

激光与光电子学进展

高功率碱金属激光器的发展和技术挑战

齐予*, 易亨瑜, 黄吉金, 匡艳

中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 高功率二极管抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的功率已经达到 10 kW 量级,具有满足军用激光武器对光光转换效率、质量、体积等高要求的潜力。碱金属蒸气激光器具有可定标放大且保持良好光束质量特性的优点,在过去的十多年中一直是研究热点。首先简介 DPAL 的原理和研究概况,接着回顾 DPAL 发展历程,评估 DPAL 目前取得的重要成果和发展前景,然后分析面临的技术挑战和影响因素,在提出解决方法的同时分析不同方法的优缺点,最后探讨满足实战化要求所面临的单项技术和系统问题的方法。

关键词 激光器; 高功率激光; 激光武器; 二极管抽运碱金属蒸气激光器

中图分类号 TN24; TJ95; E928

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0700003

Research Development and Technological Challenge of Alkali Lasers with High Power

Qi Yu*, Yi Hengyu, Huang Jijin, Kuang Yan

*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract The power of diode-pumped alkali laser (DPAL) with high power has reached 10 kW and shows great potential because of its high optical-optical conversion efficiency, light weight, small size and so on. Alkali vapor lasers are under extensive investigation and development during the past decade because of their potential for scaling to high power and maintaining good beam quality. First, the basic principles and research development of DPAL are introduced. Then, a historical review of the alkali laser research and development, and the most important achievements and future perspectives in this field, are presented. Besides, the obstacles in research are analyzed. The solutions are summarized and their deficiencies are presented. Finally, the future development of alkali vapor laser is discussed.

Key words lasers; high-power laser; laser weapon; diode-pumped alkali lasers

OCIS codes 140.3430; 140.3480

1 引 言

高功率激光(HPL)武器需要功率达到 0.1~1 MW 量级,目前仅有化学激光器的功率能够达到 MW 级^[1-2],但存在体积大、质量大、涉及废气排放和

有毒工作介质等问题,严重限制其军事应用。激光二极管阵列(LDA)可提高功率水平,但光束质量难以保证,多用作抽运光源;固体激光器,如板条、薄片和光纤激光器具有高效紧凑和高光束质量的优势,但这类激光器的热管理、材料破坏阈值以及非

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-07-16; 录用日期: 2020-08-10

基金项目: 激光情报研究课题(B-2019-JKW-XX-01)

*E-mail: 13881100776@139.com

线性效应等因素对光束质量和功率的影响较大,单路最高输出一般在 10 kW 量级,多采取合成方式来获得 100 kW 量级功率。2010 年开始重点发展的激光光源有三类,包括轻型、紧凑的光纤合成激光器(FCL)、分布式增益激光器(DGL)和二极管抽运碱金属激光器(DPAL)^[3]。2011 年美国导弹防御局(MDA)取消了以化学氧碘激光器为主战光源的战略机载激光武器项目。在对 10 kW 级光纤激光器、浸入式液体激光器、薄片激光器和碱金属激光器的当时发展水平和未来 MW 级定标放大潜力进行评估后,为满足机载和高空无人机载对激光器质量、尺寸功率比的苛刻要求,期望激光器的质量功率比能够达到 1~2 kg/kW。早在 2003 年 Krupke 等^[4]就预测碱金属激光器能产生远远超过 100 kW 的单孔径高质量光束,是 MW 级激光器主要的潜在候选者。MDA 也认为 DPAL 是一条新的通向高效、电驱动、紧凑、小质量高功率激光器的有效路径,并一直积极推进 MW 级定标放大的研究。采用高亮度的 LDA 抽运量子亏损极小的碱金属蒸气可以获得高的转换效率,光光效率达到 60% 的 MW 级 DPAL 在理论上是可行性的,其显著优点是质量/功率比和体积/功率比将大大优于其他类型的高功率激光器。

2 原理和基本特点

出于实现有效粒子数反转的考虑,碱金属激光器的研究主要集中在 K、Rb 和 Cs 元素。位于元素

周期表 IA 族的碱金属原子能级结构均相似,最外层均只有一个价电子,能级间隔适应二极管抽运线宽,由于激发态与上能级间隔很小(见图 1),激发态粒子极易快速弛豫到激光上能级,能量损失很少,使得碱金属原子 D 线激光跃迁有极高的量子效率(K、Rb、Cs 的量子效率分别为 99.6%, 98.1%, 95.3%, 见表 1,相比较 Nd:YAG 激光器的量子效率仅为 76%),故理论上碱金属激光器易获得高增益,可实现近衍射极限的光束质量。

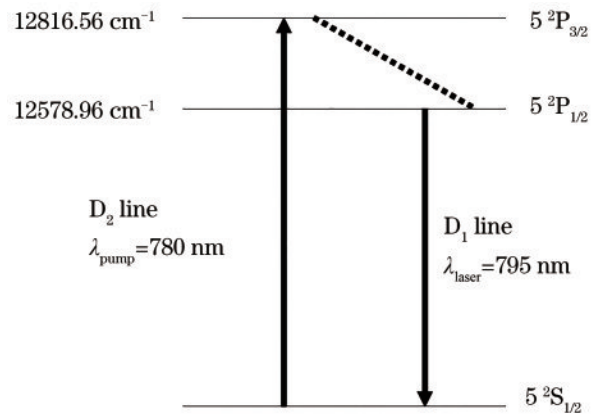


图 1 二极管抽运碱金属激光器的能级和跃迁(Rb 原子)
Fig. 1 Diagram of energy level and transition for atomic Rb DPAL

目前很多研究工作集中在 Rb 激光器,由于其 D 线波长较长,无法采用一般的抽运光源,而砷化铝镓(AIGaAs)激光二极管(LD)覆盖的跃迁范围与 Rb 激光具有较好的波长匹配性,是一种较好的抽运光源。

表 1 碱金属 D 线特性比较

Table 1 Comparison of characteristic of D line for different alkali atoms

Alkali atom	Pump wavelength for D ₂ line /nm	Lasing wavelength for D ₁ line /nm	Quantum efficiency /%
Na	589.16	589.75	99.8
K	770.11	766.70	99.6
Rb	780.25	794.98	98.1
Cs	852.35	894.59	95.3

DPAL 与化学、固体和光纤等高功率激光器相比有许多优良的特性:量子效率高、热负载低,可降低热处理的复杂性;光束质量好、气体介质均匀性高,光束质量可接近衍射极限;介质的流动性也减缓了出光期间由热-光畸变导致的光束质量下降趋势;能通过简单地增加增益激光介质的体积和抽运源的数量来定标高功率,非线性效应和光学损伤的影响弱,具备可定标放大到高功

率的潜力;所使用的化学物质无毒、无危险,采用密封式结构,和化学氧碘激光器(COIL)相比,无须采用庞大的引射系统,便于工程实现,安全性高且结构设计相对简单;碱金属激光器波长均位于大气窗口内,输出波长满足大气窗口的要求,减少了对自适应光学等的依赖;最重要的是连续出光时间长,对于激光武器的实战化具有重要价值。

3 发展路线及关键技术突破

最早的碱金属蒸气激光器设想可以追溯到 1958 年 Schawlow 和 Townes 提出的以 K 蒸气为介质的光放大系统;1961 年 Jacobs 等^[5]首次测量到 Cs 蒸气中的相干光放大;1962 年在 $7.18 \mu\text{m}$ 获得了 μW 量级的连续输出。表 2 给出了早期碱金属蒸气激光的主要成

表 2 碱金属蒸气激光早期概念研究阶段的主要成就

Table 2 Main achievement on concept research of DPAL in the beginning

Year	Team	Gain medium	Main contribution
1958	Townes	K	Master amplified design for visible light
1961	Jacobs ^[5]	Cs	Experiment of coherent light
1962	Rabinowitz	Cs	Cs DPAL CW output with extremely low power

3.1 国外 DPAL 的研究

在前期原理性研究之后,碱金属激光器向更高功率水平的发展大致可分为三个阶段:第一阶段采用钛宝石激光抽运,追求高抽运吸收率,验证高全光效率;第二阶段采用二极管抽运,解决吸收线宽问题,提高输出能量和系统稳定性;第三阶段利用新型增益介质提高吸收效率,在结构设计上不断优化,在物理与工程设计上同时突破限制高功率 DPAL 的各类技术挑战。

3.1.1 早期研究成果

在美国空军军官学校(UAFA)、高能激光联合技术办公室(HEL JTO)、空军科学研究办公室、空军研究实验室(AFRL)资助下,2001 年 Krupke 提出采用二极管抽运碱金属蒸气激光器的概念,2002 年证明光抽运 Rb 原子激光器运行在 795 nm 共振线上,金属 Cs 由基态被抽运到 $6^2\text{P}_{3/2}$ 态,产生 $\text{Cs}(6^2\text{P}_{1/2}) \rightarrow \text{Cs}(6^2\text{S}_{1/2})$ 的跃迁,波长为 894.6 nm,这是第一个 DPAL 的设计方案。2005 年采用多模二极管抽运 Rb 蒸气,首次实现了真正的 DPAL,输出激光约 1 mW。对于提高功率当时面临三个主要问题:一是如何优化抽运结构,提高抽运能量吸收效率;二是在 D_2 跃迁吸收谱线线宽很窄的情况下如何提高抽运光吸收效率;三是如何提高反转粒子的利用率。

2006 年 Zhdanov 等^[9]采用相干公司的单纵模 Ti:sapphire 激光器,实验证明 DPAL 在高抽运吸收率条件下可获得很高的全光效率和很好的光束质量。2007 年利用平面衍射光栅外腔对抽运源进行光谱压窄,得到线宽为 0.027 nm 的抽运光,LDA 线宽压窄到 11 GHz,可以很好地与 Cs 的吸收线宽(采

就。随后对碱金属蒸气激光的跃迁系数、精细结构弛豫速率、能量碰撞转移、放大自发发射等进行了广泛研究^[6-7],但文献中主要对小功率水平技术线路进行探索,由于缺少高功率、窄带、可调谐抽运光源,实用型高功率碱金属激光器发展缓慢。直到 2000 年高功率、高效率 LD 的出现,Beach 等^[8]提出了采用 LD 抽运实现碱金属激光定标放大获得高功率的概念。

用 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 缓冲气体加宽)相匹配^[10]。用特殊微透镜阵列对 16 W 的 LDA 端面抽运光进行光束整形,抽运 2 cm 长增益介质 Cs 蒸气池,获得 10 W 的基模连续输出,光光效率高达 62%,最高斜率效率 68%;同年,实现了 8 W 和 17 W 的 Rb 激光连续输出。2008 年在增益介质蒸气池中利用氦代替乙烷作为跃迁缓冲气体,采取多个二极管抽运的方式,实现了 894 nm 波长 48 W 激光输出^[11-12]。表 3 给出这段时期取得的主要成果。2009 年 Zhdanov 小组^[13]又成功使用 15 组体布拉格光栅(VBG)外腔压窄稳频的窄带 LDA,横向抽运 Cs 蒸气,获得斜率效率为 43%、全光效率为 31%、最高输出功率为 49 W 的 Cs 激光。

2010 年,美国通用原子公司的 Zweiback 团队利用 VBG 压窄叠阵二极管模块,通过液体传导冷却,实现 145 W 的 Rb 激光输出。同年采用固体传导冷却方法实现了 207 W 的激光输出。

日本的川崎重工早在 2005 年就开始 DPAL 的研究^[14],并于 2006 年出光,2009 年功率达到 12.1 W。2011 年在日本国防部支持下,东海大学和川崎重工联合在理论和模拟方面进行了研究。

3.1.2 两个里程碑成果

2008 年在 MDA 的资助下,劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)实现了无碳氢化物 Rb 激光器定标放大完整系统^[15-16],得到 100 W 峰值功率、100 μs 脉宽、3 cm 增益单元长度的激光输出。这一成果对定标放大系统具有里程碑意义:

1) 该系统作为第一个无碳氢化合物但可实现百瓦量级峰值功率的 DPAL,是真正实现连续运转流动蒸气单元的 DPAL,该研究进一步证明了功率

表 3 碱金属激光器功率快速提高时期的成果

Table 3 Achievement on power of DPAL during fast improving period

Year	Team	Gain medium	Pump power /W	Output power /W	Key technology
2003	Krupke ^[4]	Rb	0.5	0.028	—
2005	Ehrenreich	Cs	0.4	0.13	—
2006	Zhdanov ^[9]	Cs	0.57	0.35	—
2007	Zhdanov	K	0.86	0.014	—
2007	Zhdanov ^[10]	Cs	16	10	—
2008	Zhdanov ^[11]	Rb	37	17	Dual side pumped
2008	Zhdanov ^[12]	Cs	100	48	Dual side pumped
2008	Zhdanov	Cs	200	28	End pumped
2008	Zhdanov	Cs	—	1.45	Amplifier
2008	Hostutler	Rb	0.05	0.33	Amplifier
2009	Zhdanov ^[13]	Cs	157	49	End pumped/unstable cavity
2010	Zhdanov	Cs	5	25	End pumped/amplifier
2012	Bogachev	Cs	2000	1000	Dual side pumped/flow gas
2016	Pitz	Rb	168	571	Amplifier/flow gas
2016	Pitz	K	2750	1500	Flow gas

定标放大的技术可行性；

2) 这是目前基于超高功率水平的普通 LDA 实现 MW 量级 DPAL 的唯一可行设计方案,其他 DPAL 结构都需使用 10~20 GHz 范围的激励源,且其他 DPAL 常因体积大、结构复杂、价格昂贵等难以定标放大；

3) 首次使用了可根据不同抽运光而按比例放大的结构,这是所有定标放大系统的主要部件,为此研制了高性能 36 层氧化锆/氧化铝镀膜蓝宝石。该 DPAL 系统还可进一步对不同单元长度进行实验,以确定最终功率定标放大系统中 Rb 最佳密度数值等指标。

2012 年 DPAL 取得第二个里程碑成果。俄罗斯联邦核物理中心 (Russian Federal Nuclear Center) 采用流动热管理方法实现 1 kW 量级连续 Cs 激光输出,光光转换效率达 48%,抽运光功率为 2 kW,工作物质为 He-CH₄-Cs 混合物质,采用双侧端面抽运闭循环腔,抽运光线宽为 0.7 nm,蒸气流速为 20 m/s,采用抽运激光直接加热方法^[17]。这是首次关于采用横向抽运流动介质方法的公开报道,演示了流动散热的优越性。

3.1.3 近期研究成果

自 2010 年至 2012 年,多个团队的研究加速了 DPAL 的高功率进程^[17-21]。但是直到 2013 年只有 AFRL 和俄罗斯核物理技术研究所实现了闭环循环流动介质 DPAL^[22-23],但工程实现方式、流场结构、

气动效应等实验参数均未公开。

2013 年 LLNL 通过放大增益池的尺寸、改进强光部件和光学涂层,获得了连续运行 4 min 的 3.91 kW 功率;2014 年改进增益室窗口并采用增益室波导,首次实现 10 kW 功率出光。并提出 10 kW 级非稳腔概念设计,增益室棱形窗采用“之”字形的光路,以消除抽运激光的不均匀性^[24-25]。图 2 是 LLNL 的大功率 LD 抽运源。2015 年输出激光功率达到 13 kW^[3]。通过对增益介质的温度控制技术进行探索,获得了较高的光光效率^[26],DPAL 累计运行时间大于 100 min,无系统性能下降。



图 2 LLNL 研制 DPAL 所采用的 LD 抽运光源
Fig. 2 Pumped diode laser used in DPAL by LLNL

2015年以色列对超音速 DPAL 进行了建模和仿真^[27]。对采用氦气和甲烷为缓冲气体的 Cs 和 K 激光进行了计算,对 35~700 kW 的仿真计算表明,效率最高可以达到 82%,这引起了军方的重视。

2016年 AFRL 验证了约 2 kW 的 K 激光^[28],光光效率达到 60%,当时 MDA 认为 DPAL 和 FCL 是最具潜力的战略反导激光。

2016年,在美国能源部(DOE)资助下,英国西汉普顿大学研制出如图 3 所示的圆形光斑为 3 kW、矩形光斑为 4 kW 的碱金属激光器抽运光源^[29]。

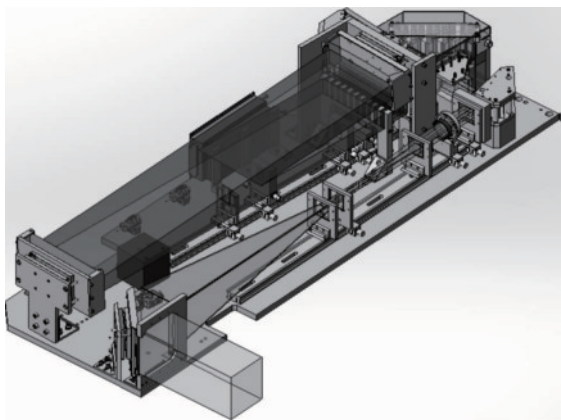


图 3 DPAL 抽运光源模型^[29]

Fig. 3 Model of pumped laser for DPAL^[29]

2016年 AFRL 在 MDA 和 HEL JTO 资助下,对 K、Rb、Cs 单路、双路进行实验。采用 21 路光纤耦合模块(功率 719 W),Rb 激光输出达 571 W。另外 K 激光达到当时最高的 1.5 kW,光光效率为 50%^[28,30]。

2018年在定向能联合转化办公室(DE-JTO)支持下,Zhdanov 等^[31]对 K 激光器进行分析和实验,对窗口污染问题和增压等进行了研究。

2018年日本东航大学、川崎重工提出环型抽运布局^[32-34],该布局可以同时采用数十个 LD 对增益室进行抽运,理论计算 8 路,而实验验证 4 路。理论计算结果是:输出功率达 100 W 量级、光光效率为 55%、8 路环型 LD 布局、单 LD 功率为 30 W。实验结果是:分光为 4 路(单路 30 W)、输出功率为 5.2 W。实验仍然仅针对低功率 DPAL,对高功率 DPAL 未开展实验。

基于如图 4 所示的 DPAL 架构^[35]所具有的功率可定标放大特性,2019年到 2020年初,为获得高功率 DPAL 输出,抽运源理论研究和工程研制也进一步受到重视,如俄罗斯 Bliznyuk 等^[36]对抽运源的优

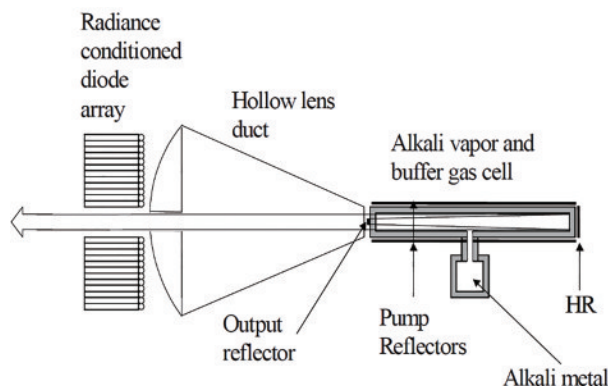


图 4 非稳腔 DPAL 功率定标放大架构^[35]

Fig. 4 Architecture for DPAL power scaling^[35]

化开展了研究,Wallerstein 等^[37]对三维动力学模型的理论、建模和系统进行了比较研究。

3.2 国内 DPAL 的研究

国内国防科技大学、中国科学院电子学研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国工程物理研究院、西南技术物理研究所以及浙江大学等均在 DPAL 领域开展了研究^[38-40],主要研究包括理论模拟、仿真建模和低功率实验室验证等。

2006年深圳大学、北京工业大学、浙江大学、中国科学院电子学研究所进行了理论和实验研究,首次实现 Rb 激光 2.8 W 线偏振输出。2011年国防科技大学在国内首次实现 Rb 出光^[41]。2012年中国科学院电子学研究所实现 Rb 出光;国防科技大学首次实现新型 Rb+Ar 准分子抽运出光。此后国内开始对 DPAL 抽运源、抽运模式、流动介质 DPAL 模型、参数诊断测试、高能级效应与电离过程等开展系统研究^[42]。

2013年中国科学院电子学研究所 Cs 激光在国内首次出光。中国科学院大连化学物理研究所采用双光子技术抽运 Rb 蒸气,获得 420 nm 的蓝光激光输出;其进一步对四波混频等机制进行深入分析,另外研究了抽运光脉冲能量对蓝光出光功率和效率的影响,以提高总效率^[43-45]。国防科技大学基于 Rb 蒸气粒子数密度检测方法开展了 DPAL 重要运行参量,如碱蒸气粒子数密度、介质温升等的诊断测试研究,这对于激光器性能分析和设计具有重要指导意义。

2014年国防科技大学 Rb 激光实现 48 W 输出。通过基于光电流法的 Rb 蒸气激光器电离度测量研究,表明在高强度抽运条件下,DPAL 增益介质的电离过程应引起重视^[46]。

2015年国防科技大学开展二极管抽运亚稳态惰性气体激光器(DPRGL)研究。实验表明,可以单独充入100~200 kPa氦气以实现有效的粒子数弛豫。DPRGL继承了DPAL的诸多优势,介质稳定性高,不采用烃类缓冲气体,一定程度减轻了增益介质与缓冲气体的反应物带来的窗口污染等负面影响,但仍需解决与DPAL类似的高浓度基态亚稳态原子的放电激励、线宽匹配等问题。

2018年浙江大学对碱金属蒸气激光及其放大器的稳态和含时特性进行了研究。建立了高功率放大器基本模型,提出放大区域温度的简化算法。建立了纵向抽运DPAL放大器和横向单端、双端抽运DPAL的三维温度模型。

2019年中国科学院电子学研究所采用平面光栅外腔压窄线宽,得到中心波长为766.5 nm、线宽为0.12 nm抽运光,获得了线偏振钾激光输出,中心波长为769.9 nm,功率为138 mW^[47]。

2020年前后,国内对双波长DPAL开展了研究,并已经获得接近1 W的铷-铯激光输出^[48]。目前国内尚未见大功率DPAL的报道。

由于DPAL始终面临二极管线宽与碱金属原子吸收线宽不匹配、高温下烃类缓冲气体与碱金属原子发生化学反应等困难,2009年伊利诺伊大学和美国航空航天局提出了一种基于碱金属-稀有气体复合受激态准分子宽带抽运碱金属激光器(XPAL)的概念。XPAL与DPAL相比最突出的优势在于吸收光谱显著增宽,而DPAL只吸收窄线宽的中心抽运光。XPAL的出现,在一定程度上解决了DPAL吸收线宽瓶颈的问题。XPAL的化学机理比DPAL复杂,同时碱金属和惰性气体形成的准分子吸收系数小,使得效率较低,工程设计方面还应考虑吸收程的要求。2012年,国防科技大学对碱金属-稀有气体准分子激光器进行了研究,建立了以Rb-Ar准分子为增益介质的四能级XPAL连续运转含时速率方程模型。

4 军用高功率DPAL的发展

高功率激光一直得到军方高度关注^[49],美国空军(AF)和MDA均开展了高功率军用DPAL研究^[50]。美国空军研究实验室2009年开始小规模预研创新型DPAL激光器,希望研制出满足飞行要求的200 kW激光器,与陆基和海基相比较,空基激光器对于体积和质量的要求更加苛刻。从2019年到

2020年美国国防部一直将DPAL和FCL作为创新激光技术进行研究。2010年MDA计划将DPAL作为最具潜力的反导光源;2011年他们再次强调DPAL是一种高效率、全电驱动、紧凑轻质的高功率激光器,并大幅增加投资,完成了连续运行低、中功率验证。2012年美国空军研究院实现kW级输出。2013年军方开始重视窗口污染问题,专题研究光学质量薄膜镀膜技术。2014年功率超过4 kW。2015年试验台装置突破10 kW,开始检测运行时间超过100 min时系统组件性能的检测。2016年AF和MDA开始新一代、高流动性碱蒸气循环器的设计和制造,通过增大增益室尺寸,DPAL单个增益室功率达到16 kW;2018年DPAL功率达到30 kW,电光效率超过40%,光束质量小于1.5倍衍射极限;2019年AF和MDA开始计划完成下一代DPAL架构的实验室验证。

总体上,MDA的计划是以2022年度为分水岭,在此时间点以前,以工业化激光器的定标放大为主,此后进入到战略激光器的研制和部署。DPAL的大致计划是:2019年完成激光器定标放大和光束质量测量,2020年完成DPAL和FCL的初设评估,2021年完成激光器定标放大的实验室验证,2022年全面完成对各型激光器的功率和光束质量评估,2022年进行再决策,发展一种或两种战略激光器。

5 技术挑战与问题

MDA从2011年开始重点研制FCL、DGL和DPAL等三种激光器。FCL研究规模较大,参与团队较多,进展较顺利,而DPAL整体进度相比其他两类激光器,大约慢一个年度,功率水平约比FCL小一个量级。通过梳理现有研究成果,发现抽运源性能和系统结构是重要的影响因素,而抽运源的分布结构也将极大地影响激光器的整体尺寸,中高功率DPAL的发展将面临技术挑战,同时会受到一些不确定因素的影响。

5.1 热效应和流速问题

高功率激光一直面临热管理的技术挑战,热管理决定激光高效输出特性和光束质量。2003年Krupke等^[4]在理论上预测DPAL可定标放大到MW级,2011年国防科技大学对MW级的DPAL进行了仿真模拟^[41]。在工程实现过程中,解决热管理的难点之一在于如何同时保证高功率和高光束质量。加入缓冲气体后,对于抽运激光与输出激光同轴端

面抽运的 DPAL 一般具有较高的转换效率,即使沿腔长方向的抽运光不均匀,如果能够对横向温度梯度进行有效控制,也能够保证光束质量,但由于这种结构的散热取决于缓冲气体的热传导效率,为提高散热效率,谐振腔宽度一般在毫米量级,这对于提高输出功率非常不利。为得到高功率输出,抽运光功率密度必须极高,这将会增加抽运结构的复杂性。而对于横向抽运方式,原理上可以获得较高功率,为获得高光束质量,需要保证较高的抽运光均匀性,这对于抽运光特性和抽运模块的结构设计提出了限制。2007 年 Zhdanov 等^[10]在 Cs 激光实验时发现,当二极管光源连续抽运功率超过 30 W 后,热效应导致激光输出功率迅速下降。2010 年美国通用原子公司 Zweiback 等^[16]的研究表明,对于具有低热传导系数的气体增益介质必须采用流动散热方式,这也是化学激光器能够实现 MW 级功率输出的重要原因之一,同时也是能够实现单口径功率定标放大的重要物理基础。流动热管理一方面是发挥 DPAL 气体增益介质自身优势的必然选择,另一方面也是定标放大的必由之路。然而不同于化学激光器的低腔压状态,DPAL 需要充入一个大气压量级的缓冲气体,其流动热管理特性与前者也有本质差别,计算表明随着流速的增加,中性原子及时得到补充,热效应被大幅抑制,激光区域的温度显著降低,输出功率急剧增加,直至趋于饱和,因此适当提高流速有利于提高放大器的输出性能,但过度提速,性能不会继续提高。对流速、气动效应问题仍需进一步研究。

5.2 线宽压窄及谱线匹配问题

线宽压窄主要采用外腔法,也即在激光器腔外插入平面衍射光栅、棱镜、F-P 标准具、体布拉格光栅等色散元件^[26,39]。外腔压窄实质是利用色散元件的角色散特性,使特定波长反馈至 LD 的有源区,特定波长的纵模优先起振后达到饱和状态,这将导致 LD 增益曲线下降,抑制其他纵模模式,从而压窄线宽。针对二极管抽运所面临的谱线匹配问题,可以采用增大缓冲气体压强来加宽碱金属蒸气 D_2 跃迁吸收谱线,或压窄 LD 阵列抽运线宽来匹配低气压下碱金属吸收线宽的方式。当碱金属蒸气中不充入缓冲气体时,吸收谱线线宽的增加量取决于多普勒谱宽的增加量。当碱金属蒸气中充入高压 He 作为缓冲气体时,碱金属原子与缓冲气体原子之间的碰撞将显著加宽甚至重构吸收谱线,其线型拓展为

洛伦兹线型(压力展宽的典型值约为 0.15 MHz/Pa)。为获得高功率 DPAL,其抽运源一般需要采用二极管阵列,典型线宽在 1 nm 量级,须进行线宽压窄才能作为 DPAL 的抽运源。对于中低功率二极管阵列,采用的长焦快轴准直微透镜、高放大倍率扩束系统和倾斜柱面镜等虽然结构简单,但是无法用于大功率二极管阵列线宽压窄。近年来国内外对大功率二极管阵列线宽压窄进行了探索,由于棱镜色散能力不够、F-P 标准具无法承受大功率,光栅压窄技术得到了较广泛的研究,体光栅外腔法的可调谐范围小,线宽压窄技术受限于体光栅厚度,应用于高功率 DPAL 时需要对身体光栅增加复杂的冷却系统,另外体光栅内部温度梯度分布也会影响线宽压窄效果。传统面光栅外腔法的光束准直系统复杂、调节困难、损伤阈值低,难以满足大功率 DPAL 抽运需要,因此需要开发新型面光栅和体光栅外腔法等技术。2019 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出快轴准直镜-光束变换器-慢轴准直镜-反射式体布拉格光栅(FAC-BTS-SAC-RVBG)的外腔反馈光谱锁定结构,实验验证了中心波长为 780 nm、功率为 47.2 W、谱宽为 0.064 nm 的窄线宽,后续如果得到 kW 级窄线宽激光输出,将可以作为高功率 Rb DPAL 的抽运光源^[51]。西南技术物理研究所进行的种子光线宽理论研究以及中国工程物理研究院应用电子学研究所研发的 kW 级全光纤激光种子光线宽控制技术均可作为 DPAL 二极管阵列线宽压窄技术提供借鉴^[52-53]。目前实际压窄能力有限,匹配效率低,整体电光效率和光光效率远低于理论值。

5.3 电离问题

碱金属原子具有复杂的高能级结构和低电离能,这使其不能完全工作于简单的三能级状态,强抽运下会有多种不同的高能级跃迁和电离通道,激光介质将形成等离子体,强等离子体将对激光作用产生负面影响,这一问题在高功率定标放大时可能会变得更为显著。美国 Zhdanov 团队、以色列本古里安大学 Barmashenko、美国空军研究实验室 Madden 等对电离效应的研究表明^[54],电离会导致三能级状态原子浓度下降,进而导致激光器无法工作于最优原子浓度下,效率下降,同时等离子体也可能对抽运和激光产生吸收,增强的热效应将会增加对系统流速的需求,同时影响光束质量。理论估算表明:碱金属原子浓度为 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、抽运光强

为 10 kW/cm^2 时, 电离效应已经变得十分明显; 碱金属原子浓度约为 10^{16} cm^{-3} 、抽运光强为 100 kW/cm^2 时, 碱金属原子完全电离。2016 年国防科技大学团队研究表明, 引起 Rb 原子电离的主要因素是光致电离, 电离度与入射光的强度与频率密切相关, 并且随着工作介质温度的升高而增加。在早期研究中, 由于二极管抽运源的功率限制 (小于 100 W), 电离效应并不显著, 随着功率水平的不断提升, 在 DPAL 未来的功率放大过程中电离效应可能会成为一个限制因素。

5.4 其他问题

针对 1 kW 以上的高功率 DPAL, 除与其他类型激光器的工艺设计、工程研制和系统集成面临的问题类似外, DPAL 的限制因素还包括其他的一些特殊的物理和制造因素。

5.4.1 窗口污染和损坏问题

2018 年 Zhdanov 等^[31]对窗口污染问题的研究表

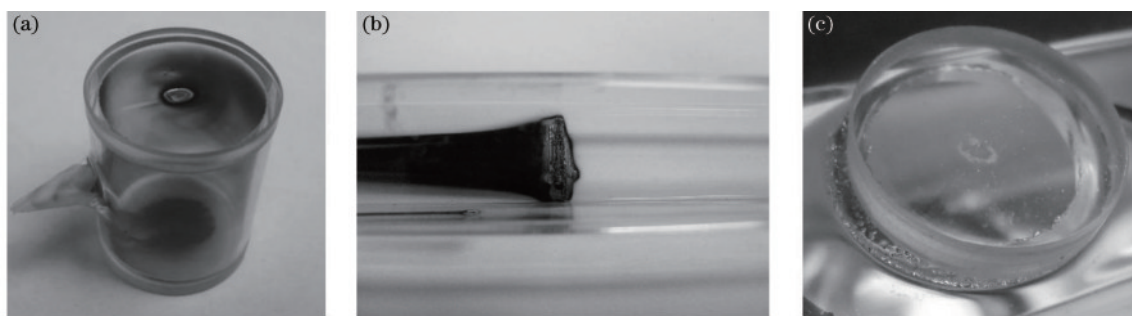


图 5 不同流场和不同缓冲气体下碱金属室窗口的损伤^[31]。(a) Cs DPAL 充入静态甲烷缓冲气体时的窗口损伤; (b) Cs DPAL 充入流动甲烷缓冲气体时的窗口损伤; (c) K DPAL 充入流动氦缓冲气体时的窗口损伤

Fig. 5 Window damage in alkali cells in different flowing field and buffer gases^[31]. (a) Window damage in Cs alkali cells filled with static methane buffer gas; (b) window damage in Cs alkali cells filled with flowing methane buffer gas; (c) window damage in K alkali cells filled with flowing He buffer gas

5.4.2 横向抽运光布局问题

2008 年和 2009 年 Zhdanov 等^[12-13]分别设计了横向抽运的稳定腔和非稳腔结构, 当通过侧面狭缝将 15 束 LD 阵列抽运光用透镜组以“X”形耦合进入蒸气池时, 增益介质中抽运光束与激光光束模式发生了严重不匹配, 导致吸收效率极低。2018 年日本的研究再次表明, 抽运光源应该存在使抽运光阵列与激光模式良好匹配的最佳排列方式。

5.4.3 碱蒸气室尺寸问题

浙江大学研究了最佳温度 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 下放大器输出功率与蒸气池长度依赖关系, 研究表明, 不同抽运功率下, 都存在一个最优长度使得输出功率最大。更高抽运功率需要更长增益介质, 但长度太长

明, 缓冲气体与碱金属的化学反应等引起的窗口污染具有不可逆性, 这会导致 DPAL 输出功率极大降低, 当窗口严重破坏时 DPAL 甚至完全无输出。窗口损伤如图 5 所示。当增益室温度升高至 $130 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 碱金属与乙烷之间的受激化学反应将产生碱性氢氧化物和碳, 造成窗口污染。针对污染的问题可能有两种解决办法, 一是使碱金属-乙烷激光器工作在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 之下, 但这会造成输出功率下降; 二是采用氦气作为缓冲气体, 如工作在高压下 ($>0.25 \text{ MPa}$) 的 Rb-氦激光器, 实验证明目前已在低功率水平解决了污染问题, 但高功率的效果如何还难以确定。MDA 认为窗口污染问题是 MW 级 DPAL 的核心难题之一, 增益发生器窗口对于激光器效率影响很大, 一般增益发生器单程透过率仅为 70% , 考虑到碱金属原子的腐蚀和吸附沾染特性, 可对窗口进行微纳结构高增透、抗吸附新型激光结构设计。

会导致放大光被额外的增益介质重新吸收, 因此选择一个合适的长度对蒸气池的设计至关重要。

5.4.4 温度和温度梯度问题

温度和温度场与流速相关, kW 级抽运增益介质内热梯度很高, 高温和高能量密度都会导致碱金属原子向更高的能级 (如 $n^2\text{D}_{3/2}$ 、 $n^2\text{D}_{5/2}$ 、 $(n+2)^2\text{S}_{1/2}$) 跃迁, 甚至发生电离, 这将消耗一部分抽运上能级 $n^2\text{P}_{3/2}$ 和激光上能级 $n^2\text{P}_{1/2}$ 的反转粒子数。蒸气池内的温度分布决定了碱金属原子各能级的粒子数密度分布、抽运光吸收截面、受激辐射截面、弛豫速率等, 对 DPAL 的输出性能影响很大。Cs 激光放大器的三维温度分布模拟表明: 蒸气池横截面中心点温度最高, 随着气体流速增加, 温差减小, 温度分布趋

于均匀;沿流动方向上,气体流速足够高时,温度首先快速增加,但很快达到稳定值,整体温度低于不流动的情况。对于横向抽运激光器,高功率激光器蒸气池内的三维抽运光强、激光光强以及温度分布必须予以考虑^[55]。

5.4.5 抽运模式问题

对于端面抽运主要考虑腔体结构,对于柱面抽运主要考虑抽运源的效率问题,特别是分布式柱面

抽运,其核心难题是光效率的提升问题。早期的端面抽运,虽有较高的转换效率,但热效应严重,另外这种结构也限制了抽运区域,要求抽运源有极高的功率密度。图 6 所示的侧抽运结构可以获得较大的抽运区域,抽运效率较高。特别是抽运光和输出光不同光路时,可一定程度上降低单元器件和系统复杂性。因此横向抽运方式结合新型谐振腔设计也值得关注。

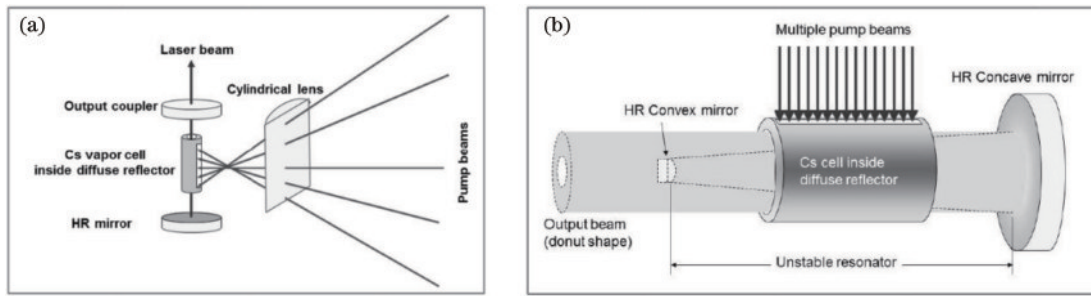


图 6 Cs 激光器稳定腔和非稳腔侧抽运示意图^[26]。(a) 稳定腔;(b) 非稳腔

Fig. 6 Design of transversely pumped Cs laser with stable resonator and unstable resonator^[26]. (a) Stable resonator; (b) unstable resonator

结合 10 kW 级 DPAL 的发展状况和面临的问题^[56-57],依照美国军用技术成熟度(TRL)1~9 级评

价体系对 MW 级 DPAL 的现有水平进行了评估^[58],见表 4。

表 4 MW 级 DPAL 主要设计参量及其 TRL 评估

Table 4 MW DPAL main design parameters and evaluation of TRL

Parameter	Value	Unit	TRL	Technological challenge
Gain cell length	30	cm	2	
Gain cell diameter	11	cm	2	Optimization of configuration and fabrication
Laser mode diameter	10.8	cm	2	
Rubidium density	4.3	10^{13} cm^{-3}	2	New type of control for density
Rubidium cold temperature	160	$^{\circ}\text{C}$	2	Uniformity control of temperature
Pump power	3.7	MW	1	
Output power	2.07	MW	1	Integrated technology of new LD with high efficiency and high matching rate
Output power irradiance	22.5	$\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$	1	
Optical conversion efficiency	55.8	%	1-2	
Waste heat density	17	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$	2	Management of waste heat
Gain medium flow velocity	30	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2	High stability control technology for medium flow velocity
Gain medium temperature rise	9	$^{\circ}\text{C}$	2-3	Very difficult for 3D temperature gradient

6 结 论

国内外发展现状表明,100 kW 级以军用为主的高功率 DPAL 仍然处于实验室研发状态,10 kW 级 DPAL 作为一种新型激光器,逐步进入实用化阶段,并推进了相关领域技术的发展。这类激光器具有体积小、效率高、光束质量好、中低功率热管理简单、量子效率极高、波长处于大气传输窗口等优点,

具备军用潜力,未来需要解决好抽运带宽、气体混合、压强、原子和缓冲气体种类、温度控制和几何结构等多项技术。

国内外最新技术的发展分析表明,10 kW 级 DPAL 已经完成系统研制,具有良好的光束质量。100 kW 级高功率 DPAL 在 MDA、AF 的支持和部分大学和科研机构的参与下,取得了一系列重要成果。在美国国防部支持下,2014 年 MDA 验证了

DPAL是高效率、具有定标放大潜力的候选激光器,完成了DPAL激光器相关部件(窗口、二极管和波导)的设计、制造和封装,改进了DPAL运行方式和性能,获得了超过4 kW的输出功率。2015年MDA和AF提出了大于10 kW且具有高效率 and 良好增益介质热控制的DPAL实验平台,对其性能研究发现,累计运行时间超过100 min后,没有出现任何系统组件的退化;完成了新一代30 kW实验平台的碱金属蒸气高速流动循环系统的设计和构建。2016年AF将10 kW DPAL实验室演示系统升级为30 kW级实验平台,用于激光测试平台输出功率提升、激光封装演示、系统坚固性设计;启动20 kW激光器模块的设计。2017年AF(原计划)基于30 kW的DPAL系统获得30%光电效率、1.5倍衍射极限光束质量;集成一套10×12 LDA,并完成120 kW的DPAL系统初步设计,目前输出功率估计值在10~100 kW量级。

MW级DPAL目前的研究处于理论分析、模拟仿真和某些部件研制阶段,根据美国军用TRL对比分析DPAL发展水平,可以看到总体研制水平不高于3级,系统中多项技术或指标提升困难极大。尽管早在2004年Krupke就提出了定标放大到MW级的可能性,提出预估输入功率为3.7 MW、输出功率为2.07 MW的设计方案,这一MW级DPAL设计思想富有吸引力,但系统研制面临诸多技术挑战。MW量级或更高量级装置面临工程挑战,特别是对于军用高功率DPAL可能会产生新的问题,由于低功率与高功率面临的技术和工程问题不同,低功率研究和研制经验对于研发高功率激光的参考价值有限,有必要对理论研究、实验与可定标放大的工程化进行进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Barton D K, Falcone R, Kleppner D, et al. Report of the american physical society study group on boost-phase intercept systems for national missile defense: scientific and technical issues[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76: S425.
- [2] Qi Y. Live round interception test analysis of airborne laser[J]. *High Energy Laser Research & Development*, 2010, 34(1): 1-3.
齐予. 机载激光实弹拦截试验情况分析[J]. *强激光研究与发展*, 2010, 34(1): 1-3.
- [3] Ren G G, Yi W W, Qi Y, et al. U.S. theater and strategic UVA-borne laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100002.
任国光, 伊炜伟, 齐予, 等. 美国战区和战略无人机载激光武器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100002.
- [4] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. Diode pumpable rubidium laser[C]//*Advanced Solid-State Photonics*, San Antonio, Texas. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2003: 121.
- [5] Jacobs S, Gould G, Rabinowitz P. Coherent light amplification in optically pumped Cs vapor [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(11): 415-417.
- [6] Sharma A, Bhaskar N D, Lu Y Q, et al. Continuous-wave mirrorless lasing in optically pumped atomic Cs and Rb vapors [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(3): 209-211.
- [7] Movsesyan M E, Shmavonyan S V. The effect of collisions on stimulated electron Raman scattering processes and parametric scattering of light in rubidium vapors [J]. *Optics Spectroscopy*, 1987, 63(3): 305-307.
- [8] Beach R J, Krupke W F, Keith Kanz V, et al. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(12): 2151-2163.
- [9] Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser [J]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 696-698.
- [10] Zhdanov B, Knize R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2167-2169.
- [11] Zhdanov B V, Sell J, Knize R J. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(9): 582-583.
- [12] Zhdanov B V, Knize R J. Alkali lasers development at laser and optics research center of the US air force academy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7005: 700524.
- [13] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14767-14770.
- [14] Endo M, Wani F. DPAL activities in Japan [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 92551S.
- [15] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs): an overview [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7005: 700521.
- [16] Zweiback J, Krupke W F. 28 W average power

- hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1444-1449.
- [17] 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.
- [18] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Scaling of diode-pumped Cs laser: transverse pump, unstable cavity, MOPA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7581: 75810F.
- [19] Zamoski N D, Hager G D, Rudolph W, et al. Experimental and numerical modeling studies of a pulsed rubidium optically pumped alkali metal vapor laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(5): 1088-1099.
- [20] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs): a review [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(1): 4-28.
- [21] Kissel H, Köhler B, Biesenbach J. High-power diode laser pumps for alkali lasers (DPALs) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8241: 82410Q.
- [22] Barmashenko B D, Rosenwaks S, Heaven M C. Static diode pumped alkali lasers: model calculations of the effects of heating, ionization, high electronic excitation and chemical reactions [J]. *Optics Communications*, 2013, 292: 123-125.
- [23] Zhdanov B V, Knize R J. Review of alkali laser research and development [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52: 021010.
- [24] Quarrie L O. The effects of atomic rubidium vapor on the performance of optical windows in Diode Pumped Alkali Lasers (DPALs) [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(5): 843-851.
- [25] Koenning T, Irwin D, Stapleton D, et al. Narrow line diode laser stacks for DPAL pumping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8962: 8962F.
- [26] Zhdanov B V, Knize R J. DPAL: historical perspective and summary of achievements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8898: 88980V.
- [27] Rosenwaks S, Yacoby E, Waichman K, et al. Supersonic diode pumped alkali lasers: computational fluid dynamics modeling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9650: 96500A.
- [28] Pitz G A, Stalnaker D M, Guild E M, et al. Advancements in flowing diode pumped alkali lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9729: 972902.
- [29] Hersman F W, Distelbrink J H, Ketel J, et al. Power scaling of a wavelength-narrowed diode laser system for pumping alkali vapors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9729: 972905.
- [30] Koenning T, McCormick D, Irwin D, et al. DPAL pump system exceeding 3 kW at 766 nm and 30 GHz bandwidth [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9733: 97330E.
- [31] Zhdanov B V, Rotondaro M, Shaffer M, et al. Lasing degradation effects in diode-pumped alkali lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10798: 1079807.
- [32] Endo M, Nagaoka R, Nagaoka H, et al. Output power characteristics of diode-pumped cesium vapor laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(12): 122701.
- [33] Endo M, Nagaoka R, Nagaoka H, et al. Scalable pump beam arrangement for diode pumped alkali lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10513: 105130K.
- [34] Wani F. High power laser activities at Kawasaki Heavy Industries, Ltd [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11042: 1104203.
- [35] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. DPAL: a new class of CW near-infrared high-power diode-pumped alkali (vapor) lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5334: 156-167.
- [36] Bliznyuk V V, Galstyan K P, Grigoriev V S, et al. Analyzing the spectral characteristics of laser diodes to optimize their pumping [J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, 84(1): 27-29.
- [37] Wallerstein A J, Perram G P, Rice C A. Excitation of higher lying states in a potassium diode-pumped alkali laser [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(8): 1-18.
- [38] Yu J H, Zhu Q, Xie W, et al. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(7): 46-51.
余建华, 祝强, 谢武, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸汽激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(7): 46-51.
- [39] Yang Z N, Wang H Y, Lu Q S, et al. Research development of laser diode pumped alkali lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 051405.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 051405.
- [40] Yang Z N, Wang H Y, Lu Q S, et al. Theoretical

- model and novel numerical approach of a broadband optically pumped three-level alkali vapour laser[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(8): 085401.
- [41] Yang Z N, Wang H Y, Lu Q S, et al. Modeling, numerical approach, and power scaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(6): 1353-1364.
- [42] Li Z Y, Han G C, Tan R Q, et al. Self-heated diode-pumped alkali laser with a microfabricated alkali cell[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 106105.
- [43] Tan Y N, Li Y M, Gong F Q, et al. 420 nm alkali blue laser based on two-photon absorption [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1002011. 谭彦楠, 李义民, 公发全, 等. 双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002011.
- [44] Cao R, Gai B D, Yang J, et al. Efficient generation of collimated frequency upconversion blue light in rubidium vapor [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 121903.
- [45] Yu H H, Chen F, Li Y B, et al. Research progress on the two-photon absorption alkali vapor laser[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 38-47. 俞航航, 陈飞, 李耀彪, 等. 双光子吸收碱金属蒸气激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 38-47.
- [46] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, et al. Diode pumped cesium vapor laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 9-10. 李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 半导体泵浦铯蒸气实现激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1): 9-10.
- [47] Ning F J, Tan R Q, Liu S Y, et al. Diode pumped potassium vapor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0215001. 宁方晋, 谭荣清, 刘松阳, 等. LD 抽运钾蒸气激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0215001.
- [48] Wang S Y, Han J H, An G F, et al. Demonstration of a dual-wavelength alkali laser with a mixed rubidium-cesium vapor cell[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124728.
- [49] Yi H Y, Qi Y, Huang J J. Development of ship-based laser weapons system[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(6): 834-839. 易亨瑜, 齐予, 黄吉金. 舰载激光武器的研制进展[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 834-839.
- [50] Wallerstein A J, Perram G, Rice C A. Excitation of higher lying energy states in a rubidium DPAL [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10511: 105112J.
- [51] Tian J Y, Zhang J, Peng H Y, et al. 780 nm diode laser source with narrow linewidth for alkali metal vapor laser pumping [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(9): 1123-1129. 田景玉, 张俊, 彭航宇, 等. 用于碱金属蒸气激光器泵浦的窄线宽 780 nm 半导体激光光源[J]. *发光学报*, 2019, 40(9): 1123-1129.
- [52] Jiang Z G, Wang Y, Han J H, et al. Effects of linewidth of seed-laser on output features of end-pumped alkali vapor amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0502004. 蒋志刚, 王澈, 韩聚洪, 等. 种子光线宽影响端面抽运碱金属蒸气放大器的输出特性[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0502004.
- [53] Wang Y S, Ma Y, Sun Y H, et al. 2.62-kW, 30-GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limit beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1215001. 王岩山, 马毅, 孙殷宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz 窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1215001.
- [54] Markosyan A H, Kushner M J. Plasma formation in diode pumped alkali lasers sustained in Cs [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(19): 193105.
- [55] Zhdanov B V, Rotondaro M D, Shaffer M K, et al. New results for temperature rise in gain medium of operating DPAL causing its degradation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10436: 104360B.
- [56] Wang Z H, Zhang J F, Zeng Z Q, et al. Hyperfine energy level splitting structure measurement of the excited state $6D_{5/2}$ for cesium atom [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030202. 王志宏, 张锦芳, 曾昭卿, 等. 铯原子激发态 $6D_{5/2}$ 的超精细能级分裂结构测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030202.
- [57] Yan D Y, Liu B W, Song H Y, et al. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508012. 闫东钰, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率光纤飞秒激光放大器的研究现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508012.
- [58] Department of Defense. Technology readiness assessment (TRA) deskbook [EB/OL]. 2009 [2020-05-30]. http://www.dod.mil/ddre/doc/DoD_TRA_July_2009_Read_Version.pdf.