

doi: 10.3788/lop47.051405

半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展

杨子宁 王红岩 陆启生 郭少锋 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 相比于固体和化学激光器, 半导体抽运碱金属蒸气激光器以其极高的量子效率、气体介质易于流动散热、高光束质量、不存在单口径功率限制、安全可靠等优点显示出极大的优势和良好的发展潜力。概述了碱金属激光器的基本原理和最新研究进展, 分析了高功率定标放大可能遇到的障碍和解决途径, 并预测了未来的发展趋势。

关键词 激光器; 半导体抽运碱金属蒸气激光器; 缓冲气体; 碱金属

中图分类号 O436 OCIS 140.1340 140.3480 文献标识码 A

Research Development of Laser Diode Pumped Alkali Lasers

Yang Zining Wang Hongyan Lu Qisheng Guo Shaofeng Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract By contrast with solid and chemical laser, the laser diode pumped alkali laser (DPAL) has shown great predominance and potential because of its extremely high quantum efficiency, outstanding heat dissipation ability, high beam quality, no limit of single aperture power scaling and safe operation. The basic principle and recent research development of DPAL are introduced, the obstacles and solutions of high power scaling of DPAL are analysed, and the expectation of DPAL development is made.

Key words laser; laser diode pumped alkali laser; buffer gas; alkali

1 引言

自第一台激光器问世, 高能激光就成为许多国家追求的目标。在这一领域, 化学激光器和固体激光器均得到了迅速的发展, 但化学激光器大量的危险介质和庞大的体积和固体激光器的热效应等都在一定程度上限制了它们的应用和进一步的功率提升。近年来, 一种新型的碱金属蒸气激光器综合了化学激光器和固体激光器的优点同时克服了各自的缺点而引起人们的高度关注, 得到了迅速的发展。

实际上, 人们对于将碱金属蒸气作为激光介质的考虑早在第一台激光器问世之前就开始了, 并对碱金属原子中的增益和放大自发辐射(ASE)现象进行过深入的研究。但由于与碱蒸气原子吸收谱相匹配的高功率抽运源技术发展的限制, 高效高功率的碱金属激光器一直难以实现, 直至近年来随着半导体抽运源技术的发展, 人们才开始真正意识到这一目标的可行性并开展了大量的研究。美国利弗莫尔国家实验室Krupke等^[1,2]于2003年利用掺钛蓝宝石激光器作为抽运源首次获得斜率效率高达54%的铷激光输出, 并于2006年首次实现多模半导体抽运铷蒸气激光器。美国空军军官学校Zhdanov等^[3,4]于2005年采用掺钛蓝宝石激光器作为抽运源获得了斜率效率高达81%的铯激光, 并于2007年采用半导体抽运得到了连续10 W斜率效率68%

收稿日期: 2009-07-03; 收到修改稿日期: 2009-09-07

作者简介: 杨子宁(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事半导体抽运碱蒸气激光器方面的研究。

E-mail: diablo_3rd@126.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

的铯激光, 之后该小组又实现了17 W的铷激光^[5]以及48 W的铯激光^[6]。美国空军武器实验室、空军技术学院、通用原子公司^[7-9]以及日本的滨松光子公司等也都开展了深入的研究^[10-12]。美国利弗莫尔国家实验室实现了峰值功率100 W的激光输出, 标志着碱金属蒸气激光器发展的又一新的里程碑。

目前, 碱金属蒸气激光器的研究总体上还处于起步阶段。本文对碱金属蒸气激光器的基本原理和最新研究进展进行了综述, 并对其高功率定标放大和未来发展趋势进行了分析和预测。

2 基本工作原理

中性碱金属原子(Li, Na, K, Rb, Cs)最外层只有一个价电子, 具有相似的能级结构, 如图1所示。 $^2S_{1/2}$ 为基态能级, $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 为自旋-轨道相互作用而劈裂的激发态能级。其中 $^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ 和 $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ 两组跃迁分别对应于 D_1 谱线和 D_2 谱线, 在碱金属蒸气激光器中分别称之为激光跃迁和抽运跃迁, 对碱金属蒸气进行抽运就是要实现 $^2S_{1/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 能级之间的粒子数反转。不同碱金属原子的跃迁参数如表1所示。由于Li和Na上能级间隙极小, 激光阈值很高, 难以实现有效的粒子数反转, 因此目前人们感兴趣的碱金属元素主要集中在K, Rb和Cs。碱金属原子的量子效率极高(Nd, 76%; Yb, 91%), 因此可能获得很高的光-光转换效率同时可以大大减少介质中产生的废热。从表中可以看出碱金属原子可以用目前发展比较成熟的InGaAsP和AlGaAs等半导体激光器进行抽运, 即半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL), 如图2所示。

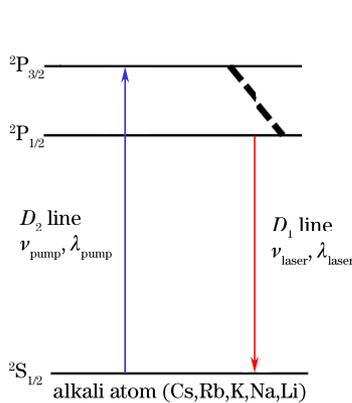


图1 碱金属原子能级结构简图
Fig.1 Energy levels of alkali atom

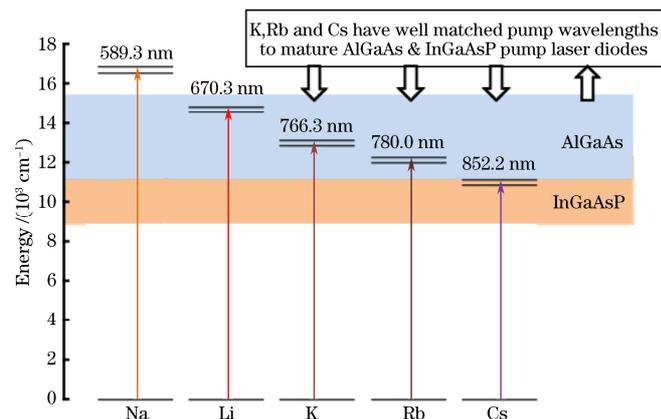


图2 不同碱金属原子抽运波长与半导体激光器波长范围的关系
Fig.2 Pump wavelengths of alkali atoms versus laser wavelengths of diode lasers

表1 不同碱金属原子的抽运波长、激光波长、能级间隔和量子效率

Table 1 Alkali D_1 and D_2 transition wavelengths, laser wavelengths, energy level separations and quantum efficiency

Atom	$\lambda_{\text{pump}}(D_2) / \text{nm}$	$\lambda_{\text{laser}}(D_1) / \text{nm}$	$\Delta E(^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}) / \text{cm}^{-1}$	Q-efficiency /%
K	770.11	766.70	57.7	99.5
Rb	780.25	794.98	237.9	99.4
Cs	852.35	894.95	554.1	95.2

DPAL 的有效实现需要解决三个方面的问题: 一是碱金属原子的 D_2 线多普勒线宽非常窄(K, $1.64 \times 10^{-3} \text{ nm}$; Rb, $1.16 \times 10^{-3} \text{ nm}$; Cs, $1.02 \times 10^{-3} \text{ nm}$, $T = 373 \text{ K}$), 而市售的半导体激光器谱宽在 $0.2 \sim 2 \text{ nm}$, 难以实现有效的抽运。为了解决这个问题, 人们一方面加入氦气等缓冲气体通过碰撞加宽的方式均匀加宽原子的吸收光谱, 加入 $2.0265 \times 10^6 \text{ Pa}$ 的氦气可以将碱金属原子吸收线宽展宽到 0.5 nm ; 另一方面采用体布拉格光栅等元件对半导体激光器输出谱宽进行压缩和稳频。二是采用合适的抽运结构使得抽运能量被有效吸收, 这是 DPAL 得以高效运行的重要条件。碱金属原子在谱线远翼具有较大的吸收截面, 因此即使半导体激光器的发射谱宽几倍于原子吸收谱宽, 在合适的抽运结构下仍可能得到较高的吸收效率, 目前普遍

采用端面抽运结构并获得了很高的吸收效率(大于 90%)。三是 $^2P_{3/2}$ 能级上的集居数必须快速弛豫到 $^2P_{1/2}$ 能级以抑制自发辐射, 实现有效的粒子数反转, 这可以通过加入小的烃类分子等缓冲气体来实现, 如甲烷、乙烷等。

3 国际研究最新进展

3.1 半导体端面抽运碱金属蒸气激光器

碱金属激光器发展之初, 大多采用谱宽很窄的可调谐抽运源进行验证性实验, 如掺钛蓝宝石激光器^[1,3,13~15]、橄榄石激光器等^[16], 并采用端面抽运结构以实现碱金属原子对抽运光的高效吸收。Zhdanov等^[3]于2006年采用谱宽200 kHz的掺钛蓝宝石激光器端面抽运铯蒸气(加宽后吸收谱宽10 GHz)获得了斜率效率81%、光-光转换效率63%的0.35 W高效激光输出, 光路如图3所示。该实验充分优化了抽运结构、操作温度、耦合输出率等参量, 目的是尽可能地提高铯蒸气激光器的效率。实验值已十分接近最大的理论斜率效率(85.8%), 其偏差可能由重吸收效应引起, 这也是目前所得到的最高的效率。

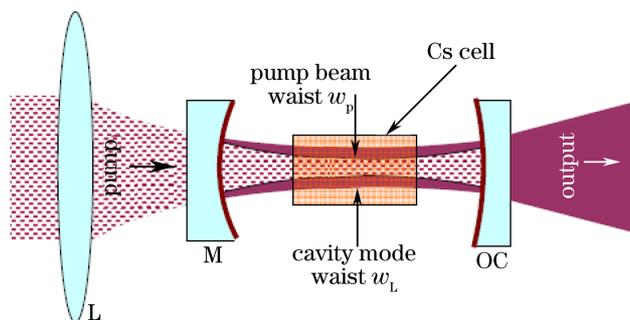


图3 端面抽运铯蒸气激光器结构示意图
Fig.3 Structure of end-pumped Cs laser

然而, 最初所采用的可调谐抽运源(如掺钛蓝宝石激光器等)功率很低(0.1~1 W), 目的是对碱金属激光器性能进行探索性的定量研究。为了提高功率, 开始采用半导体激光器进行抽运。由于碱蒸气原子的吸收谱线很窄(加入 1.01325×10^5 Pa氩气后谱宽为10 GHz), 需要对半导体抽运源的发射线宽进行压缩, 目前主要利用波长选择元件组成外腔式半导体激光器以压缩谱宽。Yujin Zheng等^[17]利用体布拉格光栅作为波长选择元件将谱宽压缩至原来谱宽的1/14获得100 GHz 20 W的808 nm激光输出, 效率高达87%; Babcock等^[18]利用全息平面反射光栅作为波长选择元件对1000 GHz 45 W的半导体激光器进行谱宽压缩, 分别获得64 GHz 30 W以及47 GHz 12 W的795 nm激光输出; B.V. Zhdanov等^[19]采用全息平面光栅获得谱宽11 GHz 10 W的852 nm激光输出。由于碱蒸气原子在谱线远翼也有较大的吸收截面, 因此即使半导体激光器的谱宽大于吸收谱宽也可以实现有效的抽运。美国利弗莫尔实验室的Page等^[2]于2005年第一次实现了多模半导体抽运的铯蒸气激光器, 随后不断提高抽运功率和优化抽运结构, DPAL的功率和效率得到了不断的提高, 主要研究单位和成果见表2所示^[4~6,12,15,20~22]。

目前有详细文献报道的DPAL最高输出功率为Zhdanov等^[6]在2008年采用四路端面抽运铯蒸气所获得的48 W激光输出, 实验光路如图4所示。抽运源每路最大输出为25 W, 谱宽10 GHz, 与加宽后的铯蒸气(12 GHz)具有较好的光谱匹配, 其中两个45°的二向色镜(DM)用来分离激光和抽运光, 实验结果见图5。在脉冲模式下(抽运脉宽100 ms, 频率1 Hz)得到了48 W的激光输出, 光-光转换效率49%。在连续模式下实验结果则偏离直线而下滑, 这是由热效应所导致的。通过简单的估算可以得出该实验中在40 W的连续抽运下直径0.8 mm的铯蒸气柱的中心和边缘温差达300 °C, 热效应非常明显。

表2 端面抽运碱蒸气激光器主要研究成果
Table 2 Summary of end-pumped DPAL experimental results to date

Year	Institute	Atom	Buffer gas	$\Delta\lambda_{\text{pump}}/\text{nm}$	P_{pump}/W	P_{out}/W	$\eta_{\text{slope}}/\%$
2006	LLNL	Rb	ethane He	0.3	13	1	10
2007	Hamamatsu	Cs	ethane He	0.3	50	7	14
2007	UAFA	Cs	ethane	0.027	16	10	68
2007	UAFA	Rb	ethane	0.027	18	8	60
2007	UAFA	Rb	ethane	0.027	37	17	53
2008	Newport	Rb	methane He	0.25	64	7.8	15
2008	UAFA	Cs	ethane He	0.027	96	48	52
2009	Hamamatsu	Cs	ethane He	0.3	23.1	12.1	33
2009	LLNL	Rb				100	

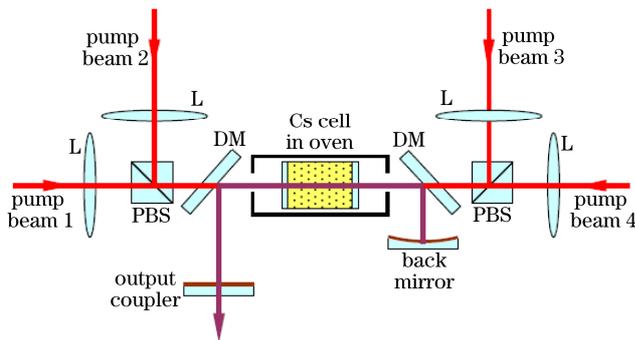


图4 四路端面抽运铯蒸气激光器结构示意图
Fig.4 Structure of four channels end-pumped Cs laser

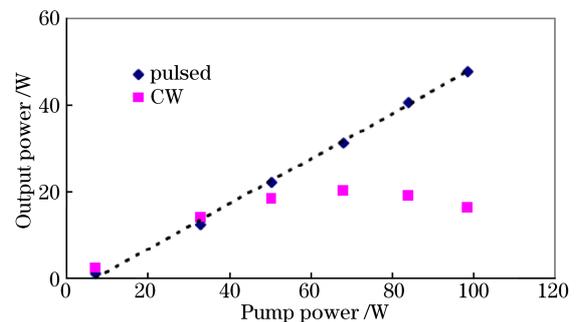


图5 四路端面抽运铯蒸气激光器实验结果
Fig.5 Experimental results of four channels end-pumped Cs laser

端面抽运结构可以提高碱金属蒸气对抽运光的吸收效率，在一定程度上能够弥补抽运源和碱金属原子谱宽不匹配的问题。但在高功率条件下(大于100 kW)端面抽运结构却存在一定的限制因素：一是废热的处理，不利于采用流动冷却方式散热；二是对半导体激光器的光束质量要求较高；三是抽运结构较为复杂，抽运光要进行多路耦合；四是激光与抽运光共用光学元件，可能带来较大的腔内损失。

3.2 侧面抽运碱金属蒸气激光器

为了解决高功率条件下端面抽运结构可能存在的限制，提出了流动冷却侧面抽运碱金属蒸气激光器的设想^[23]，如图6所示。这种结构允许进行双侧或双程抽运，对半导体抽运源亮度要求大大降低(小于1/10端面抽运)，抽运光与激光不共线既减轻了光学元件的负担又避免了额外的腔内损失，目前这一方案已越来越受到人们的关注。美国空军武器实验室已于2009年与通用原子宇航系统公司签订了66万美元的合同研制高功率侧面抽运碱金属蒸气激光器。Zhdanov等^[24]于2008年首次进行了碱金属激光器的侧面抽运的实验研究，如图7所示。

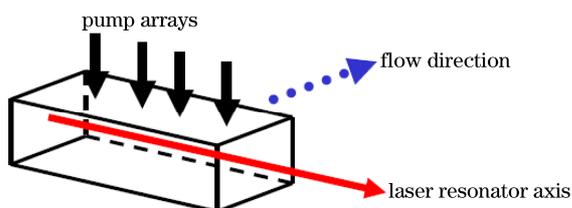


图6 侧面抽运流动冷却碱金属蒸气激光器示意图
Fig.6 Flowing medium DPAL configurations with transverse pumping

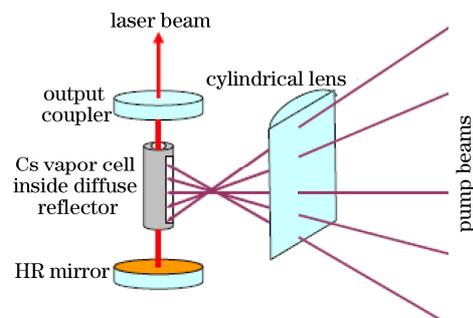


图7 侧面抽运铯蒸气激光器结构示意图
Fig.7 Schematic diagram of the transverse pumped Cs laser configuration

封装气体介质的容器置于圆柱形漫反射腔中，其上开有狭缝以接受抽运辐射。抽运源共采用15个抽运模块，单模块最大输出功率15 W，每3个抽运模块作为一组，为了避免过强的热效应采用脉冲抽运，实验结果如图8所示。该实验的斜率效率为15%，光-光转换效率为14%，该结果低于端面抽运结构(68%和62%)，主要由于激光腔模体积与抽运腔体积相差较大，导致抽运光有很大一部分没有被腔模充分利用。该小组准备进一步采用非稳腔结构增大模体积以进一步提高抽运效率。

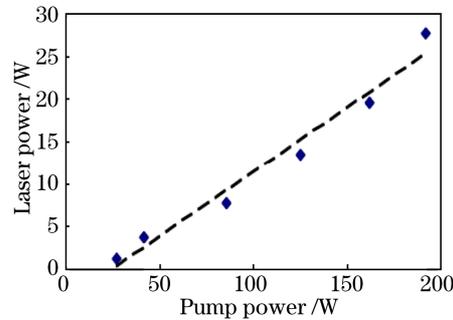


图 8 侧面抽运铯蒸气激光器实验结果($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig.8 Experimental results of transverse pumped Cs laser ($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3.3 主振荡功率放大器结构碱金属激光系统

类似于固体激光器，为了降低热负载和进一步提高输出功率，人们开始考虑主振荡功率放大器(MOPA)结构碱金属激光系统。Zhdanov等^[25]于2008年首次报道了碱金属激光放大器的实验结果，实验光路如图9所示。实验结果如图10和11所示，在10 mW的种子光和18 W的抽运功率下得到小信号增益系数 2.5 cm^{-1} ，功率放大因子为21.6 dB。

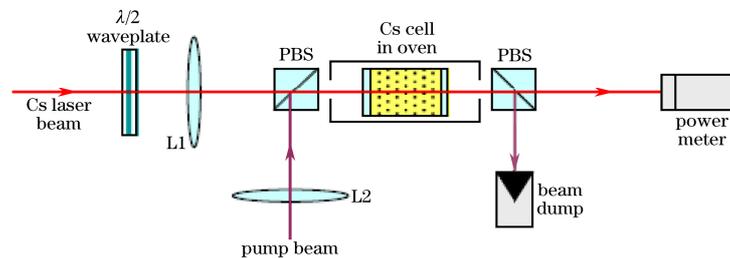


图 9 半导体抽运铯蒸气激光放大器实验示意图

Fig.9 Structure of laser diode pumped cesium vapor amplifier

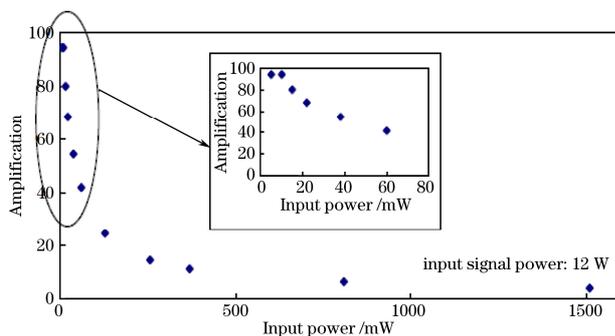


图 10 功率放大因子与入射激光功率的关系

Fig.10 Dependence of the Cs amplifier amplification factor on the input power

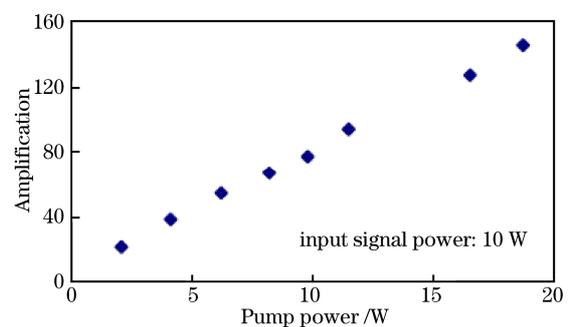


图 11 功率放大因子与抽运光功率的关系

Fig.11 Dependence of the Cs amplifier small signal amplification factor on the pump power

美国空军武器实验室和波音公司^[23]于2008年也报道了单级放大MOPA结构碱金属激光系统的研究结果，得到放大器能量抽取效率为14%，小信号增益系数 0.91 cm^{-1} ，功率放大因子为7.9 dB。

3.4 无烃碱金属蒸气激光器和充满潜力的钾蒸气激光器

早期的研究中同时采用烃类分子和稀有气体作为缓冲气体，然而实验中发现较高温时烃类分子会与活性很强的碱金属原子发生反应，生成碱金属水合物和石墨。这两种物质会散射和吸收抽运光而带来额外损失导致阈值升高输出功率下降，石墨等聚集在容器壁会对碱金属容器造成污染甚至损坏，并且随着温度和光强的增加反应速率会进一步增加，严重限制了碱金属激光器的高功率定标。

为解决这一问题，人们开始对缓冲气体进行研究，发现单独采用氦气同时加快激发态能级混合速率和谱线加宽是可能的，并且具有良好的化学稳定性。实验中已证实了 K-He, Rb-He 激光系统的有效运行和良好的化学稳定性^[27,28]。不同碱金属原子与氦气相互作用数据见表3所示。可见，相比于铷和铯，钾在两个方面具有很大的优势：一是极低的量子亏损，这决定了增益介质中的热负载，相同工作条件下在铷和铯中每单位体积中产生的热量分别是钾的4.2倍和11倍；二是远远大于铷和铯的能级混合速率，在钾蒸气中可以通过单独加入氦气而实现上能级间的快速弛豫，实际上 1.01325×10^5 Pa的 K-He 能级混合速率相当于在铷蒸气中加入 1.333×10^4 Pa的乙烷。

表3 不同碱金属原子与氦气的能级混合速率和碰撞加宽系数
Table 3 Fine-structure mixing rate and collisional broadening rate of alkali atoms with He

	K	Rb	Cs
He 2P mixing rate / ($10^4 s^{-1} Pa^{-1}$)	8.0	0.044	0.0005
He $^2P_{3/2}$ broadening rate / ($10^{-5} nm Pa$)	0.034	0.044	0.072
He $^2P_{1/2}$ broadening rate / ($10^{-5} nm Pa$)	0.026	0.036	0.069

虽然，极高的量子效率会导致反转粒子数比例的降低，但无论是怎样的反转粒子数比例，原子都要经历从 $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2} \rightarrow ^2S_{1/2}$ 的循环，在稳态时这些过程的速率是相等的。较低的反转粒子数比例仅仅意味着较低的增益，却不意味这种速率也很低，而这种速率才是与激光输出效率联系最紧密的。图 12 给出了相似条件下钾、铷和铯的热负载和效率随温度的变化关系，模型假设采用长度为 15 cm，直径为 2 mm 的波导结构容器，He 均为 2.0265×10^5 Pa，抽运源谱宽 0.25 nm，功率 1250 W。从图 12 可以看出，钾蒸气激光器最高效率为 71%，虽然略低于铷(82%)和铯(82%)，但热负载却远远低于铷和铯，并且可以避免碱金属原子与烃类缓冲气体的化学反应，综合考虑钾蒸气激光器在高功率定标中具有极大的潜力和优势。

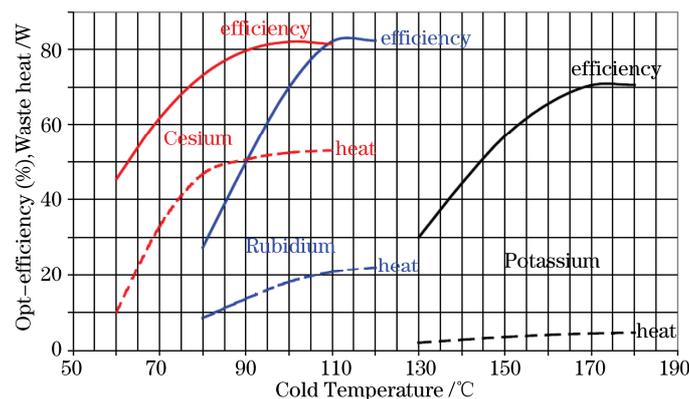


图 12 碱蒸气激光器的光-光转换效率和废热随温度的关系
Fig.12 Optical-optical efficiencies and waste heats ($\times 10$) of potassium, rubidium, and cesium DPAL

3.5 基于光解碱金属-惰性气体准分子的宽带抽运碱金属蒸气激光器

大功率半导体抽运源的谱宽压缩和稳频会降低电光转换效率、增加系统复杂性，同时大大提高了成本，于是人们开始考虑宽带抽运方案，这对 DPAL 的高功率定标放大具有重要意义。伊利诺斯州大学和 CU 宇航公司率先联合开展了这方面的工作，提出了一种基于碱金属-惰性气体准分子宽带抽运的碱金属蒸气激光器(XPAL)方案并进行了实验验证^[29]。这种方法的实质是通过引入一种粒子与碱金属原子形成准分子，这种

准分子的抽运吸收带偏离原子自身的共振吸收带同时具有一定的谱宽使其能够有效吸收宽带半导体的抽运能量，处于激发态的准分子会产生离解而将吸收的能量转移至碱金属原子从而产生激光跃迁。因为抽运能量是被准分子吸收的，所以称为准分子抽运碱金属蒸气激光器，该过程如图 13 所示。

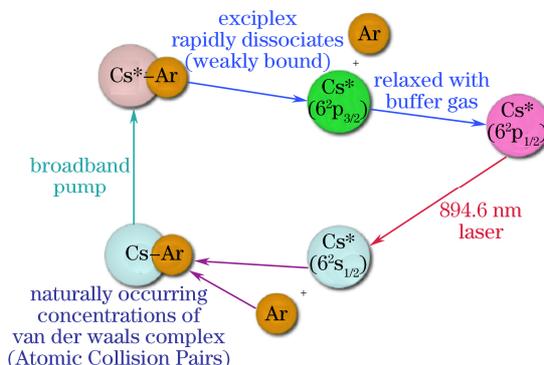


图 13 Cs-Ar 准分子宽带抽运过程示意图

Fig.13 Pictorial representation of the scheme for broadband pumping the cesium (Cs) by introducing the Cs-Ar exciplex

实验中采用谱宽为7 GHz的染料激光器在819~862 nm范围内调谐抽运，输出脉宽4~5 ns，单脉冲能量6 mJ，碱金属蒸气中加入氩气和甲烷，准分子在不同温度下的吸收谱如图14所示，实验结果如图15所示。结果表明在准分子存在的情况下，在835~842 nm以及850~854 nm范围内抽运均获得了852 nm的激光输出，该结果为宽带抽运(大于2 nm)提供了初步的实验验证。

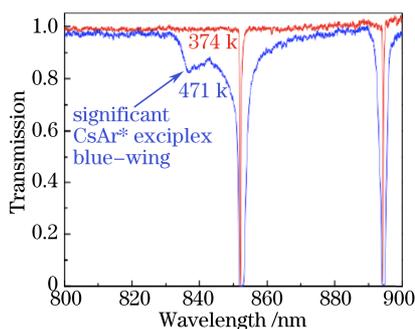


图 14 Cs-Ar 准分子吸收谱

Fig.14 Absorption spectra for Cs-Ar exciplex

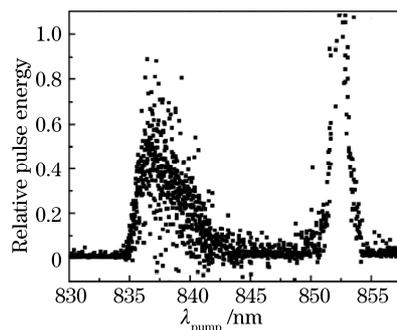


图 15 XPAL 实验结果

Fig.15 Experimental results of XPAL

3.6 DPAL峰值功率突破百瓦，创造新的世界纪录

利弗莫尔国家实验室首次将DPAL的峰值功率突破100 W，这一突破首次在100 W水平演示了无烃DPAL，促进这种方法成为发展可靠功率定标系统唯一可行方法；唯一采用了较易放大至兆瓦级的普通半导体阵列，而不是10 GHz左右的窄线宽半导体阵列；首次采用了可按比例放大的波导式抽运结构。这一成果对碱金属激光器的高功率定标具有重大意义。

4 DPAL 高功率定标放大分析和未来发展趋势

目前国外的研究工作主要着眼于对DPAL高功率定标放大潜力的验证和障碍的突破，其制约因素归纳起来主要有以下5个方面。

1) 缓冲气体。在千瓦甚至兆瓦级功率下化学活性很高的碱金属原子与缓冲气体甚至器壁可能发生化学反应而影响激光器的正常工作，目前虽然在低功率条件下验证了无烃类DPAL，但高功率时是否仍能保证气体组分的化学稳定性则需要进一步的研究。

2) 抽运结构。端面抽运结构在高功率条件下存在诸多限制因素，侧面抽运结构将是碱蒸气激光器未来发展的主要方向。

3) 半导体抽运源。大功率半导体抽运源的谱宽压缩和稳频会带来电光转换效率的下降和成本的增加。

4) 其他原子能级的影响。目前的理论分析只考虑3个能级 $^2S_{1/2}$, $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$, 虽然在低功率情况下与实验结果相一致^[22], 但高功率时则需要进一步考虑其他原子能级的影响。如两个受激态 2P 原子相互作用, 一个跃迁至更高能级另一个回到基态, 这样不仅会导致反转粒子数的下降还可能由于高能态原子的非辐射跃迁产生更多的热量。由于碱金属原子密度较低, 这种相互作用在中低功率下可以忽略, 但在兆瓦级高功率条件下却可能大大影响DPAL的性能。

5) 抽运光和激光的相干效应。碱金属激光器的抽运光与激光频差很小, 当缓冲气体气压很低且激光和抽运光具有较高强度时, 集居数可能(全部或部分的)被相干驱动从而导致非均匀饱和、增益下降等效应。

DPAL 未来的发展一方面以军事和航天领域的应用为目标, 不断解决制约其功率提升的各种因素以实现更高的输出功率; 另一方面将以基础物理研究、激光加工和医学等领域的应用为目标, 不断开拓其中低功率领域的应用范围。在军事领域, DPAL 具有极大的优势和诱人的发展前景, 相比于目前发展较为成熟的化学激光器, DPAL 无需大量危险化学物质、不必采用真空抽运和化学物质排放、波长较短可使衍射限光斑更小功率密度更高; 相比于固体激光器 DPAL 则具有废热少、气体介质易于流动散热、高光束质量等优势。在航天领域, DPAL 的发射波长近大气传输窗口, 且与半导体光电转换器件的高效吸收波长吻合, 因此以 DPAL 为光源的太空激光传能系统在航空航天领域中具有很好的应用前景^[30]。在基础物理研究方面, DPAL 的发展将为原子物理、量子光学以及激光光谱学等领域的研究提供新的实验手段, 如可调谐的窄线宽碱蒸气激光^[31]可以作用于相应碱金属原子的超精细能级间以进行自旋极化和激光制冷等方面的研究, 对碱金属激光进行倍频可以产生潜紫外激光等。在激光加工领域^[32], DPAL 不仅具有良好的光束质量, 而且比目前的固体 YAG 激光和气体 CO₂ 激光波长更短, 更容易被材料吸收和具有更高的衍射限功率密度, 因而有更高的加工效率。在医学领域 DPAL 可以使碱金属原子产生自旋极化, 在核磁共振领域具有一定的应用价值。在激光器领域, 碱金属光纤激光器、Alkali-CO 等传能的中红外激光、碱金属多光子抽运的可见激光等也将得到快速的发展。目前 DPAL 虽然在输出功率方面远不及固体和化学激光器, 但其高功率定标放大具有极大的可行性且已得到初步的实验验证, 在中低功率同样具有广泛的应用范围, 因此具有极高的研究价值和良好的发展前景。

5 结 语

对 DPAL 的基本原理和目前国际最新研究进展进行了综述, 分析了 DPAL 高功率定标放大可能遇到的限制和未来的发展趋势, 对 DPAL 在军事以及民用领域的广泛的应用范围和良好的应用前景进行了论述, DPAL 以其优越的性能和重要的意义必将在未来得到更大的发展。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 R. H. Page, R. J. Beach, V. K. Kanz *et al.*. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 353~355
- 3 B. V. Zhdanov, T. Ehrenreich, R. J. Knize. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(2): 696~698
- 4 B. V. Zhdanov, R. J. Knize. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2167~2169
- 5 B. V. Zhdanov, A. Stooke, Gregory Boyadjian *et al.*. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **33**(5): 414~415
- 6 B. V. Zhdanov, J. Sell, R. J. Knize. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. *Electron. Lett.*, 2008,

- 44(9): 582~584
- 7 D. A. Hostutler, W. L. Klennert. Power enhancement of a rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8050~8053
- 8 G. Hager, J. McIver, D. Hostutler *et al.*. Quasi-two level analytic model for end pumped alkali metal vapor laser[C]. *SPIE*, 2008, **7005**: 281~289
- 9 G. A. Pitz, G. P. Perram. Pressure broadening of the D1 and D2 lines in diode pumped alkali lasers[C]. *SPIE*, 2008, **7005**: 261~268
- 10 You Wang, Tadashi Kasamatsu, Yujin Zheng *et al.*. Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(14): 14112
- 11 You Wang, Minoru Niigaki, Hirotake Fukuoka *et al.*. Approaches of output improvement for a cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled laser-diode-array[J]. *Phys. Lett. A*, 2007, **360**(4~5): 659~663
- 12 Yujin Wang, Minoru Niigaki, Hirofumi Miyajima *et al.*. High-efficiency 894-nm laser emission of laser-diode-bar-pumped cesium-vapor laser[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**(3): 032051
- 13 R. J. Beach, W. F. Krupke, V. K. Kanz *et al.*. End-pumped continuouswave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(12): 2151~2163
- 14 B. V. Zhdanov, C. Maes, T. Ehrenreich *et al.*. Optically pumped potassium laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2): 353~355
- 15 R. H. Page, R. J. Beach, V. K. Kanz *et al.*. First demonstration of a diode-pumped gas(alkali vapor) laser[C]. *CLEO*, 2005.467~469
- 16 J. Zweiback, W. F. Krupke, A. Komashko. Diode pumped alkali vapor lasers for high power applications[C]. *SPIE*, 2008, **6874**: 68740G
- 17 Y. Zheng, H. Kan. Effective bandwidth reduction for a high-power laser-diode array by an external-cavity technique[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2424~2426
- 18 E. Babcock, B. Chann, I. Nelson *et al.*. Frequency narrowed diode laser array[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 3098~3104
- 19 B. V. Zhdanov, T. Ehrenreich, R.J. Knize. Narrowband external cavity laser diode array[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(4): 221~222
- 20 B. V. Zhdanov, A. Stooke, G. Boyadjian. Laser diode array pumped continuous wave Rubidium vapor laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 748~751
- 21 A. Petersen, R. Lane. Second harmonic operation of diode-pumped Rb vapor lasers[C]. *SPIE*, 2008, **7005**: 700529
- 22 Yujin Zheng, Minoru Niigaki Hirofumi Kan *et al.*. Efficient operation of a cesium-vapor laser longitudinally pumped by a fine-tunable bandwidth-narrowed laser-diode bar[J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2007, **46**(12): 7768~7770
- 23 W. F. Krupke. Diode pumped alkali lasers (DPALs) – an overview[C]. *SPIE*, 2008, **7005**: 700521
- 24 B. V. Zhdanov, M. K. Shaffer, J. Sell *et al.*. Cesium vapor laser with transverse pumping by multiple laser diode arrays[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5862~5863
- 25 B.V. Zhdanov, R. J. Knize. Efficient diode pumped cesium vapor amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15-16): 4068~4070
- 26 D. A. Hostutler, W. L. Klennert. Power enhancement of a rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 8050~8053
- 27 B. V. Zhdanov, R. J. Knize. Hydrocarbon free potassium laser[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(19): 1024~1025
- 28 S. Q. Wu, T. F. Soules, R. H. Page. Hydrocarbon-free resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2423~2425
- 29 J. D. Readle, C. J. Wagner, J. T. Verdeyen *et al.*. Lasing in Cs at 894 nm pumped by the dissociation of CsAr excimers[C]. *CLEO*, 2009
- 30 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
- 31 B. V. Zhdanov, F. Kontur. Tunable single frequency cesium laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(1): 161~164
- 32 Yu Jianhua, Zhu Qiang, Xie Wu *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气激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(7): 46~51