

激光与光电子学进展

高能半导体泵浦碱金属激光器的发展和挑战(特邀)

许晓军*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 半导体泵浦碱金属激光器近年来发展迅速,其高能高效、轻量紧凑和单口径输出的优势日渐凸显。本文综述了碱金属激光器的技术特点,回顾其发展历程,重点对功率放大的关切因素进行了梳理和评估,同时对新兴的类碱金属激光器的发展进行了介绍。

关键词 激光器; 高能激光; 半导体泵浦; 气体激光; 碱金属激光

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232463

Development and Challenges of High Energy Diode Pumped Alkali Lasers (Invited)

Xu Xiaojun*

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Diode pumped alkali lasers (DPALs) have developed rapidly in recent years, with their advantages of high energy, high efficiency, compactness, and single-aperture operation becoming increasingly prominent. In this paper, the technical characteristics of DPALs are introduced, the development history is reviewed, and the critical factors for power scaling are discussed. In addition, the development of the recently emerged DPAL-like gas lasers is briefly introduced.

Key words lasers; high energy laser; diode pump; gas laser; alkali laser

1 引言

高能激光需要具有高平均功率(100 kW 至 MW)、高转换效率和高光束质量,同时面向各类机动平台和保障需求,需要采用电能驱动并具有高的功率质量比和功率体积比,即现代高能激光的发展需要满足“五高一电”的设计准则^[1-4]。历史上,化学激光器是唯一实现兆瓦级高光束质量输出的光源,主要得益于激光工质巨大的化学储能、高效超音速气动散热和大口径非稳腔模式提取,但其激光工质有毒且无法重复利用,低腔压运转需要庞大的压力恢复系统,这些严重制约其实际应用;继装载兆瓦级化学氧碘激光(COIL)的机载激光系统(ABL)在 2010 年完成最后一次飞行反导试验后^[5],美国导弹防御局(MDA)转向寻求电驱动轻量化光源的研制。进入 21 世纪,半导体泵浦全固态激光器(ASSL)成为高能激光发展的主流^[6],随着大半导体激光器在功率、效率和可靠性等方面的持续提升,在美国联合高功率固体激光(JHPSSL)、电驱动鲁棒激光

计划(RELI)等军方项目的支持下,同时得益于大规模激光工业市场的推动,以板条、盘片和光纤等为代表的全固态激光器得到快速发展,诞生了多型 10~100 kW 级的激光演示系统。受制于固体材料的热效应和有限的模体积,ASSL 单链路功率有限,实现 100 kW 以上的功率需要依靠光束合成。然而,随着合成路数的增加,系统复杂性大大提升,很难实现高光束质量,面向兆瓦功率仍然任重道远。

以“五高一电”为准则,回顾化学激光和全固态激光各自的优势,人们开始思考如何将二者进行有效的融合。2000 年初,美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 Krupke 教授^[7]提出半导体泵浦碱金属激光器(DPALs)的概念,采用大功率半导体激光器泵浦具有高量子效率的碱金属蒸气激光工质,实现单口径高能激光输出,并利用气体流动进行有效散热。DPALs 完美地将化学激光器的气动散热、光束质量与固态激光的电能驱动、高效紧凑相融合,是一种单口径输出的高能激光光源,因此也被称为“气固融合型激光”,从此开

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-12-10; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-12

通信作者: *xuxiaojun@nudt.edu.cn

启高能半导体泵浦气体激光繁荣发展的序幕。经过系统地评估,MDA认为DPALs是最有望达到其远景功重比预期(~ 0.5 kW/kg)的光源,具有兆瓦级输出潜力,将面向高空无人平台应用^[8]。2019年,美国国防部提出高能激光定标放大倡议(HELSEI),将DPALs列为其四条技术路线之一,以面向未来兆瓦级光源的发展需求^[9-10]。

作为典型案例,DPALs的成功推动了多种类型半导体泵浦气体激光的诞生和发展,最具代表性的包括半导体泵浦亚稳态惰性气体激光器(DPRGL)、碱金属-稀有气体准分子激光器(XPAL)和半导体泵浦纳米气体激光器(DPNGL)等。上述光源也被称为半导体泵浦类碱金属激光器,其提出原本是为了解决DPALs早期发展过程中所遇到的技术挑战,如窄谱吸收和高化学活性等。随着研究的持续深入,这些光源在高效输出、多谱段拓展等方面表现出各自的特色和优势。

2 半导体泵浦碱金属激光器

2.1 性能优异的激光介质

任何一种成功的高能激光背后都有其内在的物理基础,DPALs也不例外,相比于其他激光工质,碱金属原子具有非常优异的光学属性,从根本上奠定了高能输出的物理潜力^[11-13]。

1) 能级结构简单高效

DPALs采用碱金属蒸气作为激光介质,运转于碱金属原子最低的三个能态(基态 $^2S_{1/2}$ 、泵浦上能态 $^2P_{3/2}$ 和激光上能态 $^2P_{1/2}$),半导体泵浦光将基态粒子数抽运至 $^2P_{3/2}$ 态,在缓冲气体的碰撞作用下快速弛豫至 $^2P_{1/2}$ 态,与基态形成粒子数反转,实现激光输出。DPALs的能级结构具有两个特点:①极高的量子效率,以铷为例高达98.1%,从源头上支持高效运转和低热排放;②能量耗散小,能级结构简单,虽然存在诸如光激发、碰撞能量转移甚至电离等额外的能级弛豫通道,理论仿真认为在优化的浓度、泵浦和流场条件下,其能量耗散总体上是有限和可控的^[14-15]。

2) 发光能力迄今最强

在所有的高能激光工质中,DPALs的发光能力最强。以铷为例,外层单价电子是D线强电偶级跃迁,激光上能级的自发辐射系数高达 3.6×10^7 s⁻¹,在大气压级缓冲气体条件下,铷原子的激光发射截面是Yb³⁺的6个量级以上。强发光截面决定了两方面优势:①稀薄的原子浓度即可满足高效激光输出,通常激光路径上的原子柱密度达到 $10^{12} \sim 10^{13}$ cm⁻²即可,此时仅需对碱金属加热至100~200 °C范围即可产生所需的原子密度;②紧凑的增益体积,通常1 cm³的增益体积可支撑约10~20 kW的功率输出,增益结构非常紧凑。

3) 大气压级高压运转

DPALs需要充入缓冲气体,通常为氦气或甲烷,其作用是实现快速的精细结构碰撞弛豫,以及对吸收

谱线进行碰撞加宽实现对泵浦光的高效吸收。缓冲气压多在一至数个大气压之间,相比化学激光属于高压腔运转,具有以下优势:①碱金属原子的吸收谱宽被显著加宽,从真空条件下的pm级加宽至百pm量级,有效匹配大功率窄线宽半导体激光器所能实现的发射光谱宽度;②支持循环流动或者开环直排运转两种模式^[16-19],无需庞大的引射和压力恢复系统;③高缓冲气压增加热载能力,一般数10 m/s的流速即可实现有效散热,易于实现均匀流场。

当然,人们也曾质疑碱金属原子的高化学活性所带来的隐患。在工程上,碱金属元素的储存和操控技术与工艺已经发展得非常成熟,并且DPALs特有的高压氛围会进一步增强其化学稳定性。实际上,自研的数代循环系统已经连续运转多年,未发生任何污染和损坏^[20-21]。

2.2 发展历程和现状

DPALs的发展总体上可分为“原理验证”和“工程放大”两个阶段,下面分别进行阐述。

1) 原理验证阶段

2010年前主要为原理验证阶段,以美国利弗莫尔实验室(LLNL)、通用原子公司(GA)、空军军官学校(USAFA)和空军研究实验室(AFRL)等为主要研究单位,致力于开展基础而广泛的原理性技术验证,相继在10 W级规模下演示了钾、铷和铯激光输出^[22-28],验证了侧面泵浦、非稳腔和主振荡功率放大(MOPA)等功率放大结构^[29-35],并且对精细结构弛豫系数、激发态无辐射猝灭速率和原子碰撞加宽系数等一系列关键物理参量进行了完善测定。这一阶段取得的主要成果如下:①深化对DPALs运转机理的认识,初步明确了功率放大的物理潜力和参量设计基线。实际上,Krupke教授^[12]在DPALs诞生一年后就在SPIE会议上以《New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs)》为题报道了兆瓦级光源的概念和参量设计。时隔数年后回顾,当时的模型和思路是正确且富有远见的,这与碱金属原子简单的能级跃迁和准确的物理数据相关,决定了理论外推的合理性。②验证了高效率输出潜力,USAFA验证了光光转换效率优于60%的铯激光^[24],后演示了高效铷激光^[25]。考虑到当时条件下有限的泵浦功率和很难提升的模式匹配等因素,高功率泵浦DPALs的效率存在大幅的提升空间($\geq 80\%$),这与理论模型的预测是一致的。③推动了大功率窄线宽半导体激光器的发展,这一点至关重要,DPALs在发展前期虽然缓慢但持续推动了半导体厂商(如DILAS、Lasertel等)在7xx nm和8xx nm波段半导体芯片功率和效率的提升,同时对基于外腔的光谱压窄方案不断优化^[36-40],光谱品质和外腔效率持续提升,为大功率窄线宽泵浦源的发展奠定了坚实的基础。

2) 工程放大阶段

2010年,高能激光领域的评论专家Hecht^[41]在

Laser Focus World 杂志以《A new generation of laser weapons is born》为题对 DPALs 进行了专题报道,认为 DPALs 是机载兆瓦级光源极具潜力的方案,以面向助推段导弹防御。良好的物理潜力和原理演示的成功显然提高了美国军方对 DPALs 的关注。继 ABL 在最后一次飞行打靶后被搁置后,MDA 正式将 DPALs 纳入支持计划,重点资助 LLNL 开展高能 DPAL 系统的研制,并陆续通过全美公开招标的方式开展大功率窄线宽半导体泵浦源、流动介质碱金属增益发生器和抗腐蚀激光窗口等核心器件的创新研发,支持各种潜在的技术途径,尤其促进了半导体业界对泵浦源的研发投入,DPALs 的发展日渐繁荣。

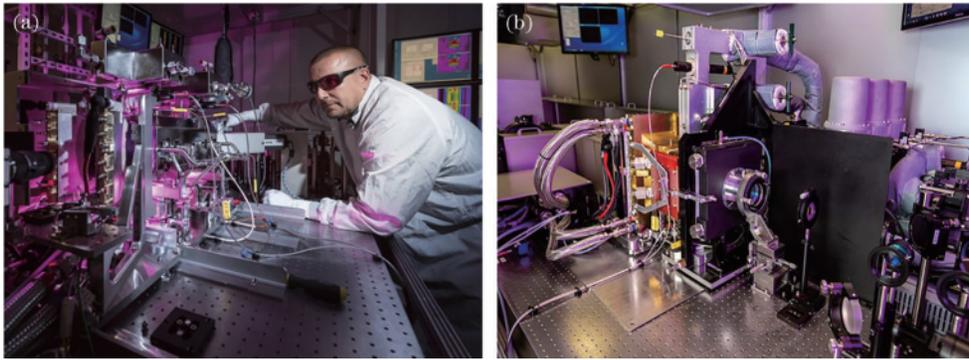


图 1 LLNL 的碱金属激光系统^[44]。(a)34 kW DPAL 装置;(b)新一代 DPAL 装置

Fig. 1 DPAL system in LLNL^[44]. (a) 34 kW DPAL apparatus; (b) new generation of DPAL system

AFRL 选择了和 LLNL 不同的技术路线,作为国际首次报道实现流动介质 DPAL 的单位^[46],AFRL 选择采用极窄谱宽(<0.1 nm)半导体泵浦低压含铯激光工质的方案,研制两代开环直排型碱金属增益发生器(图 2),采用泵浦激光和气流相互垂直的体系结构。在研究过程中 AFRL 分别验证了 DILAS、OptiGrate、QPC Lasers 和 nLight 等不同半导体公司的泵浦源(图 3)^[47],相继演示了

571 W 铷 MOPA 激光和 1.96 kW 钾激光,后者光光转换效率为 60%^[18]。值得一提的是,对于侧面泵浦结构,通用原子公司在 2011 年开展的工作具有非常重要的指导意义,利用光谱线宽、脉冲宽度和泵浦强度均与半导体稳态泵浦等效的固态光源作为替代泵浦源,成功演示了峰值功率达 100 kW 级的铷激光,斜率效率达到 75%,从物理上可靠验证了高效率 100 kW 级 DPAL 的可行性^[32]。

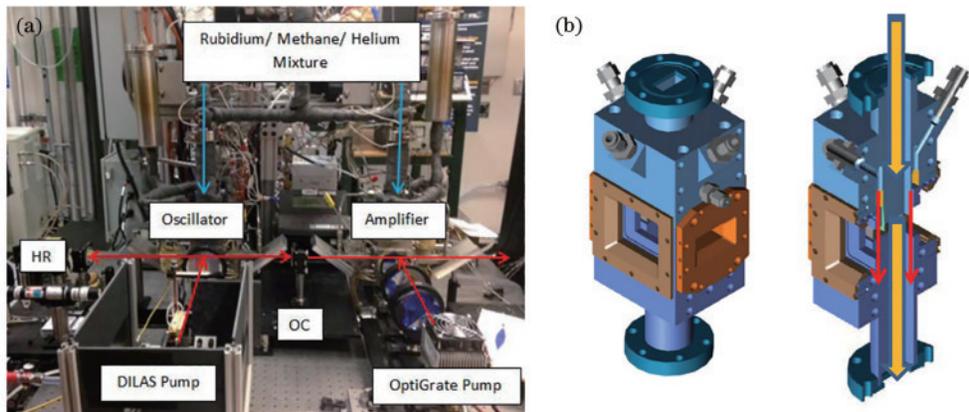


图 2 AFRL 的碱金属激光系统^[46]。(a)激光系统结构图;(b)原子腔室设计

Fig. 2 DPAL system in AFRL^[46]. (a) Layout of the laser system; (b) design of the atom cell

其他国家方面:俄罗斯于 2011 年底报道了循环流动的千瓦级铯激光[图 4(a)],曾一度引发学界关注和猜测,但未见后续报道^[16];以色列本·古里安大学和日本东

海大学等致力于三维先进模型仿真和小型循环流动 DPAL 的原理验证[图 4(b)]^[48-49];韩国和印度也分别于 2018 和 2019 年报道了 DPAL 的相关实验结果^[35, 50]。

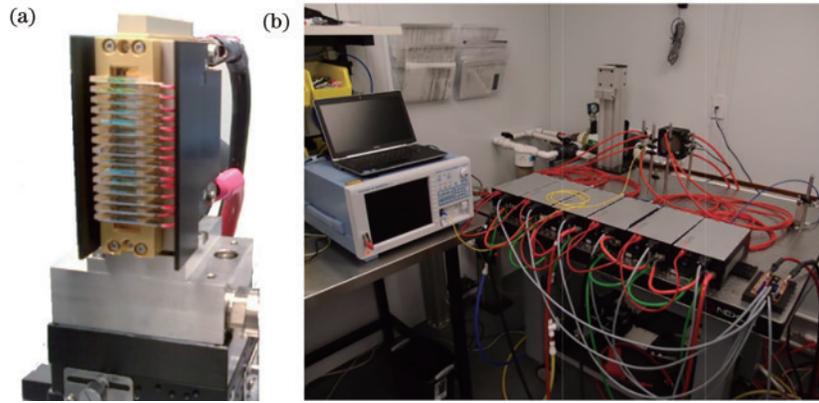


图 3 DILAS 公司的半导体泵浦源^[47]。(a) 巴条垂直阵列封装; (b) 光纤耦合封装

Fig. 3 DILAS semiconductor pump source^[47]. (a) Vertical bar array packaging; (b) fiber-coupled laser diode

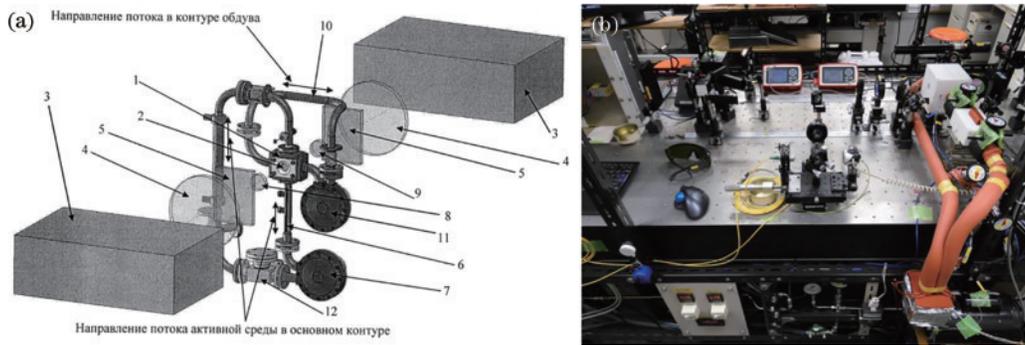


图 4 俄罗斯和日本 DPAL 装置。(a) 俄罗斯千瓦级铯激光^[16]; (b) 日本东海大学的 DPAL 实验平台^[48]

Fig. 4 DPAL apparatus in Russia and Japan. (a) kW-level Cs laser in Russia^[16]; (b) DPAL experimental platform in Tokai University, Japan^[48]

国内方面: 国防科技大学在 2017 年首次成功研制出循环流动碱金属增益发生器并实现出光, 面向 DPAL 功率放大开展系统研究^[20]; 中国科学院大连化学物理研究所开展高功率铷激光研究, 2021 年实现 108 W 激光输出^[51]; 2022 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道了应用于碱金属激光泵浦的千瓦级窄线宽半导体泵浦源^[52-53]; 苏州长光华芯光电技术股份有限公司致力于半导体芯片的研制, 通过对量子阱的优化设计, 近期将 780 nm 波段半导体激光芯片的电光效率提升至 71%、斜率效率 1.47 W/A^[54]; 中国科学院电子学研究所、中国工程物理研究院、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西南技术物理研究所等在功率放大、模型仿真、诊断测试和新技术探索等方面均开展了广泛而深入的研究^[55-62]。

2.3 功率放大的主要关切

根据 MDA 的远景规划, DPALs 是面向兆瓦级光源发展的, 但作为其主支持对象的 LLNL, 后期的功率提升呈现出放缓迹象, 据悉其在 2022 年达到 60 kW 功率, 距离其先期计划在 2019 年实现 120 kW 的目标存在差距, 虽然具体原因尚未披露, 但值得我们对 DPALs 功率放大可能面临的技术挑战进行思考。

1) 国际主流技术路线研判

从化学体系上, DPALs 存在两条技术路线, LLNL

的铷氦高压无烃方案和以 AFRL、GA 等为代表的低压含烃方案。前者放宽了对半导体泵浦源光谱线宽的要求, 例如在 15 atm (1 atm = 101.325 kPa) 氦气条件下约 0.3 nm 的泵浦线宽即可满足光谱匹配需求, 且排除增益介质发生化学反应的风险。但高缓冲气压使铷吸收截面下降近 1 个量级, 且纯氦导致的精细结构弛豫速率有限, 因此这种方案通常要求很高的原子浓度和泵浦强度, 可能引发较高程度的高能级弛豫和电离, 制约激光器功率的提升。相应地, 低压含烃方案对半导体泵浦源的线宽提出更为严格的要求 (如半峰全宽 ≤ 0.1 nm), 但烃类分子 (甲烷、乙烷等) 的存在能够基于更快的精细结构弛豫和无辐射猝灭抑制高能级过程, 使得激光器工作于近准二能级的理想状态, 理论预期效率更高。关键在于需要有效抑制碱金属和烃类分子之间的化学反应, 目前 AFRL 的实验结果部分证实了流动气体中增益介质能的化学稳定性。根据目前的公开报道, 在千瓦级功率水平下两种技术方案不分伯仲, 面向更高功率的定标放大, 需要进行更加深入的研究和论证。

2) 激光体系结构可拓展性

不同于板条、光纤激光等固有的泵浦约束结构, DPALs 的气体介质折射率低于固壁无法形成全反射, 如何将高功率半导体泵浦光高效注入增益介质, 同时

有效地匹配光腔功率提取和流动散热,是关系到 DPALs 能否实现按比例功率放大的核心问题。LLNL 早期报道采用独特的壁面全反射波导增益结构,虽能实现有效的长程泵浦约束,但泵浦、激光和气流三者共线,壁面、散热、波导功率承载等问题可能对功率放大存在制约。相比之下,泵浦、激光和气流相互垂直的结构(图 5),支持泵浦模块在空间上的线性拓展,有效降低光学元件功率负载,且将能量注入和对流散热空间解耦,具有良好的功率拓展性。同时,高能 DPALs 的设计同样面临选择单增益模块输出或者 MOPA 结构的问题,后者的高效性已被诸多研究团队在理论和实验上得到证实,实际中需要结合物理和工程进行综合研判。

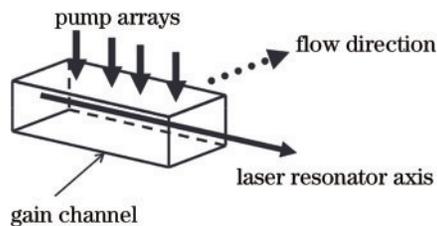


图 5 泵浦、激光和气流三者相互垂直的 DPALs 体系结构
Fig. 5 DPAL design with the pump laser, output laser, and gas flow vertical to each other

3) 重吸收和放大自发辐射

在 DPALs 定标放大过程中,随着增益体积的增加,两方面物理效应可能逐渐变得显著:重吸收(re-absorption)和放大自发辐射(ASE)。首先讨论重吸收过程,它是指基态原子对激光上能级(D_1 线)或泵浦上能级(D_2 线)所发射光子的再吸收过程,学界曾对此提出质疑,认为其不利于激光过程。实际上,在增益区

内, D_1 线的辐射光子只会被放大产生 ASE, D_2 线的自发辐射荧光会有一定概率被重吸收,这相当于对泵浦能量以荧光形式产生的耗散进行了再利用,使之部分再转换为激光输出,因此重吸收效应是有利的,且随着增益体积的拓展将变得更加显著,能够有效提升荧光抑制能力;对于重吸收问题需要重视的是增益路径上不能存在未泵浦的空区,而这在实际工程中是易于实现的。重点关切的是 ASE 效应,由于 DPALs 极高的增益系数($\sim 1 \text{ cm}^{-1}$),增益区体积的拓展可能产生较强的 ASE 甚至寄生振荡,虽然已有相关模型对 ASE 问题进行了讨论^[63-64],但仍待深化研究,以评估单增益模块的功率极限,这对于激光体系结构设计具有重要指导意义。

4) 核心器件性能持续提升

DPALs 的功率放大依托核心器件性能水平的持续提升。对于窄线宽半导体泵浦源,目前 7xx nm、8xx nm 波段芯片的电光效率存在可优化的空间,需要持续地提升电光效率、光谱品质和可靠性,同时优化封装方式、光谱控制策略和泵浦耦合系统。对于碱金属增益发生器,国外的报道没有对其细节和工艺的描述,主要报道了循环流动和开环直排两种类型:前者无需排放更加紧凑,但气幕和散热等工程问题难度较大;后者散热容易,但结构更加复杂,两者需要结合使用平台和应用场景综合研判。以透射激光窗口为代表的强光元件具有特殊的重要性,MDA 于 2013 年发布招标公告要求激光窗口需要同时满足高增透、低吸收、耐高温、抗腐蚀等要求,国际上已报道了多种实现方案,主要分为镀膜和微结构表面窗口两类^[65],后者以其单基质、抗吸附等特点具有独特的优势(图 6)。

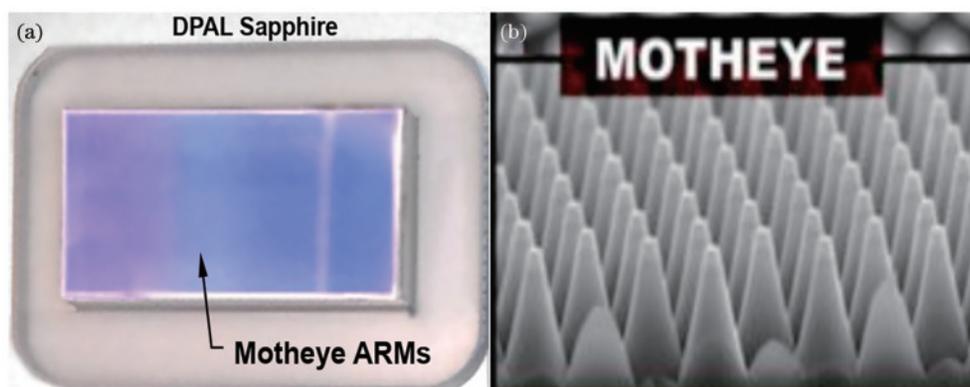


图 6 基于微纳表面的蓝宝石基质 DPAL 窗口^[65]。(a)实物图;(b)微纳表面放大图
Fig. 6 DPAL sapphire window based on micro/nano surface^[65]. (a) Physical image; (b) enlarged picture of micro/nano surface

5) 光束质量亟待深化研究

原则上,通过合理的体系设计,DPALs 预期能够工作在速度较低(10~100 m/s)的亚音速状态,虽然缓冲气压较高,但增益程比较短,具有实现高光束质量的物理基础。目前未见关于高功率 DPALs 光束质量的

公开报道,kW 级以上的实验数据均是在稳定腔下给出的。面向功率定标放大,必须对光束质量问题予以高度关注,这是个综合问题,涉及到流场设计、泵浦均匀性、非稳腔功率提取和窗口热畸变等一系列环节,需要开展深入细致的研究。

3 半导体泵浦类碱金属激光器

碱金属激光器已经取得令人瞩目的成果,可以说推动了气体激光器自化学激光兴衰后的再度繁荣。在发展 DPALs 的过程中,人们受其启发,也在不断探索其他类型的半导体泵浦气体激光器,为的是解决 DPALs 发展过程中曾经遇到的各种技术挑战。例如,为了解决吸收光谱窄的问题,伊利诺伊州大学和 CU 宇航公司在 2009 年提出一种基于碱金属-惰性气体准分子机制的宽带泵浦吸收方案,也被称为 XPAL^[66],但由于吸收截面过小不支持高能运转。为了兼具宽谱吸收、常温操作和高效运转等优势,国防科技大学在 2012 年提出半导体泵浦纳米气体激光器的概念,首次将人工调控的思路引入高能激光增益介质的底层设计中,其关键在于制备在载气中分散悬浮的掺稀土离子纳米颗粒流^[67]。同年,美国 Emory 大学的 Heaven 团队^[68]提出一种和 DPALs 非常类似的新方案,称作半导体泵浦亚稳态惰性气体激光器(DPRGLs),此概念一经提出便得到了高能激光界的关注,美国光学学会“Spotlight on Optics”版面对该想法高度评价^[69],认为其有望在继承 DPALs 功率放大模式和潜力的同时兼具更好的化学稳定性和系统鲁棒性,具有良好的发展潜力,下文主要对此进行简要介绍。

3.1 基本原理和技术特点

DPRGLs 同样采用大功率窄线宽半导体激光器作为泵浦源,以基于气体放电方式产生的亚稳态惰性气体原子(Ar*, Kr* 或 Xe*)作为激光工质,并充入氦气作为缓冲气体,也是一种三级运转的气体激光器。其典型工作原理如图 7 所示。以氩原子为例,1s₀表示处于基态的中性气体原子,通过气体放电的方式将惰性气体最外层的一个电子碰撞到激发态,其电子构型为 np⁵(n+1)s¹,与碱金属原子的电子构型 np⁶(n+1)s¹相似,因此二者有着非常相近的光学特性。1s₀能级为寿命最长的亚稳态能级,作为激光的下能级,其粒子数在半导体激光器泵浦下被抽运到 2p₀能级,然后在氦气的碰撞弛豫作用下转移到激光上能级 2p₁₀实现粒子数反转,激光过程发生在 2p₁₀和亚稳态能级 1s₀之间。需要指出的是,上述模式并非传统意义上的电能激励激光,而是利用少量电能激

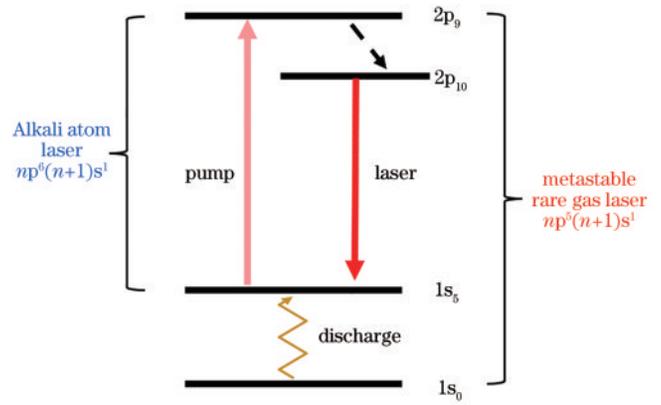


图 7 DPRGL 能级结构和跃迁过程示意图

Fig. 7 Energy level and transition process of DPRGL

发产生亚稳态原子,其本质仍是采用大功率半导体进行泵浦从而实现激光输出的光泵浦体系。

作为比较,亚稳态原子和碱金属原子的光学性质接近,泵浦与激光波长都处于近红外波段(以氩为例,泵浦波长为 811 nm,激光波长为 912 nm),位于成熟的大功率半导体发射光谱范围,上能级自发辐射系数都在 10⁷ s⁻¹量级,量子效率均在 90% 以上,具备高转换效率和低废热排放的物理基础。同时,DPRGLs 还具有一些独特的优势:1)使用全惰性气体作为增益介质,化学稳定、易于操控;2)通过放电产生亚稳态原子激光工质,简单快捷;3)单独依靠 1 atm 左右的氦气即可实现 2p₁₀→2p₀之间高效的粒子数转移,无需烃类分子。这些特点激发了研究人员的兴趣,近年来开展了广泛和深入的探索。

3.2 国内外研究现状

DPRGLs 与 DPALs 的主要区别在于增益介质的制备方式,需要通过气体放电在大气压级气体中制备出大体积、高浓度且可持续的亚稳态原子激光工质,期望能够达到 ≥10¹⁴ cm⁻³。事实上这一要求是有难度的,各研究团队相继对不同放电方式进行了尝试,亦逐渐发展形成各团队的研究特色。如图 8 所示,埃默里大学团队致力于脉冲直流(DC)放电型 DPRGL 的研制,采用高压纳秒直流脉冲放电,这种方式以其强的约化电场能够在大气压下激发高浓度亚稳态原子,同时

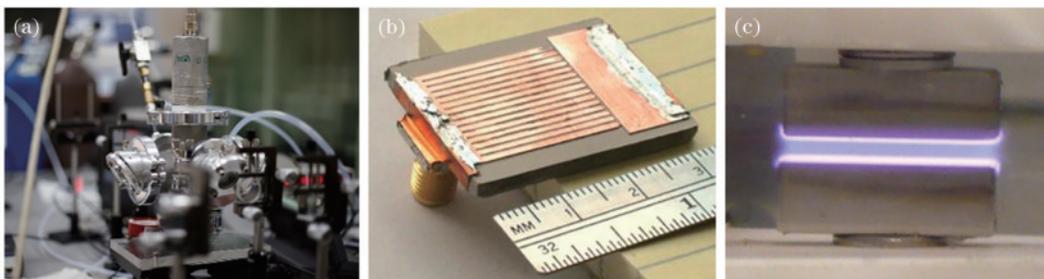


图 8 几类典型 DPRGL 放电制备装置。(a) 脉冲直流放电^[70]; (b) 微波微区放电^[71]; (c) 射频介质阻挡放电^[72]

Fig. 8 Several representative discharge setups of DPRGL. (a) Pulse DC discharge^[70]; (b) microwave micro discharge^[71]; (c) radio frequency dielectric barrier discharge^[72]

通过匹配放电频率和亚稳态原子寿命实现持续的原子制备,2018年成功实现 10 W 级氩激光输出^[70]。美国物理科学公司等选择基于微波激励的微区放电演示了 22 mW 级的氩激光,增益系数高达 1 cm^{-1} ,光光转换效率 55%^[71]。面向大体积、可拓展增益介质制备需求,俄罗斯 Samara 大学、俄罗斯科学院物理研究所、美国空军技术研究所(AFIT)和我国华中科技大学等相继开展了射频介质阻挡放电方案的探索^[72-73],但受制于电子温度和密度的限制,亚稳态原子浓度均在 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 量级,难以支持高效输出。

在上述 DPRGL 放电方式中,等离子体均多被约束

在有限的放电区域内,放电体积难以有效拓展,且存在拉弧、电极损伤、原子空间分布不均等问题,并且强光泵浦还会干扰放电状态并存在极间寄生振荡等隐患。为了解决上述问题,受到宇航电推进技术的启发,国防科技大学于 2022 年提出采用大气压等离子体射流(APPJ)作为激光工质的新方案,将增益区和放电区空间分离,从物理层面彻底规避上面提到的限制因素,且易于阵列拓展,有望激发功率放大潜力。基于该方案,课题组制备出峰值浓度高达 10^{14} cm^{-3} 的氩氦混合气体射流,在半导体泵浦条件下实现 466 mW 激光输出,斜率效率 33%,验证了方案的可行性^[74],如图 9 所示。

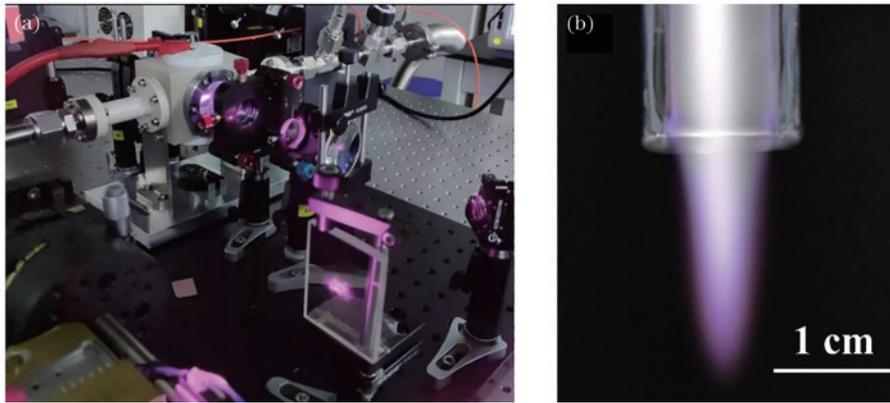


图 9 国防科技大学的 DPRGLs 研究平台^[74]。(a)基于脉冲直流放电装置的 DPRGL 平台;(b)大气压、大体积射流装置

Fig. 9 DPRGL research platform in National University of Defense Technology^[74]. (a) DPRGL platform based on the pulsed DC discharge; (b) atmospheric large volume plasma jet

目前,美国军方重点支持 DPALs 项目,在 DPRGLs 方面的投入有限,该领域总体处于原理验证阶段,一些关键技术研究尚待深化,重点包括两个方面;1)大体积高浓度亚稳态原子的可控制备技术,现有技术方案仍不成熟;2)激光器动力学机制的认识亟待深化,由于内壳层一个电子的缺失,亚稳态惰性原子的电子能级比碱金属原子复杂,弛豫通道更多,是否会导致较为严重的能量耗散还待深入研究。

3.3 未来发展方向

1) 高能激光光源

DPRGLs 是面向高能激光的需求而诞生的,2017 年美国 AFIT 对其功率放大能力和参量基线进行了评估^[75],综合考虑电子、原子和光子的复杂相互作用,关注了可能存在弛豫关联的附加能级影响,预期结果是乐观的,在亚稳态原子柱密度为 10^{14} cm^{-2} 量级、泵浦强度为 20 kW/cm^2 的条件下,理论预期光光转换效率优于 70%;特别地,评估了 100 kW 级 DPRGL 激光所需的增益介质体积大约 70 cm^3 ,给出均匀气体放电应当满足的体积基线。依托理论评估,国防科技大学提出基于多路大体积射流的 DPRGL 方案,能够实现增益体积的空间拓展和功率的线性放大,如图 10^[76]所示。

2) 极紫外光源

光泵浦惰性气体原子的另一个重要应用是有望产

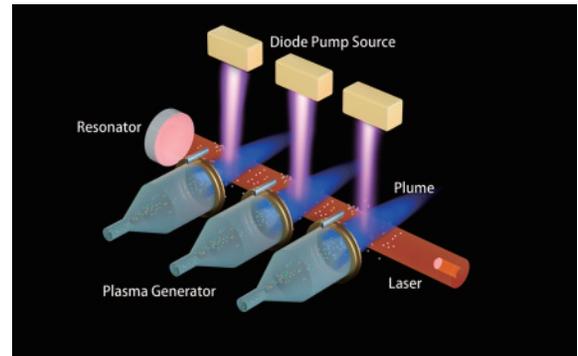


图 10 基于多路射流增益阵列的 DPRGL 功率放大方案^[76]

Fig. 10 DPRGL power scaling scheme based on a multi-jet gain array^[76]

生极紫外光(EUV)光源。以氩原子为例,通过放电制备高密度的亚稳态氩原子 $1s2s(^1S)$,采用 2058 nm 光源激发至 $1s2p(^1P)$ 态,通过受激反斯托克斯散射(SARS)过程产生极紫外 58.4 nm 辐射。该过程是单光子过程,理论上具有远高于多光子过程的效率。如图 11 所示,中国科学院上海微系统与信息技术研究所于 2023 年实现了具有定向性的 58.4 nm 辐射源^[77],对于其他多惰性气体(氩、氦、氙等),均存在 EUV 辐射能级,同样支持在强光泵浦条件下实现大功率 EUV 的潜力。光刻机是当下我国的战略需求,角分辨光电子能

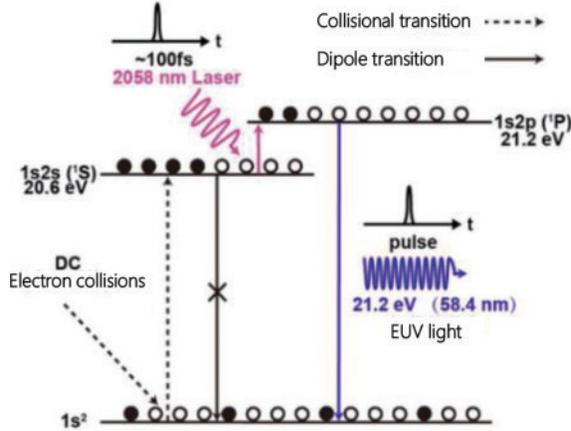


图 11 光泵浦惰性气体原子产生 EUV 的工作原理^[77]

Fig. 11 Principle of the EUV light generation by optical pumping of rare gas atoms^[77]

谱技术(ARPAS)也需要 EUV 光源提高其分辨率,发展先进的定向 EUV 光源技术对于解决芯片制备“卡脖子”问题和前沿基础物理研究具有重要和长远的战略意义。

4 结束语

国际上,高能碱金属激光器的发展已迈入冲击 100 kW 的阶段,总体发展趋势良好,但也面临一些技术挑战。相比全固态光源,DPALs 的研制难度(或者技术门槛)更高,虽然碱金属原子具有良好的物理潜力,但将这种优势充分发挥出来则需要对诸如泵浦源等器件的性能指标提出严格的技术要求,而这需要专业科研团队和产业界的共同配合来实现,正如 LLNL 的成功很大程度得益于其与 Lasertel 公司的密切协作。随着泵浦源、增益发生器和强光元件等核心器件在规模和品质上的持续提升,DPALs 的功率提升必然会不断逼近理论预期,进入新的阶段。面向兆瓦级长远发展需求,结合本文提到的关切要点,还需对激光体系结构进行深入研究和论证。与此同时,类碱金属激光器的发展一方面对 DPALs 的研究起到创新支撑,另一方面有望在诸如 EUV 等战略方向发挥创新驱动作用,支撑半导体泵浦气体激光更加繁荣发展。

参 考 文 献

- [1] 许晓军. 高能激光六十年: 回顾与展望[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 011007.
Xu X J. Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(1): 011007.
- [2] 刘泽金, 王红岩, 许晓军. 高能半导体泵浦气体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401001.
Liu Z J, Wang H Y, Xu X J. High energy diode pumped gas laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401001.
- [3] 刘泽金, 杨未强, 韩凯, 等. 激光武器设计准则探讨[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201001.
Liu Z J, Yang W Q, Han K, et al. Research on the design criteria of laser weapons[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201001.
- [4] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 114-153.
Su Y, Wan M. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 114-153.
- [5] Airborne laser shoots down missile in mid-flight [EB/OL]. [2023-05-06]. <https://www.csmonitor.com/Technology/Horizons/2010/>.
- [6] Bowman S R. High-power diode-pumped solid-state lasers[J]. Optical Engineering, 2012, 52(2): 021012.
- [7] Krupke W F. Diode-pumped alkali laser: US6643311[P]. 2003-11-04.
- [8] Chronology of MDA's plans for laser boost-phase defense (August 26, 2016) [EB/OL]. [2023-05-06]. <https://mostlymissiledefense.com/2016/08/26/chronology-of-mdas-plans-for-laser-boost-phase-defense-august-26-2016/>.
- [9] Scaling up army advances 300 kW class laser prototype [EB/OL]. [2023-08-09]. https://www.army.mil/article/233346/scaling_up_army_advances_300kw_class_laser_prototype.
- [10] Department of defense directed energy weapons: background and issues for congress [EB/OL]. [2023-08-09]. <https://www.readkong.com/page/department-of-defense-directed-energy-weapons-background-6900896>.
- [11] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs) (Plenary Paper)[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5448: 7-17.
- [12] Krupke W F. DPAL: a new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths[C]. AIP Conference Proceedings, 2004, 702: 367-377.
- [13] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs): a review (rev1)[J]. Progress in Quantum Electronics, 2012, 36(1): 4-28.
- [14] Grosek J, Naderi S, Olikier B, et al. Laser simulation at the air force research laboratory[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1025: 10254N.
- [15] Barmashenko B, Waichman K, Eliyahu-Caspi G, et al. Advanced DPAL modeling[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12347: 1234703.
- [16] 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.
- [17] Zhdanov B V, Rotondaro M D, Shaffer M K, et al. Potassium Diode Pumped Alkali Laser demonstration using a closed cycle flowing system[J]. Optics Communications, 2015, 354: 256-258.
- [18] Pitz G, Stalnake D, Guild E, et al. Advancements in flowing diode pumped alkali lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9729: 972902.
- [19] Yamamoto T, Yamamoto F, Endo M, et al. Experimental investigation of gas flow type DPAL[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10254: 102540S.

- [20] Wang H, Xu X, Yang Z, et al. DPAL research in Changsha[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92551X.
- [21] Zhao X F, Yang Z N, Hua W H, et al. Ionization degree measurement in the gain medium of a hydrocarbon-free rubidium vapor laser operating in pulsed and CW modes [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 9458-9470.
- [22] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [23] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, 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.
- [24] Zhdanov B, Knize R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2167-2169.
- [25] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, et al. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. Optics Letters, 2008, 33(5): 414-415.
- [26] 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.
- [27] Zheng Y J, Niigaki M, Miyajima H, et al. High-efficiency 894-nm laser emission of laser-diode-bar-pumped cesium-vapor laser[J]. Applied Physics Express, 2009, 2(3): 032501.
- [28] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Demonstration of a diode pumped continuous wave potassium laser[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7915: 791506.
- [29] Hostutler D A, Klennert W L. Power enhancement of a Rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. Optics Express, 2008, 16(11): 8050-8053.
- [30] Zhdanov B V, Shaffer M K, Sell J, et al. Cesium vapor laser with transverse pumping by multiple laser diode arrays[J]. Optics Communications, 2008, 281(23): 5862-5863.
- [31] 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.
- [32] Zweiback J, Komashko A. High-energy transversely pumped alkali vapor laser[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7915: 791509.
- [33] 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.
- [34] Li Y F, Hua W H, Li L, et al. Experimental research of a chain of diode pumped rubidium amplifiers[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25906-25911.
- [35] Kim H, Jeong Y, Hwang K, et al. Highly efficient diode-pumped alkali-vapor amplification with near-extreme-limit gain[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 25638-25646.
- [36] Gourevitch A, Venus G, Smirnov V, et al. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2611-2613.
- [37] Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J. Narrowband external cavity laser diode array[J]. Electronics Letters, 2007, 43(4): 221-222.
- [38] Podvyaznyy A, Venus G, Smirnov V, et al. 250 W diode laser for low pressure Rb vapor pumping[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 758313.
- [39] Yang Z N, Wang H Y, Lu Q S, et al. An 80-W laser diode array with 0.1 nm linewidth for rubidium vapor laser pumping[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(10): 104202.
- [40] Kissel H, Köhler B, Biesenbach J. High-power diode laser pumps for alkali lasers (DPALs)[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 82410Q.
- [41] Hecht J. A new generation of laser weapons is born[J]. Laser Focus World, 2010, 46(4): 36-39, 41.
- [42] Wu S S Q, Soules T F, Page R H, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser using ^3He buffer gas[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 1222-1225.
- [43] Wu S S Q, Soules T F, Page R H, et al. Hydrocarbon-free resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2423-2425.
- [44] Diode pumped alkaline laser system: a high powered, low SWaP directed energy option for ballistic missile defense high-level summary-April 2017. 2017 [EB/OL]. [2023-05-05]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1357366/>.
- [45] Approaches for technology transfer of diode pumped alkali laser (DPAL) technology to industry[EB/OL]. [2023-05-05]. <https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/approaches-for-technology-transfer-of-diode-pumped-alkali-laser-dpal-technology-to-industry-ousdrandededpalrfi2020>.
- [46] Go with the flow: Novel diode-pumped alkali laser achieves first light[EB/OL]. [2023-05-05]. <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/400115/go-with-the-flow-novel-diode-pumped-alkali-laser-achieves-first-light/>.
- [47] 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.
- [48] Yacoby E, Auslender I, Waichman K, et al. Analysis of continuous wave diode pumped cesium laser with gas circulation: experimental and theoretical studies[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 17814-17819.
- [49] Endo M, Nagaoka H, Wani F. Diode pumped alkali laser: current status and prospects[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(6): 363.
- [50] Biswal R, Mishra G K, Agrawal S K, et al. Studies on the design and parametric effects of a diode pump alkali (rubidium) laser[J]. Pramana, 2019, 93(4): 58.
- [51] Tan Y N, Xu D D, Li Y M, et al. 108 W diode pumped rubidium vapor laser with Brewster angle structure[C]// 2021 IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), November 25-28, 2021, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2022: 617-620.
- [52] Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High-power narrow-

- linewidth 780 nm diode laser based on external cavity feedback technology of volume Bragg grating[J]. *Optik*, 2022, 264: 169455.
- [53] Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. Tunable, high-power, narrow-linewidth diode laser for potassium alkali metal vapor laser pumping[J]. *Crystals*, 2022, 12(11): 1675.
- [54] Wang B G, Zhou L, Tan S Y, et al. 71% wall-plug efficiency from 780 nm-emitting laser diode with GaAsP quantum well[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 109867.
- [55] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, et al. A quasi-CW linearly polarized rubidium vapor laser pumped by a 5-bar laser diode stack[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 925525.
- [56] 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.
- [57] He L A, Zhou K, Zhang L, et al. Fabrication of high-power semiconductor laser with wavelength-locked at 780 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(9): 091001.
- [58] 齐予, 易亨瑜, 黄吉金, 等. 高功率碱金属激光器的发展和技术挑战[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0700003.
Qi Y, Yi H Y, Huang J J, et al. Research development and technological challenge of alkali lasers with high power[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0700003.
- [59] Chen F, Pan Q K, Gao F, et al. Repetition operation of A 447.3 nm blue-violet laser by intracavity frequency doubling of an LD-pumped cesium vapor laser[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2017, 38(6): 564-568.
- [60] Chen F, Xu D D, Gao F, et al. Experimental investigation on a diode-pumped cesium-vapor laser stably operated at continuous-wave and pulse regime[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12414-12422.
- [61] An G F, Yang J, Guo J W, et al. Experimental study of a new kind of gas-flowing diode pumped cesium laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12310: 1231016.
- [62] Yang J, An G F, Han J H, et al. Theoretical study on amplified spontaneous emission (ASE) in a V-pumped thin-disk alkali laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107130.
- [63] Yang Z N, Wang H Y, Lu Q S, et al. Modeling of an optically side-pumped alkali vapor amplifier with consideration of amplified spontaneous emission[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23118-23131.
- [64] Waichman K, Barmashenko B D, Rosenwaks S. Three-dimensional wave optics and fluid dynamics modeling of a Rb flowing-gas diode-pumped alkali amplifier[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(5): 1212-1221.
- [65] Nole J. Nanotextured optical surfaces advance laser power and reliability[J]. *Laser Focus World*, 2014, 50(6): 38-43.
- [66] Readle J D, Wagner C J, Verdeyen J T, et al. Excimer-pumped alkali vapor lasers: a new class of photoassociation lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7581: 75810K.
- [67] 许晓军, 张汉伟, 王红岩, 等. 激光泵浦的流动纳米颗粒稀土离子激光器: CN102570283A[P]. 2013-06-19.
Xu X J, Zhang H W, Wang H Y, et al. Laser pumped flowing nanoparticle rare earth ion laser: CN102570283A [P]. 2013-06-19.
- [68] Han J D, Heaven M C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2157-2159.
- [69] Han J D, Heaven M C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8547: 85470Z.
- [70] Heaven M C. Optically pumped rare gas lasers (conference presentation)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10798: 1079806.
- [71] Rawlins W T, Galbally-Kinney K L, Davis S J, et al. Optically pumped microplasma rare gas laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4804-4813.
- [72] Mikheyev P A, Chernyshov A K, Ufimtsev N I, et al. Tunable diode-laser spectroscopy (TDLS) of 811.5 nm Ar line for Ar(4s[3/2]₂) number density measurements in a 40 MHz RF discharge[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9255: 92552W.
- [73] Mikheyev P A, Chernyshov A K, Ufimtsev N I, et al. Pressure broadening of Ar and Kr ($(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$) transition in the parent gases and in He[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 164: 1-7.
- [74] Wang R, Yang Z N, Liu Q S, et al. Demonstration of a diode-pumped plasma jet-type rare gas laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3279-3282.
- [75] Eshel B, Perram G P. Five-level argon-helium discharge model for characterization of a diode-pumped rare-gas laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 35(1): 164-173.
- [76] Xu X J, Wang R, Yang Z N. The second fusion of laser and aerospace: an inspiration for high energy lasers[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(6): 220113.
- [77] Hong D B, Xiang B K, Wu T, et al. Generation of collimated extreme ultraviolet radiation by single-photon process[J]. *Optics Communications*, 2023, 545: 129626.