

半导体激光抽运亚稳态惰性气体激光器研究进展

余光其 杨子宁* 陆启生

国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 半导体抽运亚稳态惰性气体激光器(DPRGLs)作为一种新型光抽运气体激光器,其工作原理与半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)相似,有望在继承DPAL诸多优势的同时克服其化学反应的隐患,具有潜在的高功率定标放大能力。综述了亚稳态惰性气体激光器的基本原理和研究进展,分析了关键技术点和功率定标放大潜力,对其未来发展和应用前景进行了预测。

关键词 激光器; 碱金属激光器; 半导体抽运; 亚稳态原子; 惰性气体

中图分类号 O436 **文献标识码** A

Research Development of Diode Pumped Metastable Rare Gas Laser

Yu Guangqi Yang Zining Lu Qisheng

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Diode pumped metastable rare gas lasers (DPRGLs) are a new type optically pumped gas laser analogue to diode pumped alkali vapor lasers (DPALs). It can overcome the hidden danger of chemical reaction while possessing similar advantages of DPALs. In this paper, the basic principle and research development of DPRGLs are presented. The key technologies and power scaling potentials of DPRGLs are analyzed. The possible further development and applications are discussed.

Key words lasers; diode pumped alkali vapor laser; diode pump; metastable atom; rare gas

OCIS codes 140.3460; 140.1340; 140.3480

doi: 10.3788/LOP52.010001

1 引言

从激光器产生及发展历程来看,高能激光一直是各国军事发展追求的重要目标,目前已在化学、固态激光器等领域取得了很大的成就;与此同时,诸多物理或者工程因素也对激光器的应用或者功率提升起到不同程度的限制。例如,化学激光器可以实现功率为兆瓦量级的高光束质量输出^[1],但其体积重量庞大,有毒物质参与运作过程,不利于机动和安全应用;固态激光器如板条^[2]、光纤激光器^[3]等效率高,结构紧凑,但热效应、材料破坏阈值等因素限制了单路输出功率^[4-5],光束合成是否能够达到兆瓦级功率水平尚未得到验证。

鉴于此,人们发展了一种兼具化学激光器、固态激光器优点的光抽运气体激光器,目前最受关注的是半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)^[6-11]。DPAL具有量子效率高、介质可循环使用、流动散热、全电操作、结构紧凑、近红外原子谱线大、气透过性好等特点,有望实现单口径高功率定标放大。2012年,俄罗斯已实现光-光效率为48%的1 kW铯DPAL^[12]。但DPAL总体发展相对缓慢,主要受限于其物理和工程上的一些因素:1) 碱金属原子极其活泼,对材料、真空、缓冲气体纯度等要求苛刻;2) 充入增益发生器内以实现抽运上能级粒子数碰撞快速弛豫至激光上能级的缓冲气体如甲烷、乙烷等在高强度抽运条件下易与碱金属原子发生

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-10; 网络出版日期: 2014-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61308044)

作者简介: 余光其(1990—),男,硕士研究生,主要从事半导体抽运气体激光器方面的研究。

E-mail: yuguangqi09@163.com

导师简介: 陆启生(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.bn.cn

* 通信联系人。E-mail: diablo_3rd@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

化学反应,从而影响激光器运行^[13-15];若单独使用氦气代替烃类分子作为缓冲气体,则需要在非常高的气压1000~2000 kPa^[16-17]条件下进行,对光束质量可能产生不利影响,且将给系统带来工程上的更大难度和挑战。因此,为克服DPAL的局限性,同时利用DPAL的基本工作原理,美国Emory大学Han等^[18]于2012年提出采用亚稳态惰性气体原子(R_g^* , $R_g=Ar, Kr, Xe$)代替碱金属原子作为增益介质的新思路,在脉冲放电激励条件下采用固体光参量振荡器(OPO)短脉冲激光器作为替代抽运源抽运 Kr^*/He 测量得到小信号增益以及实现出光。同年7月美国光学学会(OSA)网站的“Spotlight on Optics”版面对此工作进行了高度评价^[19],认为半导体抽运亚稳态惰性气体激光(DPRGL)作为类DPAL的新型光泵气体激光有望在继承DPAL优势的同时克服其不足,具有发展潜力,并积极倡导和呼吁人们对该领域的进一步研究。国际光学工程学会(SPIE)在SPIE Newsroom上也对此进行了专门报道。

目前,对于半导体抽运亚稳态惰性气体激光器的研究还处于起步阶段,参与研究的单位主要有美国Emory大学^[18,20-23]、美国Maryland大学^[21]、美国空军技术学院^[22]、美国Central Florida大学^[23]、俄罗斯圣彼得堡大学^[24]等,国内尚未见开展相关研究报道。本文将对光抽运亚稳态惰性气体激光器的基本原理和研究进展进行综述,并对其未来功率定标放大潜力和发展趋势进行分析和预测。

2 基本工作原理

惰性气体原子(Ne、Ar、Kr、Xe)满层基态电子结构为 ns^2np^6 ,一般通过气体放电激励的方法可以将其激发为亚稳态 $np^5(n+1)s$ 结构,通过抽运吸收能量跃迁至高能级形成 $np^5(n+1)p$ 结构,跃迁过程与三能级的碱金属原子结构跃迁相似,但更为复杂,以氩(Ar)为例,如图1所示。亚稳态Ar原子 $3p^54s$ 结构具有4种能态,其中 $4s[3/2]_2$ 和 $4s[1/2]_0$ 为亚稳态结构。 $3p^54p$ 结构具有10种能态,一种与DPAL非常类似的三能级跃迁过程为: $4s[3/2]_2 \rightarrow 4p[5/2]_3$ 为抽运跃迁, $4p[1/2]_1 \rightarrow 4s[3/2]_2$ 为激光跃迁, $4p[1/2]_1$ 与 $4p[5/2]_3$ 之间为电偶极禁戒跃迁的精细能级结构,充入缓冲气体(一般为He)进行碰撞弛豫实现粒子数的转移。

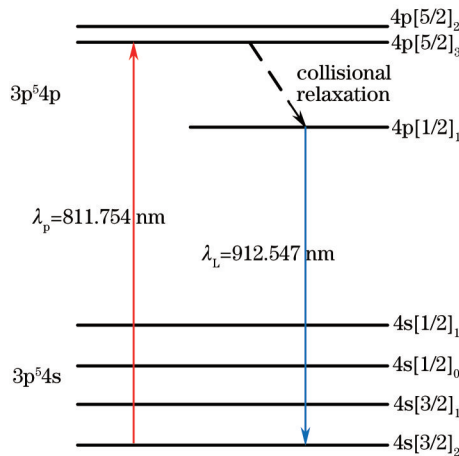


图1 亚稳态Ar原子部分原子能级结构图

Fig.1 Part of energy levels for states of Ar^*

对于常用的亚稳态惰性气体原子,其对应的跃迁参数如表1所示。

表1 不同亚稳态惰性气体原子的跃迁参数

Table 1 Parameters for transition of R_g^*

R_g^*	λ_p /nm	λ_L /nm	Q-efficiency/%	$\Delta E (n+1) p[5/2]_3 \rightarrow (n+1)p[1/2]_1$ /cm ⁻¹
Ar*	811.75	912.55	89	1360.8
Kr*	811.51	893.12	91	1126.0
Xe*	882.18	980.24	90	1134.0

由表1可以看出, R_g^* 的抽运波长与市场成熟的高功率半导体光源发射波长匹配很好,因此提出半导体抽运亚稳态惰性气体激光器概念;同时各介质的量子效率很高,易得到较高的光-光转换效率,便于进行良好的气体循环流动热管理。

类似于DPAL, DPRGL的高效运行需要解决以下3方面关键技术:1) 通过有效的放电激励获得所需浓度的基态亚稳态原子;2) 市场销售的半导体光源线宽较宽,需要采用基于布拉格体光栅(VBG)的外腔技术^[15]对其进行压窄,同时充入He等缓冲气体促进亚稳态原子抽运吸收谱线碰撞加宽,实现二者之间线宽匹配,提高抽运吸收效率;3) 通过添加缓冲气体促进抽运跃迁上能级粒子数快速弛豫到激光跃迁上能级,以实现有效的粒子数反转,达到输出激光的条件。目前的实验表明,可以单独充入氦气100~200 kPa以实现有效的粒子数弛豫。

综上所述,DPRGL的基本原理与DPAL类似,继承了DPAL的诸多优势,同时介质化学稳定,且无需采用烃类分子,避免了化学反应的隐患,工程研制难度低,易于实现,具有发展潜力。

3 国际研究进展

3.1 脉冲放电激励、固体脉冲激光器抽运亚稳态惰性气体激光器

相比于连续抽运,脉冲抽运由于高的抽运强度更易于实现激光输出,因此在亚稳态惰性气体激光研究初期,Han等^[18]首先在18 kV的高压脉冲放电激励条件下采用固体OPO短脉冲激光器(重复频率10 Hz、脉宽10 ns、中心波长811.51 nm、线宽30 GHz、峰值能量0.25 mJ)作为验证抽运源对 Kr^*/He 混合气体进行抽运,通过可调谐脉冲染料激光器发出探针光(893.12 nm)来实验测量小信号增益,并成功验证了 Kr^*/He 激光器出光。除此之外还对 Ar^*/He 、 Xe^*/He 以及纯 Ar^* 进行出光验证实验,实验中充入的 R_g^* 量较小(~30 kPa),总气压控制在20~200 kPa,纯 Ar^* 时气压接近101.325 kPa。在 Ar^*/He 验证实验中,在未进行各方面参数优化时实现了13%的光-光转换效率,之后进一步实验演示了脉冲光抽运 Ne^* 激光器。

实验中利用商业准分子激光器(Lambda Physik EMG 102)作为放电腔,腔内充入 R_g^*/He 混合气体,腔内长80 cm的电极分隔约为2.5 cm,在设定的最低电压18 kV工作下产生 R_g^* ,整个实验装置如图2所示。实验结果表明,放电产生的总 Ar^* 粒子数密度远大于 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。

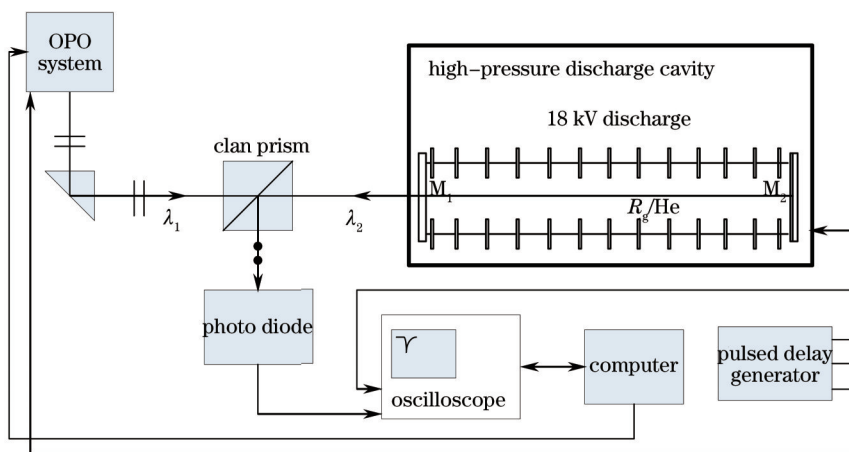


图2 研究光泵亚稳态原子小信号增益和出光实验的装置结构图

Fig.2 Apparatus used to study gain and lasing of optically pumped R_g^* atoms

3.2 脉冲放电激励、半导体连续抽运 DPRGL

在采用脉冲抽运实验验证亚稳态惰性气体激光的可行性后,Han等^[18]从原理上推测,采用半导体激光器在低抽运强度下($<5 \text{ kW/cm}^2$)进行抽运实验是完全可能实现的,目的在于实现高平均功率激光输出。因此,进一步探索实现DPRGL连续输出的方案。

2013年,Heaven等^[22]在放电电压为1~2 kV、持续时间为1 ms、重复频率为1 kHz的高压脉冲电源激励下进行了连续半导体抽运 Ar^* 激光器的演示实验^[21]。实验中采用脉冲直流放电产生 Ar^* ,采用连续半导体激光器进行抽运。对长为15 cm、直径为5 cm的圆柱体玻璃池内平行放置一对抛光平面平行电极(2.5 cm×2.5 cm),相距为0.5 cm,介质混合气体采用流动通入的方式。作为抽运光源的连续半导体激光器利用体VBG进行线宽压缩(半峰全宽约为20 pm),并且可以提供7.5 W的功率输出,实验装置图如图3所示。实验的成功出光验证了DPRGL的可行性。

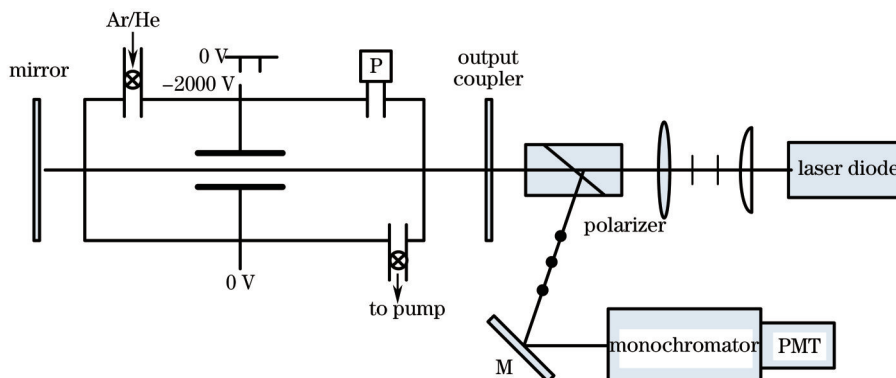


图3 连续半导体抽运 Ar 激光器实验装置示意图

Fig.3 Experimental setup for demonstrating Ar lasing with a continuous wave diode pump source

实验中维持产生足够 R_g^* 的放电脉冲持续时间为 $0.5\sim 20\ \mu\text{s}$, 而输出脉冲持续时间一般为 $100\sim 200\ \text{ns}$, 比施加于放电电极的电压脉冲小很多, 如图 4 所示。在 2014 年 SPIE 国际光学学会上, Han 等^[23]发表了关于光抽运 Ar^* 激光器动力学研究的报告, 对上述现象进行了分析和解释。结合图 1 和图 4 分析认为, 处于较低能级 $4s[3/2]_2$ 的粒子数在光抽运过程中迅速被消耗, 而这种情况下通过碰撞弛豫 ($4p[5/2]_3 \rightarrow 4p[1/2]_1$) 后激励和放电激励实现粒子数再集聚的过程非常缓慢, 从而导致只在放电脉冲前期出现激光脉冲, 预计通过改良放电方式以及气体流动补充亚稳态原子的方式可以解决这一问题。

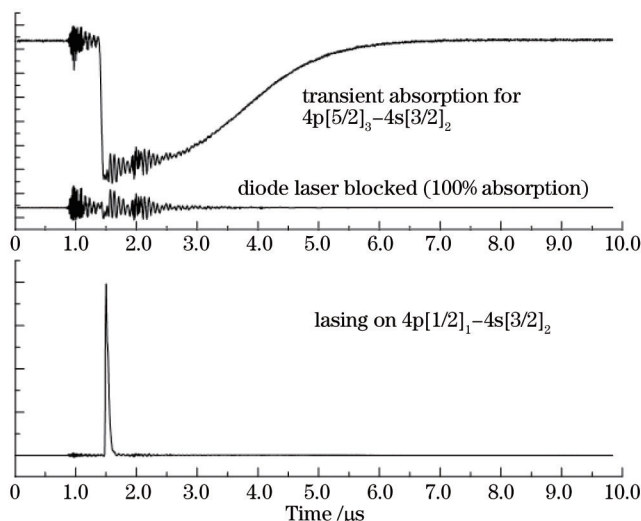


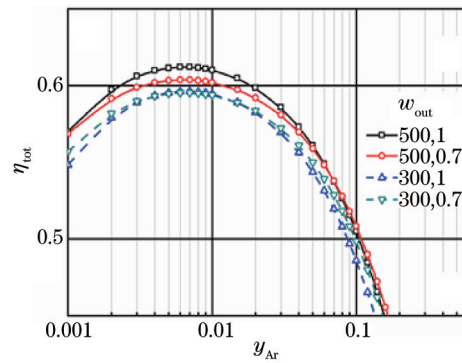
图4 放电激励 Ar/He 混合气体实验的跃迁吸收和激光信号

Fig.4 Transient absorption and lasing signals observed in a discharge excited mixture of Ar and He

2013 年, 俄罗斯的 Fox-Lyon 等^[24]建立了连续半导体抽运 Ar^* 激光器动力学分析模型, 给出了一种快速评估亚稳态惰性气体激光器 (RGL) 工作性能的方法。文中假设低压情况下流动放电产生 Ar^* , 通过解波尔兹方程组得到激励获得亚稳态粒子的效率。分析得到这种新型激光器的效率、小信号增益和输出功率与系统 Ar 的含量、分压、抽运强度以及增益介质尺寸有关, 如图 5 所示, 系统工作在温度为 $300\ \text{K}$ 、气压为 $101.325\ \text{kPa}$ 时充入 Ar 和 He 的分压比 y_{Ar} 约为 1% 可以获得最优效率。输出功率和放电功率随抽运功率线性增加, 阈值为 $300\ \text{W}/\text{cm}^2$, 当抽运强度为 $840\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 总效率达到 $\sim 60\%$, 输出功率为 $500\ \text{W}/\text{cm}^3$, 同时仅需放电功率密度 $18\ \text{W}/\text{cm}^3$ 即可获得足够的亚稳态粒子浓度。

3.3 微等离子体放电激励连续 DPRGL

此前实验中放电装置在 $101.325\ \text{kPa}$ 下很难维持连续放电, 而且一般会出现大量的弧光放电^[22]; $101.325\ \text{kPa}$ 下大体积气体一般采用介质阻挡放电 (DBD), 但其得到的是随机、瞬时、非连续的微放电, 同时需要千伏特量级的功率^[22]。为解决这些限制问题, 美国 Rawlins 等^[25]于 2014 年采用新型微等离子体阵列放电产生 R_g^* , 实现了 R_g^* 的连续产生。该阵列由 15 个微谐振条组成, 接地面与谐振条的末端之间形成的小缝隙产生放电微

图5 不同 y_{Ar} 下激光器的总效率Fig.5 Total efficiency as a function of y_{Ar} for typical parameters

等离子体。如图6所示,铝制底座与接地面相距 25 mm,每个谐振条宽 1 mm,相邻之间距离 0.25 mm。放电形成的微等离子体沿阵列方向约 19 mm,宽 900 mm,垂直底板方向约 300 mm。微放电结构包括 28V 直流 (DC) 功率源、频率发生器、30 W 宽带功率放大器等可见光微波功率阵列驱动,工作频率约为 900 MHz。微等离子体置于流动放电玻璃池中,池子窗口位于两侧以及顶部,便于光束通过以观察微放电区域。

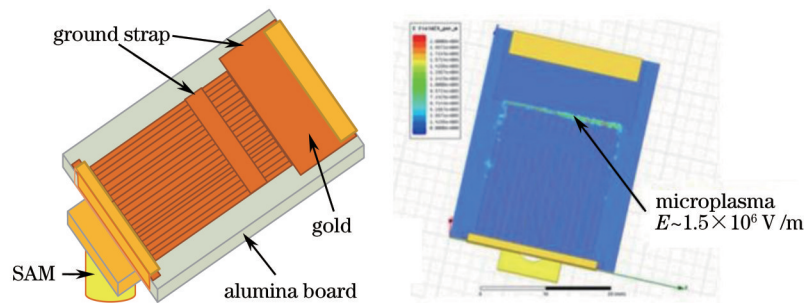


图6 微等离子放电装置和电场仿真结果

Fig.6 Apparatus for discharge by microplasma arrays and simulation of E -field

整个实验装置示意图如图7所示。采用钛宝石激光器作为替代抽运源,提供功率约为 1 W、波长为 750~900 nm 的可调谐连续激光输出。采用中心波长为 912.3 nm 的半导体激光器作为探针光,功率约为 1 mW,经过约 1.9 cm 长的增益区后由 InGaAs 相机和 InGaAs 阵列光谱仪观察光谱选择荧光效应,观察得到小信号增益为 1 cm^{-1} ,放电产生的粒子数为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。实验获得 22 mW 的激光输出,光转换效率高达 55%,而且能够实现超过 30 min 的高光束质量的连续稳态激光输出。

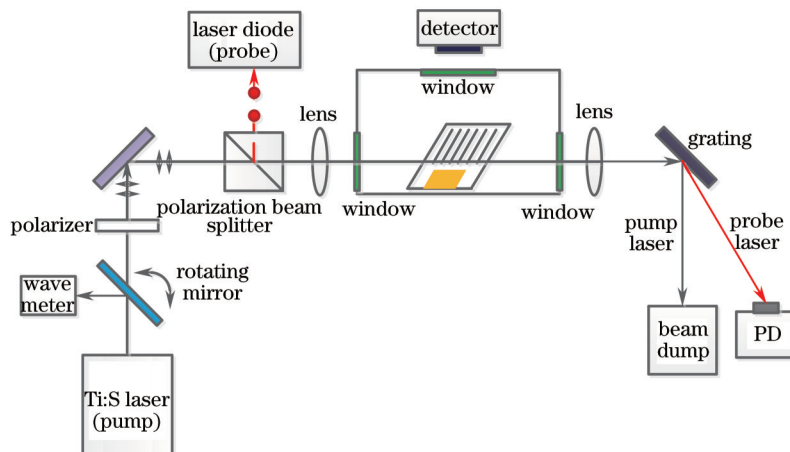


图7 光功率提取实验装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of laser power extraction

4 DPRGL 高功率定标放大分析和未来发展趋势

DPRGL 目前的研究工作还处于起步阶段,主要着眼于对其动力学过程、物理基础等实验和理论研究,

为实现其高功率定标放大,需要对下述几方面技术进行深入研究。

1) 选取合理的放电方式和结构。DPRGL增益介质为亚稳态惰性气体原子,亚稳态原子浓度对系统性能而言非常关键,需要设计一种合理的放电结构,既保证连续维持出光所需要的足够粒子数浓度,又要尽可能降低放电功率,提高放电效率。

2) 其他原子能级的影响。目前的理论分析中主要考虑4个能级 $(n+1)s[3/2]_2$ 、 $(n+1)s[1/2]_0$ 、 $(n+1)p[5/2]_3$ 和 $(n+1)p[1/2]_1$,虽然低功率条件下与实验结果一致,但是在高功率条件下需要考虑其他能级的影响。一方面,基态原子经电激励时将产生除亚稳态 $(n+1)s[3/2]_2$ 外的多种其他高能态原子;另一方面,在光抽运过程中,亚稳态能级 $(n+1)s[3/2]_2$ 吸收光能可能跃迁至更高能级,在激发态原子碰撞的时候,激发态能级 $(n+1)p[5/2]_3$ 上的粒子数一部分弛豫到激光上能级 $(n+1)p[1/2]_1$,一部分跃迁至高能级。这些在高功率情况下可能对激光器性能产生较强的负面影响。

3) 缓冲气体。充入缓冲气体与介质气体的气压比对激光器性能影响较大,缓冲气体一方面对 R_g^* 吸收谱线进行碰撞加宽以实现充分的抽运吸收,一方面实现抽运和激射上能级之间的粒子束弛豫;目前主要采用氦气,但在高抽运强度下,氦气是否能够提供足够的粒子数能级弛豫速率仍需要进行测量与评估,需要分析高功率条件下二者气压之比的最优值,获得高效率的激光器系统。

作为新型光抽运气体激光类型,DPRGL在继承了DPAL诸多优势的同时采用化学性质稳定的惰性气体工作介质,克服了化学反应隐患的同时大大降低了工程器件的实现难度,具有潜在的单口径高功率定标放大潜力,是未来新型高能激光器的备选方案之一;在航空航天领域,DPRGL输出波长属于近红外,处于大气窗口,是潜在的激光传能光源^[20];另外,新的激光输出波长也为基础物理研究、激光加工、医学等领域的应用开拓了新的空间。

5 结 论

对DPRGL的基本原理和目前国际研究进展进行了综述,分析了DPRGL未来实现功率定标放大将遇到的技术难题和挑战,对其在军事民用方面的应用前景进行阐述,DPRGL较DPAL具有的优势将在未来得到广泛的关注和应用。

参 考 文 献

- 1 Chris Gaylord. The Christian Science Monitor: Airborne laser shoots down missile in mid-flight. <http://www.csmonitor.com/Innovation/Horizons/2010/0212/Airborne-laser-shoots-down-missile-in-mid-flight>.
- 2 Calif. Photo-Northrop Grumman Scales New Heights in Electric laser Power, achieves 100 kW from a solid-state Laser. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575.
- 3 YLR-HP Series: 1-50 kW ytterbium fiber lasers. http://www.ipgphotonics.com/apps_mat_multi_YLR.htm.
- 4 J W Dawson, M J Messlerly, R J Beach, *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- 5 Zhu J, Zhou P, Ma Y, *et al.*. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- 6 W F Krupke. Diode Pumped Alkali Laser: US, 6643311[P]. 2003-11-4.
- 7 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(23): 2336-2338.
- 8 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. DPAL: A new class of CW, near-infrared, high-power diode-pumped alkali (vapor) lasers[C]. SPIE, 2004, 5334: 156-167.
- 9 J Zweiback, A Komashko, W F Krupke. Alkali vapor lasers[C]. SPIE, 2010, 7581: 75810G.
- 10 W F Krupke. Diode pumped alkali lasers (DPALs)[J]. *Prog Quantum Electron*, 2012, 36(1): 4-28.
- 11 B V Zhdanov, R J Knize. Review of alkali laser research and development[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(2): 021010.
- 12 A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, *et al.*. Diode-pumped cesium vapor laser with closed-cycle laser-active medium circulation[J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(2): 95-98.
- 13 S S Q Wu, T F Soules, R H Page, *et al.*. Hydrocarbon-free resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2423-2425.

- 14 B V Zhdanov, R J Knize. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(15): 2167-2169.
- 15 Yang Zining. Study on Diode Pumped Rubidium Lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. 77-78.
杨子宁. 半导体抽运铷蒸气激光器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012. 77-78.
- 16 S S Q Wu, T F Soules, R H Page, *et al.*. Resonance transition 795-nm rubidium laser using ^3He buffer gas[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(5): 1222-1225.
- 17 S S Q Wu. Hydrocarbon-Free Resonance Transition 795 nm Rubidium Laser[D]. San Diego: University of California, 2009.
- 18 J Han, M C Heaven. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms[C]. SPIE, 2012, 8547: 854702.
- 19 J Han, Michael C Heaven. Spotlight on optics: gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 2157-2159.
- 20 M C Heaven, J Han. Hybrid lasers for directed energy applications[C]. SPIE, 2012, 10.1117/2.1201211.004562.
- 21 J Han, L Glebov, G Venus, *et al.*. Demonstration of a diode-pumped metastable Ar laser [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(24): 5458-5461.
- 22 M C Heaven, M N Sullivan, G A Pitz. Optical pumping of Ar metastables in a high pressure CW discharge[C]. SPIE, 8962: 896203
- 23 J Han, M C Heaven, G D Hager, *et al.*. Kinetics of an optically pumped metastable Ar laser[R]. SPIE, 2014, 8962: 896202.
- 24 A V Demyanov, I V Kochetov, P A Mikheyev, *et al.*. Kinetic study of CW optically pumped laser with metastable rare gas atoms produced in an electric discharge[J]. *Phys D: Appl Phys*, 2013, 46(37): 375202.
- 25 W T Rawlins, K L Galbally-Kinney, S J Davis, *et al.*. Laser excitation dynamics of argon metastables generated in atmospheric pressure flows by microwave frequency microplasma arrays[C]. SPIE, 2014, 8962: 896203.
- 26 Yu Jianhua, Zhu Qiang, Quan Hongyan, *et al.*. High power alkali vapor laser used in geo-synchronous satellite launching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(11): 18-23.
余建华, 祝强, 全鸿雁, 等. 高功率碱金属蒸气激光器在地球同步卫星发射中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(11): 18-23.

栏目编辑: 张雁