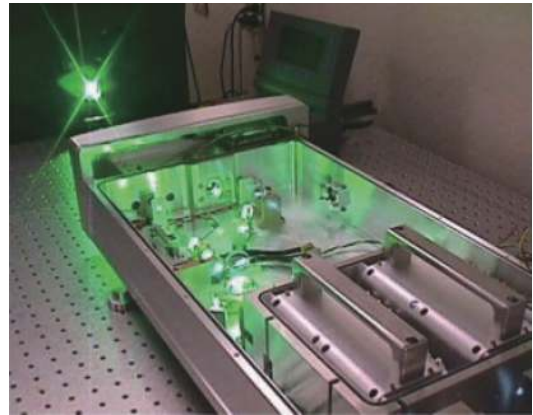


Fig. 18 The 420 W green laser of Coherent

图 18 相干公司 420 W 绿光激光器照片

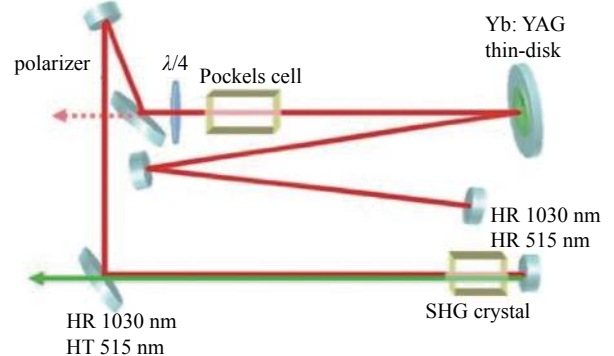


Fig. 19 Light path schematic diagram of green pulsed laser of TRUMPF

图 19 通快公司脉冲绿光激光器光路图

平均功率为 134 W 的连续单频激光输出, 倍频效率高达 90%^[64]。2012 年, 美国 IPG 公司, 采用多级放大光纤激光器获得平均功率 230 W 的单频(约 140 kHz 线宽) 1064 nm 激光, 耦合进外腔谐振倍频器获得 170 W 绿光输出, 倍频效率达到 74%(如图 20 所示)^[65]。

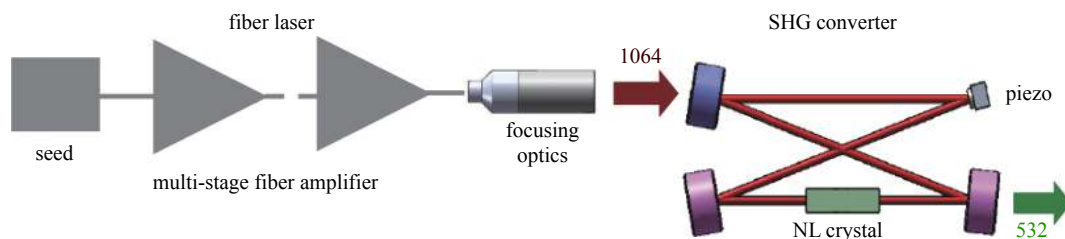


Fig. 20 Light path schematic diagram of 170 W extra-cavity frequency doubled green laser

图 20 170 W 外腔谐振倍频绿光激光器光路图

显然, 外腔谐振倍频极大提升了倍频效率, 但是获得获得高功率单频激光难度较大; 同时谐振倍频腔对高频振动较敏感, 难以用于恶劣环境中。

4.3 腔外单通倍频

腔外单通倍频则将倍频晶体置于谐振腔外, 基频光单次通过倍频晶体。腔外单通倍频常用于高功率 MOPA 结构激光器中, 该方案可有效避免“绿光噪声”。

2000 年, Sébastien Favre 等人首次报道了长脉冲体制下的腔外单通倍频, 获得了脉宽 200 μs , 平均功率 145 W, 最高倍频转换效率 17.4% 的倍频绿光输出^[66]。2013 年, 中国工程物理研究院应用电子学研究所采用端泵浦板条增益模块放大技术, 实现了 1.3 J@1 kHz, 10 ns 的 1064 nm 窄脉冲激光输出, 采用片状晶体倍频技术, 获得大于 536 mJ, 1 kHz 的 532 nm 激光输出, 光束质量(β) 为 4.11 倍的衍射极限, 结构示意图和实验系统如图 21 所示。

近年来, 1 μm 波长附近的光纤激光器功率显著提升。由于其与生俱来的高效和高光束质量优点, 使得利用 1 μm 波长附近的光纤激光器倍频来产生高功率绿光成为研究热点。2014 年, 美国 IPG 公司采用高重复频率准连续种子源和多级连续光纤放大器, 平均功率为 1 kW, 重复频率 150 MHz, 脉宽约 1.2 ns 的近红外激光输出(脉冲占空比

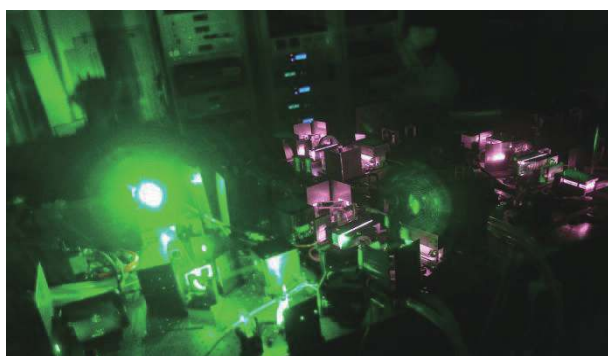
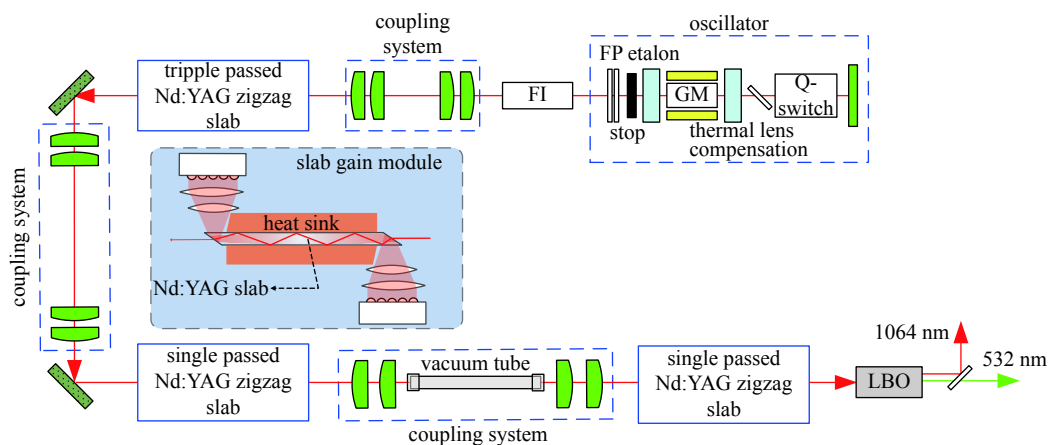


Fig. 21 Slab green laser with MOPA structure(536 mJ@1 kHz)

图 21 板条 MOPA 放大绿光激光器(536 mJ@1 kHz)

18%), 单通通过 LBO 倍频晶体, 获得 550 W 绿光输出, 倍频效率约为 52%, 且绿光依然保持近衍射极限(如图 22 所示)^[67]。

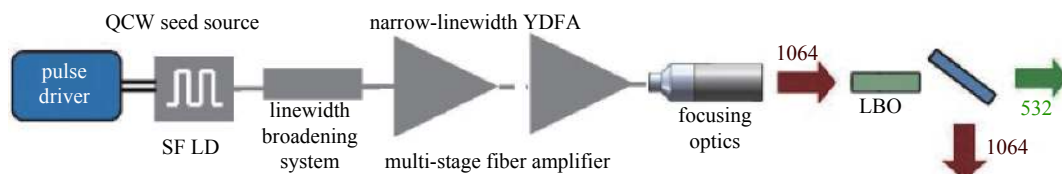


Fig. 22 Light path schematic diagram of 550W green laser of IPG Photonics

图 22 IPG 公司绿光激光器光路图(550W)

4.4 小结

受限于倍频晶体的平均功率承载能力和高效非线性变换的高峰值功率要求, 单台腔内倍频路线仅能实现 kW 级输出, 且受限于固体激光光谱, 难于通过合成实现功率倍增。这一功率水平难以在较远距离作用目标产生强热光效应。但利用光纤激光器较宽的光谱调谐范围, 重点突破基频光纤源高重复频率调制和纤内中非线性效应抑制技术、高平均功率激光注入条件下弱吸收倍频晶体相位匹配技术和可见光波段的高效密集光谱合束技术。有希望将单台绿光激光器功率提升至数千瓦级, 并通过光谱合成技术实现 100 kW 级绿光激光输出。

5 超高峰值功率激光

超高峰值功率激光主要有超短脉冲(fs, ps)激光和 ns 级巨脉冲激光两种类型。超短脉冲(fs, ps)激光不同于连续激光作用于目标上的热效应毁伤, 超高峰值功率的脉冲激光将产生等离子体喷溅、高效涂层去除、局部空间强电磁脉冲产生等效应。通过该类光源的不断发展和效应研究的不断深入, 有望在较远目标上获得更高峰值功率密度, 产生等离子体并引起高幅值冲击波等强热-力效应。巨脉冲激光的一项重要用途是空间碎片清除, 利用高能激光照射空间碎片, 使其表面烧蚀而获得反喷速度增量, 降低原来轨道高度, 最终坠入大气层烧毁; 或者利用更高能的激光使空间碎片气化、熔融或分解。

5.1 高功率大能量超短脉冲激光

高功率大能量超短脉冲激光通常采用主振荡功率放大(MOPA)方式来实现, 并且大能量的超短脉冲激光通常采用再生放大技术或啁啾脉冲放大(CPA)技术来实现。高功率大能量超短脉冲激光主要采用薄片、Inoslab 和单晶光纤等增益介质构型。

2017 年, 德国 Nubbemeyer 等人报道了一种基于 Yb:YAG 薄片技术、再生放大技术和啁啾脉冲放大的激光器^[68]。基于 Kerr-lens 锁模的薄片振荡器作为种子源, 输出单脉冲能量 1.3 μJ, 脉冲宽度约 350 fs。光栅展宽器将种子光脉冲宽度拓展到 1.5 ns, 通过脉冲抽取种子光重复频率降为 5/10 kHz。预放再生放大器将种子光能量从 1 μJ 提高到 1~2 mJ。主放再生放大器由两个口径为 14 mm 厚度约 0.2 mm 的 Yb:YAG 薄片模块组成, 环形谐振腔腔长为 15 m, 如图 23 所示。放大输出之后经过压缩, 获得重复频率 5 kHz 平均功率 1.03 kW 的激光输出, 脉冲宽度为 1.08 ps, 峰值功率 182 GW, 光束质量 M^2 为 1.1。

2020 年, 德国斯图加特大学的 Roecker 等人报道了平均功率 2 kW 的 Yb:YAG 薄片超快激光器^[69]。波长 1030 nm, 最大平均功率 2050 W, 重复频率 300 kHz, 单脉冲能量 6.8 mJ, 脉冲宽度 7.7 ps, 峰值功率 887 MW, 光束质量 M^2 约

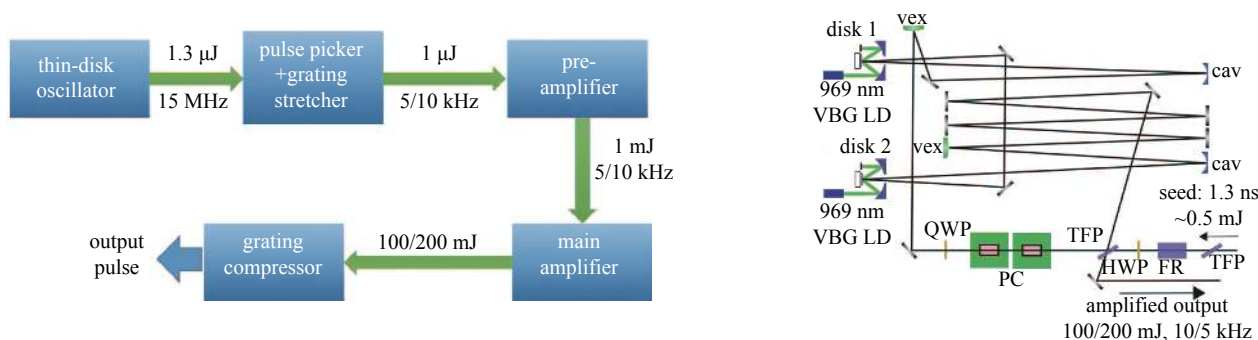


Fig. 23 Light path schematic diagram of Yb:YAG thin slab chirped regenerative amplifier

图 23 Yb:YAG 薄片啁啾再生放大器光路示意图

1.5. 激光器采用MOPA结构,种子源加两级放大,光路如图24所示。种子源为通快激光的TruMicro 5000薄片激光器,输出功率105 W,重复频率100 kHz,脉宽7.5 ps。两级放大器都是基于Yb:YAG薄片的24通泵浦放大器,实现种子光 2×30 通提取放大。

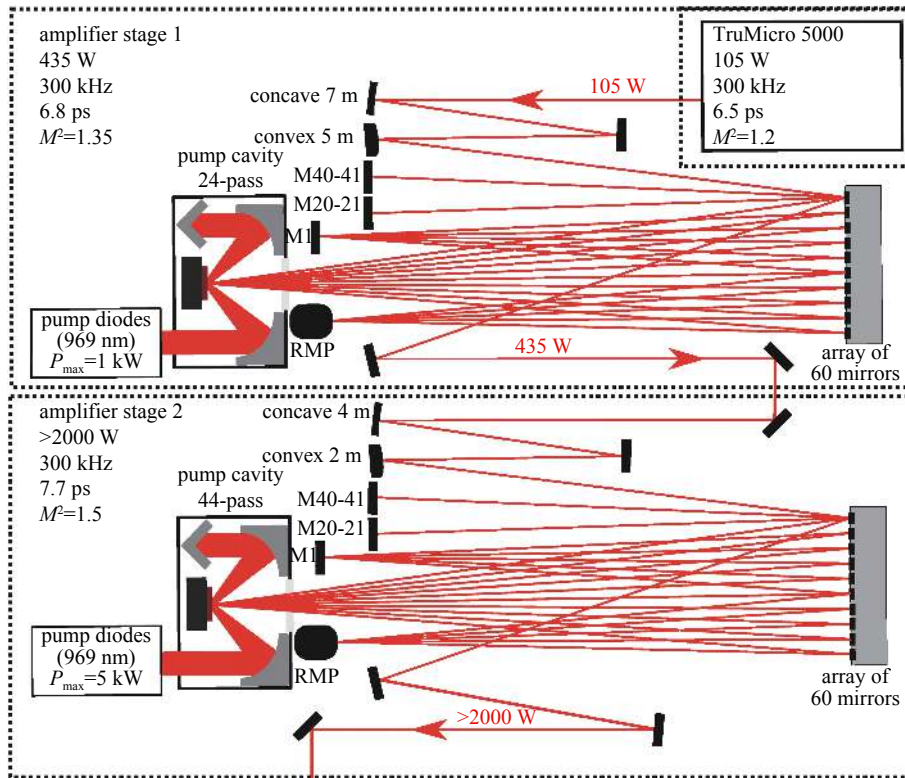


Fig. 24 Light path schematic diagram of Yb:YAG thin slab multi-pass amplifier

图24 Yb:YAG薄片多通放大器光路示意图

EdgeWave公司一直在Innoslab激光技术方面保持领先,已经有成熟的超短脉冲激光产品^[70]。最新的产品中,1 μm 波段的ps激光最高输出功率为600 W,最大脉冲重复频率100 MHz,最大脉冲能量2 mJ,脉宽12 ps,光束质量 M^2 为1.1。1 μm 波段的fs激光最高输出功率为600 W,最大脉冲重复频率50 MHz,最大脉冲能量3 mJ,脉宽400 fs,光束质量 M^2 为1.1。

2018年,Kuznetsov等人报道了基于Yb:YAG单晶光纤的大能量皮秒激光器^[71]。采用MOPA结构,光纤激光器作为种子源,预放为4通放大的Yb:YAG单晶光纤,主放为4通放大的Yb:YAG单晶光纤,光路示图25所示。输出平均功率28 W,在11.5 kHz下对应的单脉冲能量2.4 mJ,压缩后脉冲宽度为2.8 ps,峰值功率870 MW。

2020年,李峰等人报道了基于Yb:YAG单晶光纤和体布拉格光栅的紧凑型大能量飞秒激光器^[72]。采用MOPA结构,光纤激光器作为种子源,两个单通放大的Yb:YAG单晶光纤串联为放大器,在200 kHz下实现了平均功率52.2 W,这是目前单通结构的放大系统中最高的功率水平。在100 kHz下,单晶光纤将注入的5 W平均功率提高到28.4 W,单脉冲能量284 μJ ,脉冲宽度858 fs,峰值功率331 MW。

5.2 ns级巨脉冲激光

巨脉冲光源应具备高达GW级的峰值功率和百J级的单脉冲能量的输出能力,为实现足够储能、多级提取放大和材料损伤抑制,往往结构复杂,器件尺寸较大,长期主要用于科学实验装置等。近年来,随着人类对外太空日益频繁的航天活动,空间碎片数量剧增,太空环境正在日益恶化,随着空间碎片的主动探测与清除技术研究,利用天基的高峰值功率高能激光清理空间碎片技术相比增阻移除、抓捕移除等方法,被广泛认为更具潜力,但为实现这一应用需求,巨脉冲激光在实现数十J以上短脉冲激光输出的同时还需解决系统规模、环境适应性问题。2001年,诺斯罗普·格鲁曼公司基于侧面泵浦的板条激光器DAPKL^[73],如图26所示,其采用三级放大的MOPA结合SBS的方式,放大级增益介质尺寸4.5 cm \times 1.5 cm \times 18 cm,输出光斑尺寸3 cm \times 1.4 cm。激光器输出能量10 J,脉宽7 ns,重复频率100 Hz,平均功率1 kW,光束质量2倍衍射极限。

2008年,基于HALNA(High Average-power Laser for Nuclear Fusion Application)单路激光器设计理念,Ryo Yasuhara

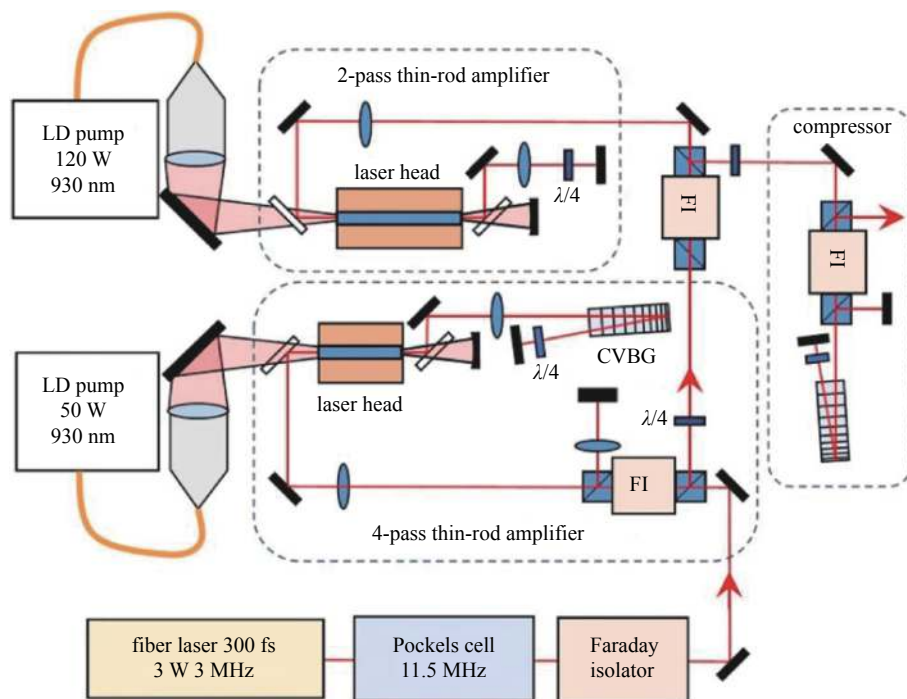


Fig. 25 Schematic diagram of Yb:YAG single crystal fiber ps laser

图 25 Yb:YAG 单晶光纤 ps 激光器示意图

等人利用 Nd:glass 板条作为主放大器, 实现了平均功率 213 W、重复频率 10 Hz、脉冲宽度 8.9 ns 的激光输出, 输出激光峰值功率约为 2.4 GW^[74]。该激光系统主放大器采用的是大面泵浦、液体直接冷却的 zigzag 结构 Nd:glass 板条。光束质量控制方面, 板条上下边缘采用包边再加电加热器的方式使温度和增益区匹配, 使得增益模块获得较平坦的 OPD; 另外利用 SBS 相位共轭的方式进一步净化光束, 提升光束质量, 最终光束质量控制在略大于 2 倍的衍射极限。

2017 年, 中国科学院光电研究院采用 3 级棒和 3 级板条 (尺寸 135 mm×35 mm×7 mm) MOPA 结构, 实现了 6.6 ns, 5.05 J@200 Hz, 1.9 倍衍射极限 (AO 后) 的激光输出^[75]。

2007 年, 美国 LLNL 等研制的 Mercury 激光系统 (如图 27 所示) 已经实现 61 J 输出, 重复频率 10 Hz, 脉冲宽度 (FWHM) 约为 14 ns^[76]。激光器系统主要由光纤振荡器、三个大模场光纤放大器和两级主放大器组成。主放大器增益介质为片状 Yb:S-FAP, 泵浦方向与激光方向重合, 增益介质采用亚音速低温 He 气冷却的方式, He 气流动的方向与泵浦光、激光传播方向垂直。系统采用主动光学 (41 促动器变形镜及探测系统) 对放大激光进行校正, 光束质量由大于 7 倍的衍射极限提升到小于 4.5 倍的衍射极限。

2013 年, Thierry Goncalves-Novo 等人报道了 14 J (~8 ns), 2 Hz 脉冲激光系统 Lucia (如图 28 所示)。Lucia 的放大器增益介质采用的是激活镜结构的 Yb:YAG^[77]。Lucia 的增益模块的泵浦光和接触冷分布在两侧, 避免了反射面、冷却面和增益介质泵浦入射面的重合。Lucia 的增益模块的泵浦耦合系统相对比较复杂, 在慢轴方向上通过棱镜将光汇聚到增益介质上, 在快轴方向上用一对反射镜将泵浦光约束在增益介质范围内。后续工作中, Lucia 团队计划在激光系统后再级联低温冷却的增益模块实现更大能量和

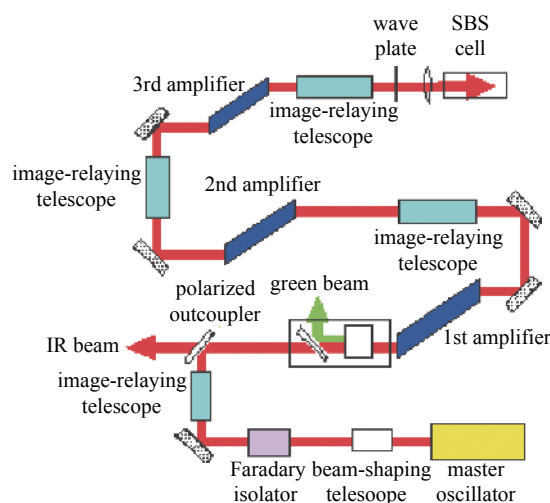


Fig. 26 Schematic diagram of the DAPKL laser

图 26 DAPKL 激光器光路示意图

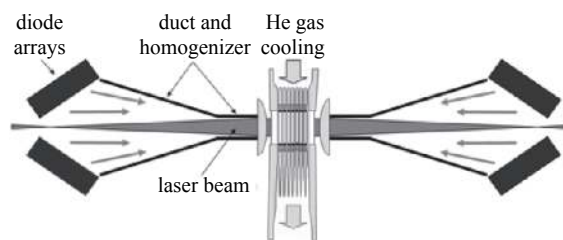


Fig. 27 Gain module structure of Mercury

图 27 Mercury 增益模块结构

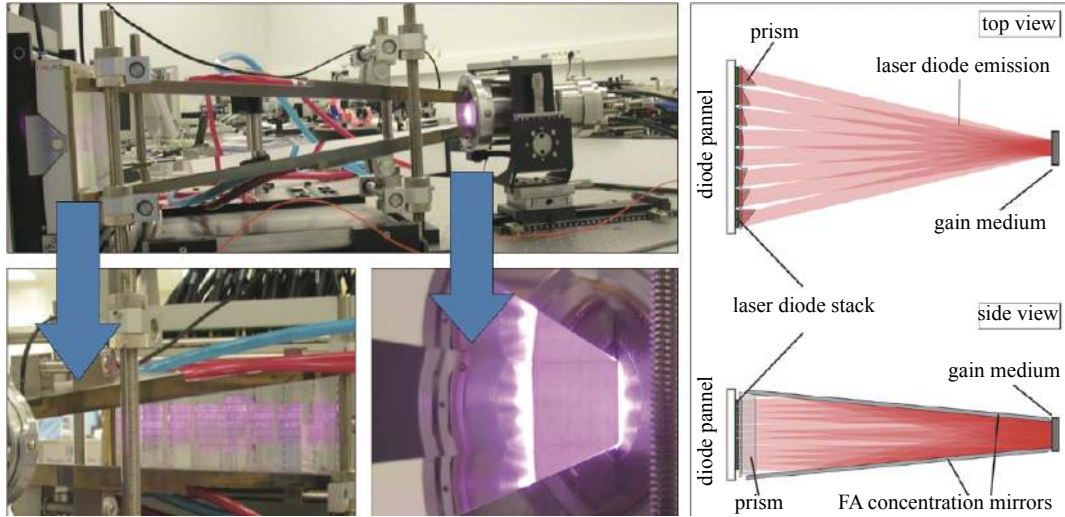


Fig. 28 Actual gain module structure of Lucia

图 28 Lucia 增益模块实物图

更高效率激光输出。

2017年,英国的DiPOLE团队采用光纤种子源、光纤前级放大器、棒状再生放大器、常温片状Yb:YAG放大器、低温氦气冷却Yb:YAG薄片,5级放大实现 $105\text{ J}@10\text{ Hz}$, 10 ns 激光输出,光束质量 ~ 2 倍衍射极限^[78]。

2017年,清华大学利用Nd:YAG分布式激活镜结构(如图29所示)实现 10 Hz , 10 ns , 12.2 J 脉冲能量输出。放大器增益介质侧边采用包边结构,抑制ASE和自激振荡,放大光效率约为20.6%。这个系统的目标能量为 $\geq 50\text{ J}$ ^[79]。

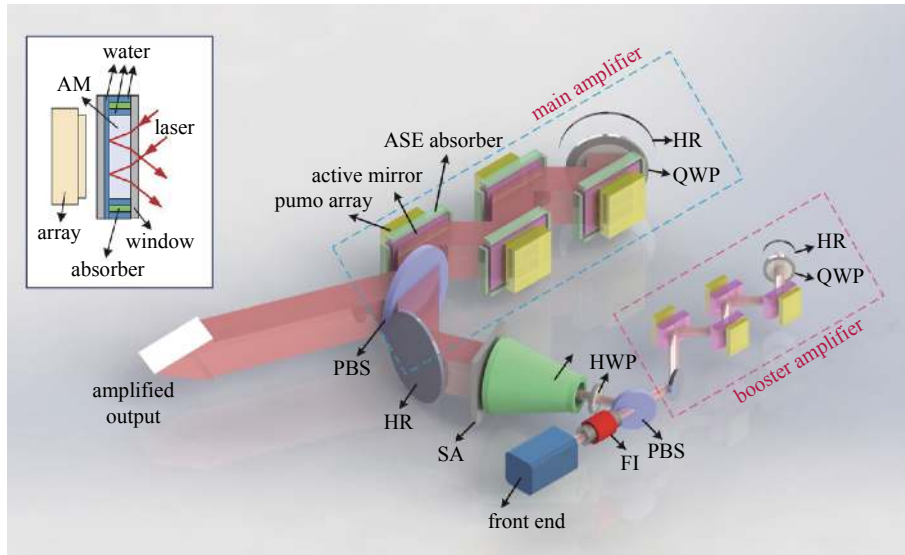


Fig. 29 Distributed activated mirror structure laser

图 29 分布式激活镜结构激光器

板条构型的巨脉冲激光器具有光束质量好、体积小等特点,可以实现 $5\sim 20\text{ J}$ 的能量输出,光束质量较高,但由于较小的板条端面通光口径,随着输出能量的上升和脉宽的缩短,激光的峰值功率会达到 $1\text{ GW}/\text{cm}^2$,从而对晶体和膜层造成损伤,进一步能量提升受限。片状构型分为激活镜型和堆叠型,激活镜型每片介质具有独立的冷却和泵浦结构,往往系统规模庞大;堆叠型采用阵列式布局,容易获得紧凑型分布,但长程传输吸收的均匀泵浦耦合较为困难。

6 结 论

近十年来,二极管泵浦高能固体激光、高功率光纤激光等高能激光光源技术发展迅速。国内外多条板条激光技术路线和浸入式直接冷却激光技术路线均实现了大于 100 kW 的单孔径激光输出,数十 kW 级平面波导激光体现出较强的紧凑、轻量化优势,高功率宽谱单纤激光突破 20 kW ,高功率窄线宽单纤激光突破 3 kW ,多纤共孔径功

率合成突破 100 kW。二极管泵浦高能激光技术的不断突破,极大促进了其在先进材料高效精密加工、科学研究、安保、国防等领域的应用。但面向在远距离目标上产生激光强热-力效应的应用需求,传统块状固体激光器,特别是高功率 MOPA 固体激光器还存在着效率偏低、分立元件数量过多、系统复杂、环境适应性提升困难等不足;大孔径谐振腔技术的直接液冷薄片激光、碱金属激光虽然光学系统结构简单,紧凑型 and 功率定标放大能力优势明显,但其还存在着强多物理场耦合问题,技术困难和工程困难很大等问题;光纤激光虽然单纤输出功率物理层面受限,但其具有高效率、高可靠性等显著优势,可以通过多种复杂的合成技术,实现单孔径高功率高光束质量激光输出。因此,目前阶段,合成的光纤激光、单谐振腔的浸入式激光因其在紧凑型、实用化等方面的优势,成为国内外高能激光技术研究 and 应用开发的重点方向。与此同时,可见光波段高能激光具有更优异的目标耦合特性,高峰值功率脉冲激光、巨脉冲激光具有与高平均功率激光不同的目标毁伤效应,近年来也得到了迅速的发展。

参考文献:

- [1] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002 (Sun Chengwei. Laser irradiation effect[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002)
- [2] 宋宏伟, 黄晨光. 激光辐照诱导的热与力学效应[J]. 力学进展, 2016, 46(1): 435-477. (Song Hongwei, Huang Chenguang. Progress in thermal-mechanical effects induced by laser[J]. Advances in Mechanics, 2016, 46(1): 435-477)
- [3] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]//Proceedings of SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications. 2009: 719507.
- [4] Mcnaught S J, Asman C P, Injeyan A, et al. 100-kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array[C]//Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest. 2009: 321-334.
- [5] Chen Junchi, Li Jiang, Xu Jialin, et al. 4350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd: YAG slab laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 63: 50-53.
- [6] 郭亚丁. 高能固体激光自适应光学光束质量控制[C]//第四届大气光学及自适应光学技术发展研讨会. 2019 (Guo Yading. Beam quality control technology for high energy solid laser system[C]//The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics. 2019)
- [7] 王超, 唐晓军, 徐彦婧, 等. 输出功率11kW的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2807-2809. (Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, et al. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2807-2809)
- [8] 高清松, 胡浩, 裴正平, 等. 10kW级固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39: 0202001. (Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, et al. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39: 0202001)
- [9] Li Mi, Hu Hao, Gao Qingsong, et al. A 7.08-kW YAG/Nd: YAG/YAG composite ceramic slab laser with dual concentration doping[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9: 1504010.
- [10] Xu Liu, Wu Yingchen, Du Yinglei, et al. High brightness laser based on Yb: YAG MOPA chain and adaptive optics system at room temperature[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14592-14600.
- [11] Wang Dan, Du Yinglei, Wu Yingchen, et al. 20 kW class high-beam-quality CW laser amplifier chain based on a Yb: YAG slab at room temperature[J]. Optics Letters, 2018, 43(16): 3838-3841.
- [12] Filgas D, Rockwell D, Spariosa K. Next generation lasers for advanced EO systems[J]. Raytheon Technology Today, 2008, 1: 9-13.
- [13] Filgas D, Clatterbuck T, Cashen M, et al. Recent results for the Raytheon RELI program[C]//Proceedings of SPIE 8381, Laser Technology for Defense and Security VIII. 2012: 83810W.
- [14] Giesen A, Speiser J. 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.
- [15] Nixon M D, Cates M C. High energy high brightness thin disk laser[C]//Proceedings of SPIE 8547, High-Power Lasers 2012: Technology and Systems. 2012: 85470D.
- [16] Wilmington M A. Textron defense systems awarded funding for the DARPA HELLADS Program[R]. 2008.
- [17] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag® laser program[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010. 2010: JThH2.
- [18] GA-EMS and Boeing Team to Develop 300 kW-class HELWS Prototype for US Army[EB/OL]. <https://www.ga.com/ga-ems-and-boeing-team-to-develop-300kw-class-helws-prototype-for-us-army>.
- [19] Nie R Z, She J B, Zhao P F, et al. Fully immersed liquid cooling thin-disk oscillator[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11: 115808.
- [20] Fu Xing, Li Peilin, Liu Qiang, et al. 3 kW liquid-cooled elastically-supported Nd: YAG multi-slab CW laser resonator[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18421-18432.
- [21] Fu Xing, Liu Qiang, Li Peilin, et al. Numerical simulation of 30-kW class liquid-cooled Nd: YAG multi-slab resonator[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18458-18470.
- [22] Ye Zhibin, Liu Chong, Tu Bo, et al. Kilowatt-level direct-'refractive index matching liquid'-cooled Nd: YLF thin disk laser resonator[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1758-1772.
- [23] Wang Ke, Tu Bo, Jia Chunyan, et al. 7kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd: YAG multi-disk laser resonator[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 15012-

15020.

- [24] Yi Jiayu, Tu Bo, An Xiangchao, et al. 9 kilowatt-level direct-liquid-cooled Nd: YAG multi-module QCW laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13915-13926.
- [25] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-wave output power[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(8): 470-472.
- [26] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10kW[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference. 2009: CThA3.
- [27] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//CLEO: 2013. 2013: AF2J. 1.
- [28] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化10 kW光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0336001. (Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0336001)
- [29] 林傲祥, 倪力, 彭昆, 等. 国产YDF有源光纤实现单纤20 kW激光输出[J]. *中国科技成果*, 2021, 22(13): 7-9. (Lin Aoxiang, Ni Li, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[J]. *China Science and Technology Achievements*, 2021, 22(13): 7-9)
- [30] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [31] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, et al. Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[C]//Proceedings of SPIE 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications. 2016: 97280E.
- [32] Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun, et al. Coherent beam combining of high power fiber lasers: progress and prospect[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(7): 1597-1606.
- [33] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, et al. Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 487-497.
- [34] Madasamy P, Thomas A, Loftus T, et al. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[C]//Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing. 2008: FTuJ3.
- [35] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [36] Huang Zhihua, Liang Xiaobao, Li Chengyu, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 297-302.
- [37] Yan Ping, Huang Yusheng, Sun Junyi, et al. 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14: 080001.
- [38] Huang Yusheng, Xiao Qirong, Li Dan, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [39] Xu Jiangming, Liu Wei, Leng Jinyong, et al. Power scaling of narrowband high-power all-fiber superfluorescent fiber source to 1.87 kW[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 2973-2976.
- [40] 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: 0419004. (Yang Yifeng, Shen Hui, Chen Xiaolong, et al. 2.5 kW near diffraction limit output of all fiber high efficiency, narrow linewidth fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 0419004)
- [41] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [42] Wang Yanshan, Ke Weiwei, Peng Wanjiang, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17: 075101.
- [43] Wang Yanshan, Sun Yinhong, Peng Wanjiang, et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(21): 6331-6336.
- [44] Missile defense agency for president's budget submission FY 2015: RDT&E Program, 2014-03.
- [45] Flores A, Dajani I. Kilowatt-class, all-fiber amplifiers for beam combining[J]. *SPIE Newsroom Lasers & Sources*, 2016.
- [46] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, et al. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]//Proceedings of SPIE 9730, Components and Packaging for Laser Systems II. 2016: 97300Y.
- [47] 唐晓军, 王钢, 刘娇, 等. 高亮度固体激光器技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(3): 49-55. (Tang Xiaojun, Wang Gang, Liu Jiao, et al. Development of high brightness solid-state laser technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 49-55)
- [48] Zheng Ye, Zhu Zhanda, Liu Xiaoxi, et al. High-power, high-beam-quality spectral beam combination of six narrow-linewidth fiber amplifiers with two transmission diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(30): 8339-8343.
- [49] Krupke W F. Diode-pumped alkali laser: 6643311 [P] 2003-11-4.
- [50] Krupke W, Beach R J, Kanz V K, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [51] Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 696-698.
- [52] Zweiback J, Krupke B. High power diode pumped alkali vapor lasers[C]//Proceedings of SPIE 7005, High-Power Laser Ablation VII. 2008: 700525.
- [53] Miller W S, Sulham C V, Holtgrave J C, et al. Limitations of an optically pumped rubidium laser imposed by atom recycle rate[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 819-824.

- [54] Novel diode-pumped alkali laser achieves first light[R]. <http://www.wpafb.af.mil/news/story.asp?id=123212683>.
- [55] 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.
- [56] Chronology of MDA's plans for laser boost-phase defense[R/OL]. (2016-08-26).<https://mostlymissiledefense.com/2016/08/26/chronology-of-mdas-plans-for-laser-boost-phase-defense-august-26-2016/>.
- [57] MDA. Department of Energy National Nuclear Security Administration[R]. Washington, 20585.
- [58] Wisoff P J. Diode pumped alkaline laser system: a high powered, low SWaP directed energy option for ballistic missile defense high-level summary-April 2017[R]. LLNL-TR-730237, 2017.
- [59] Department of Defense Fiscal Year(R) 2017 President's Budget Submission, February 2016[Z].
- [60] Honea E C, Ebberts C A, Beach R J, et al. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd: YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(15): 1203-1205.
- [61] Yi J, Moon H J, Lee J. Diode-pumped 100-W green Nd: YAG rod laser[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(18): 3732-3737.
- [62] Dudley D R, Mehl O, Wang G Y, et al. Q-switched diode-pumped Nd: YAG rod laser with output power of 420W at 532nm and 160W at 355nm[C]//Proceedings of SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices. 2009: 71930Z.
- [63] Sascha W, Hangst A, Stolzenburg C, et al. Frequency doubled high-power disk lasers in pulsed and continuous-wave operation[C]//Proceedings of SPIE 8239, High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications. 2012: 823907.
- [64] Meier T, Willke B, Danzmann K. Continuous-wave single-frequency 532 nm laser source emitting 130 W into the fundamental transversal mode[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3742-3744.
- [65] Avdokhin A, Gapontsev V, Grapov Y S. 170W continuous-wave single-frequency single-mode green fiber laser[C]//Conference on Fiber Lasers IX - Technology, Systems, and Applications. 2012.
- [66] Favre S, Sidler T C, Salathe R P. High-power second harmonic generation with free-running Nd: YAG slab laser for micromachining applications[C]//Proceedings of SPIE 4088, First International Symposium on Laser Precision Microfabrication. 2000: 195-195.
- [67] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, et al. SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550W of average output power[C]//Proceedings of SPIE 8964, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIII. 2014: 896407.
- [68] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [69] Röcker C, Loescher A, Bienert F, et al. Ultrafast green thin-disk laser exceeding 1.4 kW of average power[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 5522-5525.
- [70] Russbuedt P, Mans T, Hoffmann H D, et al. 1100 W Yb: YAG femtosecond Innoslab amplifier[C]//Proceedings Volume 7912, Solid State Lasers XX: Technology and Devices. 2011: 79120R.
- [71] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-rod Yb: YAG amplifiers for high average and peak power lasers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3941-3944.
- [72] Li Feng, Wang Nana, Yang Zhi, et al. High-energy femtosecond laser system based on a fiber laser seeder, Yb: YAG single crystal fiber and chirped volume Bragg grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17: 065103.
- [73] Injeyan H, Goodno G D. High-power laser handbook[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2011.
- [74] Yasuhara R, Kawashima T, Sekine T, et al. 213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd: glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1711-1713.
- [75] Fan Zhongwei, Qiu Jisi, Kang Zhijun, et al. High beam quality 5 J, 200 Hz Nd: YAG laser system[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6: e17004.
- [76] Bayramian A, Armstrong P, Ault E, et al. The mercury project: a high average power, gas-cooled laser for inertial fusion energy development[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 52(3): 383-387.
- [77] Gonçalvès-Novo T, Albach D, Vincent B, et al. 14 J/2 Hz Yb³⁺: YAG diode pumped solid state laser chain[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 855-866.
- [78] Banerjee S, Mason P D, Ertel K, et al. 100 J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2089-2092.
- [79] Liu Tinghao, Sui Zhan, Chen Lin, et al. 12 J, 10 Hz diode-pumped Nd: YAG distributed active mirror amplifier chain with ASE suppression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21981-21992.