

碱金属蒸气激光器的研究进展

成洪玲^{1,2} 王志敏¹ 张丰丰¹ 田兆硕² 彭钦军¹ 崔大复¹ 许祖彦¹

¹中国科学院理化技术研究所功能晶体与激光技术研究中心, 北京 100190

²哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 山东 威海 264209

摘要 碱金属蒸气激光器具有高量子效率且易于流动散热, 显示出良好的发展潜力。概述了光抽运碱金属蒸气激光器的基本原理和国内外的研究进展。对于其在发展中遇到的问题进行了简要分析, 并总结了目前所采用的相应解决方案, 指出了几种方案所存在的优、缺点。对碱金属蒸气激光器未来可能的研究方向进行了展望。

关键词 激光器; 碱金属蒸气激光器; 缓冲气体; 半导体抽运碱金属激光器; 复合受激态抽运碱金属激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.020002

Research Development of Alkali Vapor Lasers

Cheng Hongling^{1,2} Wang Zhimin¹ Zhang Fengfeng¹ Tian Zhaoshuo²
Cui Dafu¹ Xu Zuyan¹

¹Key Laboratory of Function crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China

Abstract The alkali vapor laser shows great potential because of its high quantum efficiency and outstanding heat dissipation ability. The basic principle and research development of alkali laser are introduced. The obstacles in research are analyzed, the solutions are summarized, and their deficiencies are pointed out. The future development of alkali vapor laser is discussed.

Key words lasers; alkali vapor laser; buffer gas; diode-pumped alkali laser; exciplex-pumped alkali laser

OCIS codes 140.1340; 140.3480; 140.3460

1 引言

以碱金属原子饱和蒸气为激光增益介质的碱金属蒸气激光器, 量子效率理论上可达90%以上, 极大地减少废热的产生, 与一般固体激光介质相比, 废热可减少80%以上; 同时, 碱金属蒸气是流体, 易于进行高效冷却, 快速带走废热。因此, 碱金属激光器具有很好的发展前景。由于碱金属激光波长与大气传输窗口匹配, 并且位于近红外电荷耦合元件(CCD)的敏感波段, 在国防上具有重要的应用价值, 因此受到各国研究人员的广泛关注, 成为激光器领域一个新的研究方向与热点。早在1962年Rabinowitz等^[1]就报道了光抽运铯(Cs)激光器, 但是受到激光器技术发展的限制, 并未得到更进一步的进展。2003年美国利弗莫尔国家实验室的Krupke等^[2-4]提出了使用半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的概念, 并采用钛蓝宝石激光器代替半导体做碱金属铷(Rb)的抽运源, 得到了波长为795 nm的激光。2005年该实验室实现了真正的半导体抽运碱金属激光器, 输出功率约1 mW。近些年来随着半导体抽运源技术的逐渐发展和成熟, 碱金属激光器得到了快速的发展, 到目前为止最高输出功率已达到1 kW。

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-08-21; 网络出版日期: 2015-01-15

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-11-M21)

作者简介: 成洪玲(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事碱金属激光器方面的研究。E-mail: btwife@163.com

导师简介: 王志敏(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事新型激光及变频技术方面的研究。

E-mail: wangzmok@163.com(通信联系人)

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

2 基本原理

中性碱金属原子最外层只有一个价电子,具有相似的能级结构, $^2S_{1/2}$ 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。基态能级 $^2S_{1/2}$ 向激发态能级 $^2P_{3/2}$ 跃迁,对应于抽运光 D_2 谱线;然后激发态能级 $^2P_{3/2}$ 的粒子快速弛豫到激光上能级 $^2P_{1/2}$,从而实现能级间粒子数反转;当激光上能级 $^2P_{1/2}$ 的粒子跃迁回到基态能级 $^2S_{1/2}$ 时,产生激光辐射,对应于 D_1 谱线(见图1)。

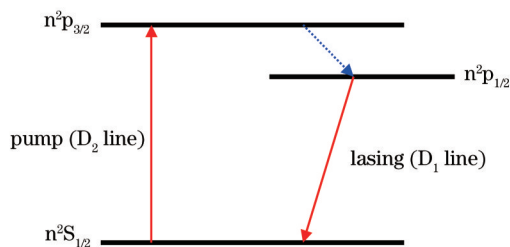


图1 碱金属激光器能级系统

Fig.1 Energy levels of alkali atom

但是碱金属原子锂(Li)和钠(Na)的能级间隔很小(见表1),难以实现有效的粒子数反转,因此目前人们感兴趣的主要集中在钾(K)、Rb和Cs碱金属元素。K的量子效率为99.6%,而Rb和Cs的分别为98.1%和95.3%。

表1 不同碱金属的激光能级特性

Table 1 Laser characteristics of different alkali transitions

Alkali	D_1 (laser) /nm	D_2 (laser) /nm	$\Delta E(n^2p_{1/2}-n^2p_{3/2}) /cm^{-1}$
Li	670.98	670.96	0.34
Na	589.76	589.16	17.2
K	770.11	766.70	57.7
Rb	794.98	780.25	237
Cs	894.59	852.35	554
Fr	All known isotopes are highly unstable		

然而为了实现高功率高效率的碱金属激光输出,需要解决以下问题:1)抽运源线宽和原子吸收线宽不匹配问题,碱金属原子 D_2 线的多普勒线宽非常窄,为皮米量级,如在 $T=373$ K时,K、Rb和Cs的多普勒线宽分别为1.64、1.16、1.02 pm;而现在的半导体激光器输出激光线宽大多在2 nm左右,难以实现有效抽运,目前主要的解决办法是压窄抽运源的线宽同时采用氦(He)等缓冲气体适当展宽碱金属的吸收线宽;2)激光上能级粒子数的弛豫速率小的问题。 $^2P_{3/2}$ 能级上的粒子必须快速跃迁到 $^2P_{1/2}$ 能级以抑制自发辐射,实现有效的能级粒子数反转。目前采用的主要解决方法是加入甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)等烃类气体来实现上能级的快速弛豫;3)上能级粒子数能量的高效提取,通常采用合理的抽运结构使激光和抽运光的重叠区域最大化来实现。此外,高功率运转时,热效应问题、缓冲气体的稳定性问题、碱金属其他能级的影响、抽运光和激光的相干效应、碱金属的离子化问题等都是需要进一步探索研究的问题。目前国内外针对碱金属激光器的研究大都集中在上述问题上并获得了较大的进展。

3 国外碱金属激光器的研究进展

3.1 窄线宽可调谐激光抽运的碱金属激光器

最早开始研究碱金属蒸气激光器时,研究人员大多采用谱宽很窄的可调谐掺钛蓝宝石激光器^[1,3,5-8]或染料激光器代替半导体激光器作为抽运光源,进行验证性实验,并且以端面抽运结构为主,以实现碱金属原子对抽运光的高效吸收。2003年美国利弗莫尔国家实验室Krupke等^[2]利用功率为500 mW连续输出的钛蓝宝石激光器做抽运源(见图2),抽运光波长780 nm,线宽为50 GHz,池内充入69825 Pa的He、9975 Pa C_2H_6 和Rb蒸气,系统工作温度维持在 (120 ± 1) °C。实验得到波长为795 nm,功率为30 mW的接近衍射极限的线偏振激光输出,激光器的斜率效率约为54%。实验结果显示,虽然钛蓝宝石激光器的输出激光线宽比经碰撞加宽的碱金属原子的洛伦兹线宽4倍,但仍有大于39%的抽运功率被工作物质吸收。

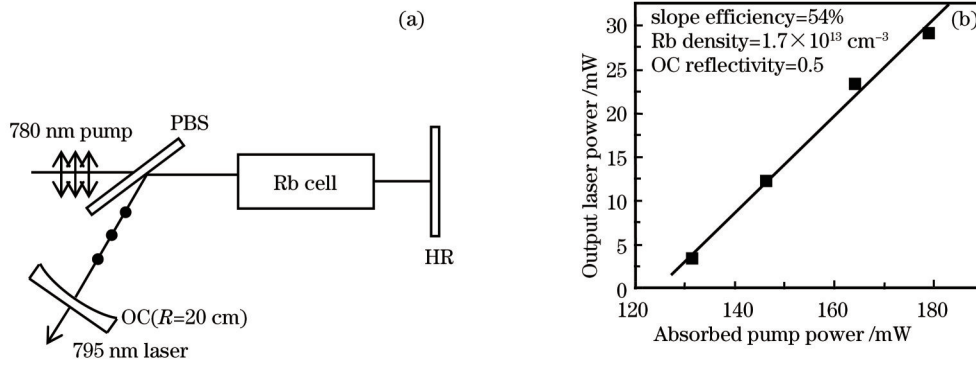


图2 (a)第一台Rb蒸气激光器实验原理图;(b)激光输出功率

Fig.2 (a)Schematic diagram of the experiment of the first Rb laser; (b) experimental results of the output power

美国空军军官学校的Zhdanov等^[5-6]于2006年采用谱宽200 kHz的掺钛蓝宝石激光器端面抽运Cs蒸气[见图3(a)]。该实验充分优化了抽运结构、工作温度和耦合输出率等参量,斜率效率高达81%、实现了光-光转换效率为63%的0.35 W高效激光输出[见图3(b)]。实验获得的效率已十分接近最大的理论斜率效率85.8%,这是碱金属激光器研究到目前为止获得的最高斜率效率。文献[6-7]介绍了可调谐环状Cs激光器,如图4(a)所示。2 cm的腔内充有Cs蒸气和79800 Pa的 C_2H_6 (20 °C),炉内工作温度保持在87 °C。在两个平面镜之间放置一个光学二极管确保激光透射的单向性;使用自由光谱范围为20.7 GHz的F-P标准具选择波长;腔镜 M_3 通过压电传感器进行调谐。实验获得线宽为3.3 MHz且最大输出功率为80 mW的单纵模激光输出,其斜率效率为36%,如图4(b)所示。

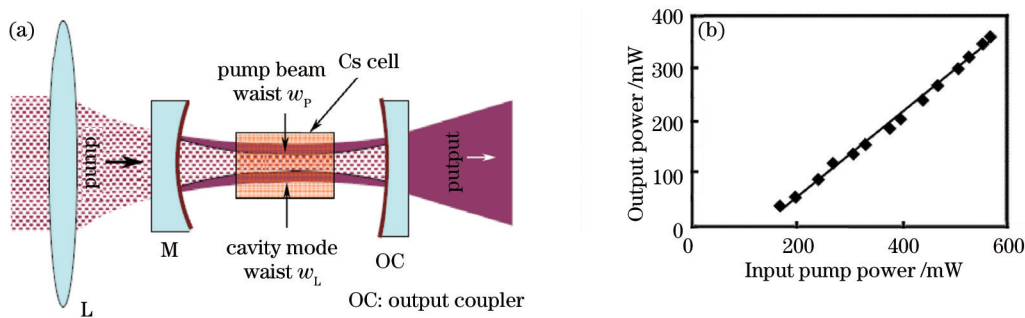


图3 (a)端面抽运Cs蒸气激光器结构示意图;(b)激光器输出功率图

Fig.3 (a) Structure of end-pumped Cs laser; (b) experimental results of output power

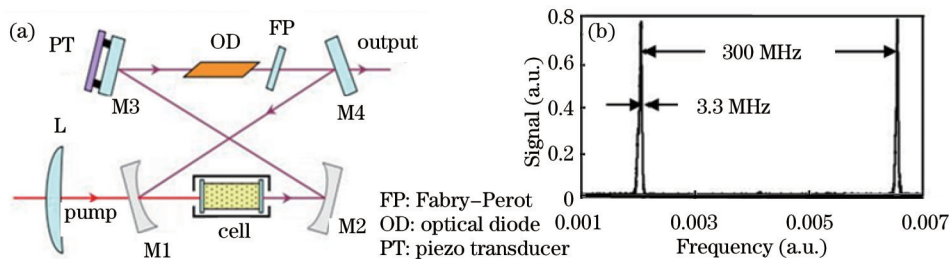


图4 (a)可调谐环状Cs激光器结构图;(b)单纵模输出线宽

Fig.4 (a) Ring structure of tunable Cs laser; (b) spectral bandwidth of single frequency

2010年,Sulham等^[8]报道了利用窄线宽染料激光器双光子抽运碱金属获得了蓝光输出。染料激光重复频率为10 Hz,脉冲能量为100 mJ,脉宽为4 ns,线宽为16 GHz,Rb蒸气池温度为175 °C~250 °C,未充入任何缓冲气体,获得了8 μ J的蓝光激光输出。2011年Zameroski等^[9]分别以Rb- CH_4 和Rb- CH_4 -He作为激光介质,数值模拟出抽运光谱宽度、Rb的原子密度、能级混合速率和抽运功率密度对输出激光的影响,并进行了实验验证。实验以钛蓝宝石脉冲激光器作为抽运光源,其重复频率是10 kHz,脉冲宽度为100 ns,抽运线宽50 GHz,碱金属蒸气增益池窗口采用布儒斯特窗结构,长度为12.7 cm。抽运功率密度为120 kW/cm²时,实验得到斜率效率为72%~76%

的脉冲激光输出,并测得 M^2 值在衍射极限的10~20倍之间。实验得到的结果与数值模拟的结论能够很好地吻合。

3.2 窄线宽半导体激光器抽运的碱金属蒸气激光器

3.2.1 端面抽运结构

窄线宽钛宝石激光器抽运碱金属的一系列实验,为研究人员实现半导体抽运碱金属激光器奠定了实验基础。2005年利弗莫尔实验室使用多模半导体激光抽运Rb蒸气,首次实现了真正的半导体抽运碱金属激光器,输出激光约 $1\text{ mW}^{[10-11]}$,这是碱金属激光器领域里程碑式的进展。但实验中的斜率效率小于10%,远小于窄线宽钛蓝宝石激光器抽运碱金属时得到的81%的斜率效率,其原因在于半导体激光器的输出线宽远大于碱金属原子的吸收线宽。同年该实验室第一次实现了多模半导体抽运的Cs蒸气激光器。随着研究人员增大抽运功率和对激光器抽运结构的优化,DPAL的输出功率和激光器效率得到了不断的提高。

为了获得更高抽运密度从而得到更高碱金属输出功率,研究人员采用了多路抽运的方式。2008年,Zhdanov等^[12]采用半导体端面四路抽运Cs蒸气[见图5(a)]。实验光路中加入两个 45° 的双色镜(DM),用来分离激光和抽运光。抽运光在脉宽为100 ms、重复频率为1 Hz的脉冲模式下工作,光谱宽度为10 GHz,每路抽运光的最大输出功率为25 W;加宽后的Cs蒸气的吸收谱宽为12 GHz,脉冲激光输出的最大功率为48 W,光-光转换效率为49%[见图5(b)]。抽运光在连续模式下工作时,由于热效应非常明显(蒸气池的边缘与中心温差在 300°C)使得实验测得的结果偏离直线,呈现下滑趋势。

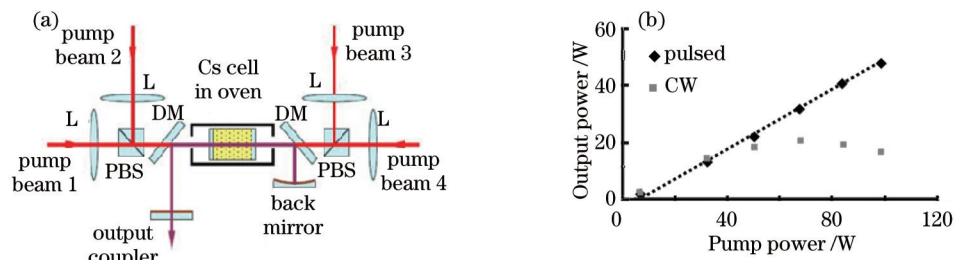


图5 (a)四路端面抽运Cs蒸气激光器结构示意图;(b)四路端面抽运Cs蒸气激光器实验结果

Fig.5 (a) Structure of four channels end-pumped Cs laser; (b) experimental results of four channels end-pumped Cs laser

为了降低端面抽运结构存在的热负载等问题的影响和提高激光输出功率,Zhdanov等^[13-15]于2008年报道了主振荡功率放大器(MOPA)结构的碱金属激光系统,实验光路如图6(a)所示。输入种子光10 mW,放大器抽运功率为18 W,实验得到小信号增益系数为 2.5 cm^{-1} ,功率放大因子为21.6 dB[见图6(b)]。同年美国空军武器实验室和波音公司^[16]也报道了单级放大MOPA结构碱金属激光系统的研究结果,得到小信号增益系数 0.91 cm^{-1} ,功率放大因子为7.9 dB。

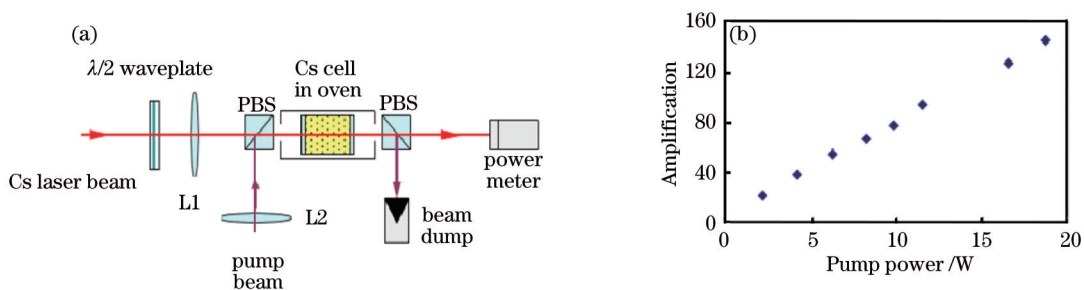


图6 (a)半导体抽运Cs蒸气激光放大器实验示意图;(b)功率放大因子与抽运光功率的关系

Fig.6 (a) Structure of laser diode pumped Cs vapor amplifier; (b) Cs amplifier small signal amplification factor on the pump power

为了解决烃类气体和碱金属反应生成的碳对激光窗口的污染问题,研究人员提出了无烃碱金属蒸气激光器仅用Rb-He蒸气作为增益介质^[17-19],利弗莫尔实验室于2010年研究了高功率半导体激光器阵列抽运Rb-He体系碱金属激光器^[18-19](见图7)。加入He将Rb的吸收线宽加宽到0.06 nm,利用线宽为0.2 nm的千瓦级半导体激光器进行抽运。通过微通道水冷的方法对蒸气池进行温度控制,激光头设计采用布儒斯特角

结构以降低损耗,实验得到了更加稳定和更高功率的激光输出。他们同时进行了两种实验:1)采用脉冲宽度为1 ms、重复频率为140 Hz(占空比为14%)和峰值功率为2200 W的脉冲光进行抽运,得到了峰值功率为207 W的激光输出;2)采用功率为1280 W连续光抽运,得到130 W连续激光输出,如图8所示。虽然此种方案得到了较高的输出功率,但是激光器效率较低,这是因为Rb的吸收线宽和抽运光的线宽相差较大的原因。如果再继续加入He,就会出现高压电离等问题,所以目前此种方案的研究报道较少。

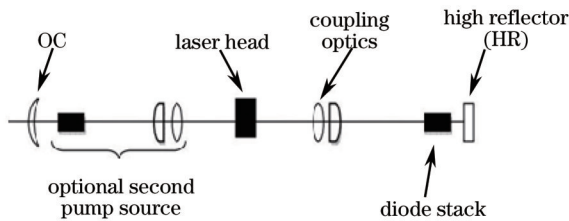


图7 端面抽运 Rb-He 激光器原理图

Fig.7 Schematic diagram of end-pump Rb-He laser

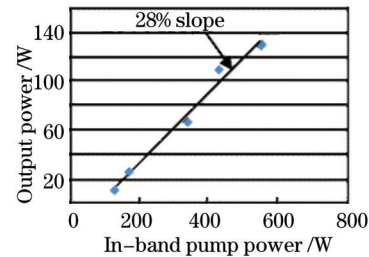


图8 连续抽运 Rb-He 激光器激光输出功率

Fig.8 Output power of CW pump Rb-He laser

在2012年,Bogachev等^[20]报道了目前国际上最高输出功率的碱金属蒸气激光器。工作物质采用的是He-CH₄-Cs的混合物,它们被封闭在一个闭循环腔体内,采用双侧端面抽运的结构[见图9(a)]。此实验并没有使用与外界进行热交换的方式加热蒸气池内的碱金属工作物质,而是采用抽运激光直接加热的方法。抽运光功率为2 kW时,得到了最高激光输出功率1 kW,光-光转换效率为48%,如图9(b)所示。

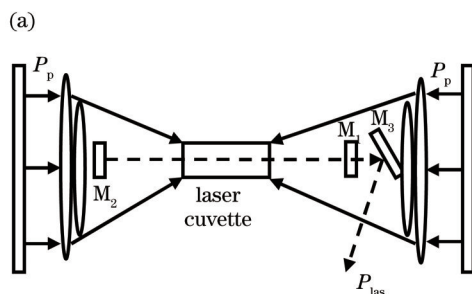
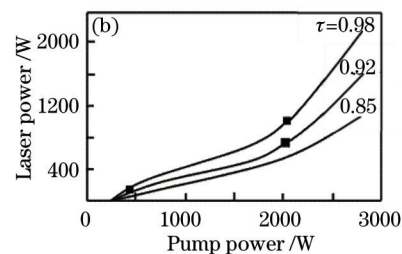


图9 (a)双侧端面抽运 Cs 激光器原理图;(b) Cs 激光器激光输出功率

Fig.9 (a) Structure of two ends pumped Cs laser; (b) output power of Cs laser



3.2.2 侧面抽运结构

碱金属激光器采用端面抽运结构时,抽运光与输出激光共轴,具有热效应严重等问题^[16],研究人员提出了侧面抽运碱金属蒸气激光器的设想。Zhdanov等^[21]于2008年进行了碱金属激光器的侧面抽运的实验研究,如图10所示。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。半导体抽运源总共采用15个模块,每个模块最大输出功率为15 W,每3个模块作为一组,为了避免激光器运转时产生过强的热效应而采用脉冲方式抽运,激光器的斜率效率为15%,光-光转换效率为14%(见图11)。该结果远低于端面抽运结构的效率,其主要原因是激光模体积与抽运光模体积相差较大,导致大部分的抽运光没有

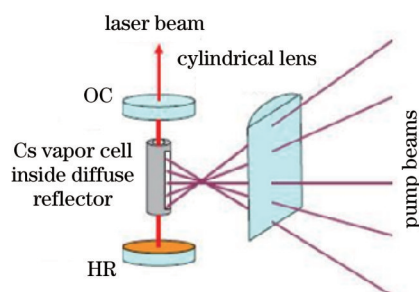
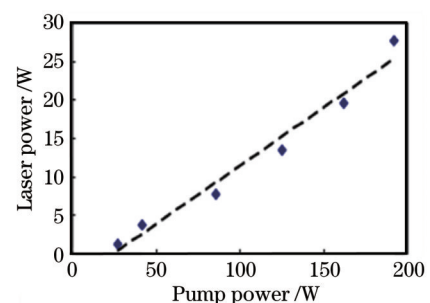


图10 侧面抽运 Cs 蒸气激光器结构

Fig.10 Schematic diagram of the transversely pumped Cs laser

图11 侧面抽运 Cs 蒸气激光器实验结果($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$)Fig.11 Experimental results of the transversely pumped Cs laser ($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$)

被充分利用。研究人员采用非稳定腔结构来增大激光模体积,此种方案可以进一步提高提取效率^[22],如图12所示。该实验采用脉宽500 μs 、重复频率20 Hz的脉冲半导体激光器阵列作为抽运源,抽运光在通过狭缝时仅有25%的损耗。实验数据显示激光器的斜率效率达到43%,在157 W有效抽运功率下激光器的最大输出功率为49 W,最大光-光转化效率为31%,很明显此实验方案可以得到更高的效率。这种结构可以从双侧进行抽运和流动冷却,对半导体抽运源功率密度要求大大降低,且抽运光与输出激光不共线,既可减轻光学元件的负担又可避免额外的腔内损失,因此侧面抽运的方案已受到越来越多的关注。美国空军武器实验室已于2009年与通用公司开始共同研制高功率侧面抽运碱金属蒸气激光器。

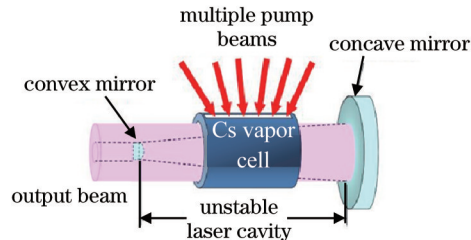


图12 非稳定腔侧面抽运激光器原理图

Fig.12 Design of transversely pumped Cs laser with un-stable resonator

3.3 复合受激态抽运碱金属激光器

为了解决碱金属原子的吸收线宽与抽运源线宽匹配的问题,伊利诺斯大学提出了将碱金属和稀有气体(Kr或Ar等)混合成一种新的激光介质,这种激光工作介质仍然采用半导体激光器作为抽运光源,但是其本质是形成的准分子结构吸收了抽运光的能量,因此采用此种工作介质的激光器被称为复合受激态抽运碱金属激光器(XPAL)。文献[23-30]介绍了此种介质的两种不同体系:四能级和五能级体系,基本工作原理如图13所示。其实质是引入稀有气体粒子与碱金属原子形成一种准分子,它的抽运吸收带偏离碱金属原子自身的共振吸收带,同时具有一定线宽使其能够有效吸收宽带半导体抽运能量,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。XPAL的优点在于复合受激态准分子具有“蓝翼”和“红翼”(见图14),能高效率地吸收2 nm左右的半导体抽运光的能量。伊利诺斯大学 Readle 等^[24]使用谱宽7 GHz的染料激光器作为光源抽运激光介质Cs-Ar-C₂H₆,抽运源的波长在819~862 nm范围内可调谐,输出光能量为6 mJ。实验获得的激光斜率效率仅为10%,远小于使用BLAZE-V编码模型理论得出的XPAL最高斜率效率89%。

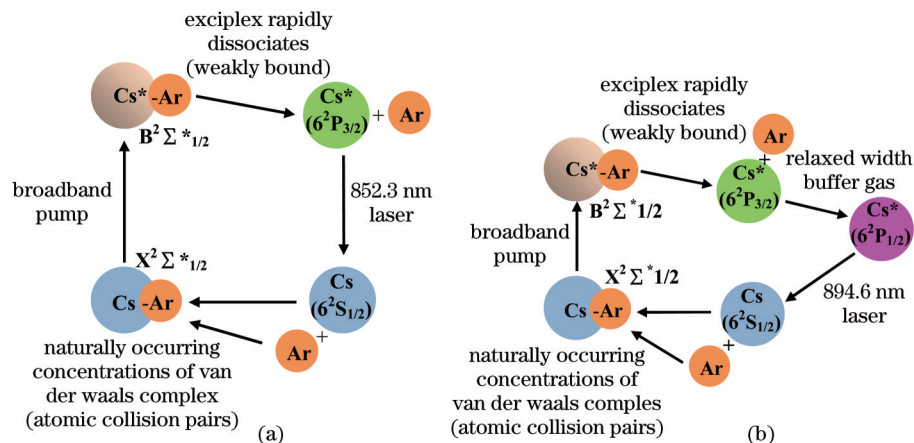


图13 Cs-Ar准分子(a)四能级和(b)五能级体系能级跃迁模型

Fig.13 Pictorial representation of (a) four-level and (b) five-level Cs-Ar excimer operation

图15所示的是抽运Cs-Kr-C₂H₆实验的结果^[26],对两种实验结果进行分析,发现光抽运Cs-Kr碰撞对所需抽运光的阈值能量比Cs-Ar碰撞对大约低40%。同时想要原子碰撞对成功地光缔合,激发原子能级的量子效率一定大于94%。上述两个实验,在835~842 nm和850~854 nm两个波长范围内的抽运光激励准分子的条件,论证了以普通宽带半导体光源抽运准分子碱金属激光器的可能性。Readle等^[23,30-32]成功实现了Cs的894 nm和852 nm以及Rb的795 nm激光输出。

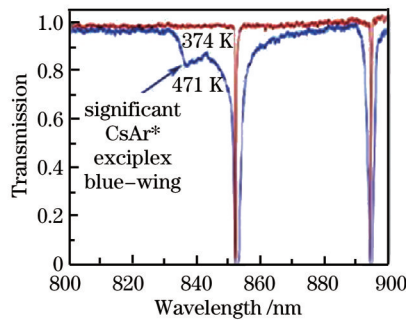


图14 高温下准分子Cs-Ar吸收谱

Fig.14 Absorption spectra of Cs-Ar exciplex

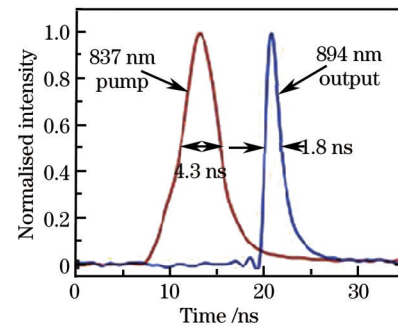


图15 170 °C时准分子Cs-Kr蒸气激光光谱

Fig.15 Laser spectra of Cs-Kr exciplex at 170 °C

3.4 两种半导体激光同时抽运的碱金属蒸气蓝光激光器

蓝光激光器在水下通信、海洋资源探测、高密度光存储等方面有着广泛的应用,因此半导体抽运碱金属蒸气蓝光激光器受到研究人员的关注。Cs和Rb的此种激光器的能级跃迁原理如图16所示,Cs原子吸收波长为852 nm和917 nm的抽运光分别产生 $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{2/3}$ 和 $6P_{2/3} \rightarrow 6D_{5/2}$ 的能级跃迁,然后从能级 $6D_{5/2}$ 快速弛豫到能级 $7P_{3/2}$,最后从能级 $7P_{3/2}$ 回到基态 $6S_{1/2}$,辐射出波长为455 nm的蓝色激光,Schultz等^[33]在2009年获得了最高4 μ W的蓝光激光功率;Rb原子吸收波长为780 nm和776 nm的抽运光分别产生 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{2/3}$ 和 $5P_{2/3} \rightarrow 5D_{5/2}$ 的能级跃迁,然后从能级 $5D_{5/2}$ 快速弛豫到能级 $6P_{3/2}$,最后从能级 $6P_{3/2}$ 回到基态 $5S_{1/2}$,辐射出波长为420 nm的蓝色激光,Meijer等^[34]在工作温度为200 °C时获得了最大40 μ W的激光功率。使用两种半导体激光抽运,整个光路系统比较复杂,阈值较高。碱金属蒸气蓝光激光器虽然具有一定的实际应用前景,但是目前获得的输出功率较低。

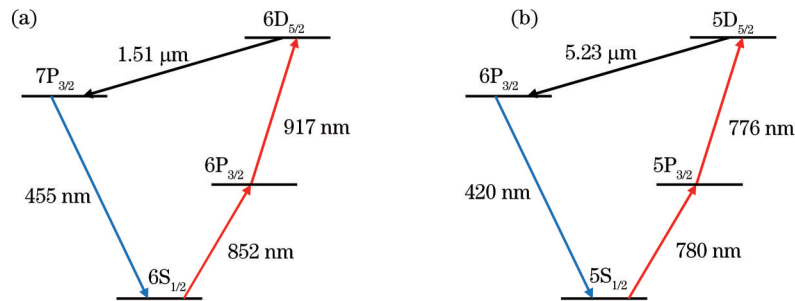


图16 (a) Cs原子蓝光激光器能级跃迁图; (b) Rb原子蓝光激光器能级跃迁图

Fig.16 (a) Energy level scheme for Cs blue laser; (b) energy level scheme for Rb blue laser

4 国内碱金属激光器的研究进展

对于碱金属蒸气激光器,国内研究起步较晚,目前有国防科学技术大学、中国科学院电子学研究所、浙江大学、深圳大学、中国科学院大连化学物理研究所等课题组对其进行了理论和实验方面的研究^[35-53]。

4.1 窄线宽可调谐激光器抽运的碱金属蒸气激光器

2013年中国科学院大连化学物理研究所谭彦楠等^[51],采用双光子技术抽运Rb蒸气,获得420 nm的蓝光激光输出^[51]。该实验采用脉宽为8 ns,重频为10 Hz,单脉冲能量最高20 mJ,线宽为2 GHz的脉冲染料激光器作为抽运源,实验光路图如图17所示。在工作温度达到200 °C时,开始有421.7 nm的蓝光出现(见图18),但由于光斑较弱,并没有测得激光功率。

4.2 窄线宽半导体激光器抽运的碱金属蒸气激光器

2011年,国防科学技术大学在国内首次实现了窄线宽半导体激光抽运的碱金属激光器^[35]。该课题组采用体光栅将作为抽运源的半导体激光器的线宽压缩到0.1 nm,输出的中心波长为780.2 nm。为了降低热效应,通过外加斩波器将抽运光的连续输出转化为脉冲模式,脉宽400 μ s,占空比为1:5。采用增益介质长度为5 mm的Rb饱和蒸气,并在常温下充入33 kPa的 C_2H_6 和47 kPa的He(见图19)。在抽运源输出峰值功率为35.4 W和蒸气池温度120 °C条件下,得到峰值功率600 mW的795 nm的激光输出,斜率效率为1.7%,如图20

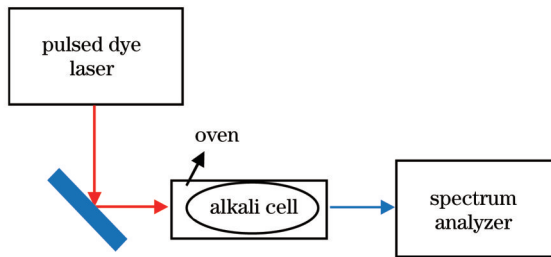


图 17 双光子吸收碱金属 Rb 蒸气蓝光激光器实验图

Fig.17 Experimental diagram of alkali Rb vapor blue laser based on two-photon absorption

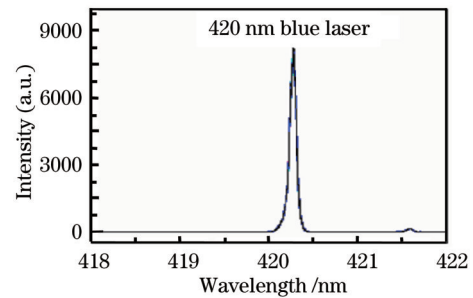


图 18 420 nm 蓝光激光光谱图

Fig.18 Spectrum diagram of 420 nm blue laser

所示。2013年,中国科学院电子学研究所也实现了窄线宽半导体激光器抽运的碱金属激光输出^[50],采用中心波长为 780 nm 的半导体激光器线阵作抽运源,采用平面衍射光栅搭建 Littrow 外腔将线宽压窄至 0.13 nm,同样使用斩波器将半导体连续激光输出变为脉冲输出形式。使用透镜组合对半导体激光进行光束扭转整形,Rb 泡内充入 79 kPa CH_4 作为缓冲气体(见图 21)。控制 Rb 蒸气池温度为 145 $^{\circ}\text{C}$,注入谐振腔的抽运光峰值功率为最高 13 W 时,获得了峰值功率 2.8 W 的线偏振 Cs 激光输出,光-光转换效率达 21%。该研究小组于 2014 年报道了窄线宽半导体激光抽运的 894.6 nm Cs 激光脉冲输出,输出功率为 394 mW^[52]。

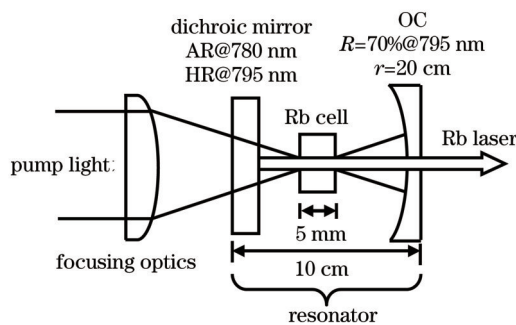


图 19 激光器结构示意图

Fig.19 Schematic of laser system

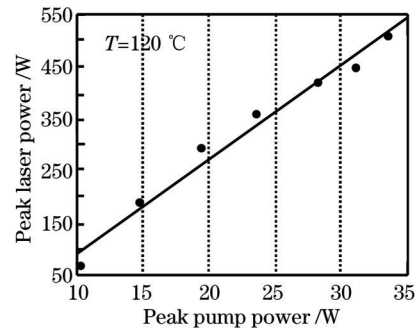


图 20 抽运光功率与激光输出功率的关系

Fig.20 Peak pump power versus peak laser power

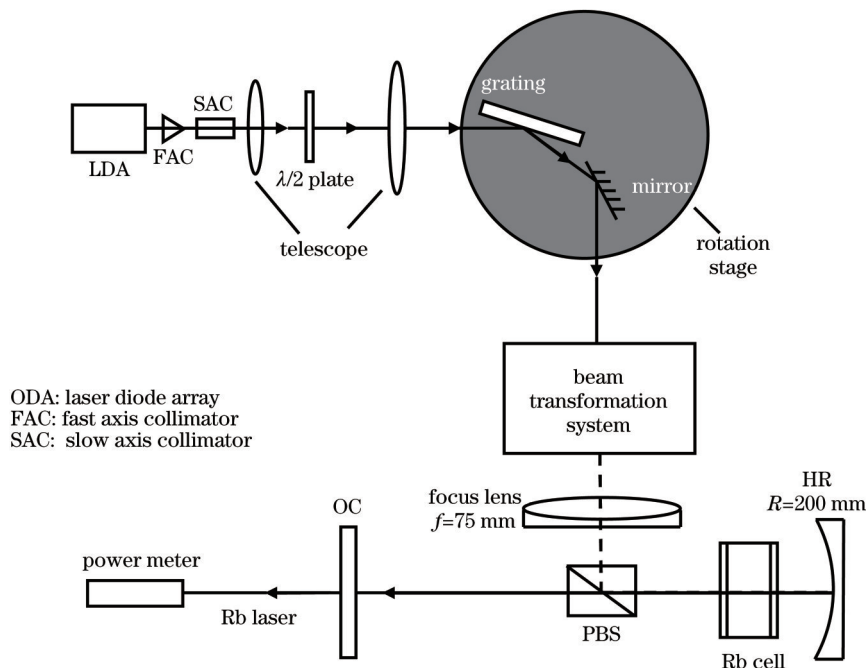


图 21 Rb 激光器结构图

Fig.21 Schematic of Rb laser system

4.3 复合受激态抽运碱金属激光器

在XPAL研究方面,目前仅有国防科学技术大学于2013年进行了报道,采用Rb-Ar混合气体为增益介质,工作温度为136℃时,实现了780 nm Rb激光输出^[53],但是由于抽运光源的功率限制和抽运阈值较高等问题,并没有具体测得激光输出功率。

5 总结和展望

从近十年来研究人员对各种碱金属激光器研究中,可以归纳出以下几种主要技术路线:

1) 窄线宽可调谐激光器抽运的碱金属激光器。此类研究主要是采用窄线宽的可调谐激光器(钛宝石激光或染料激光)作为抽运源,利用其高峰值功率和窄线宽的特点对碱金属激光器的基本原理和基础数据进行验证和分析,其目的是为将来实现半导体激光抽运的高功率碱金属激光器提供基本数据和实验验证。

2) 窄线宽半导体激光抽运的碱金属激光器。此类方案中一般将半导体激光的线宽压缩至0.3 nm以内,但是仍大于碱金属的吸收线宽,同时在蒸气池中充入几万帕的He将碱金属吸收线宽展宽至~0.02 nm,并充入C₂H₆或CH₄等烃类气体提高精细能级的混合速率。这种技术方案相对容易实现激光输出,是目前主流的技术方案。但此方案对半导体激光器的线宽压窄技术提出了很高的要求,在实现窄线宽输出的同时,又要能精确调谐波长,使其对准碱金属的吸收谱,同时还对抽运源的稳频提出了一定的要求。在高功率运转时,半导体激光器阵列线宽压窄效率下降,成本也在逐渐地增加,目前没有适用于碱金属激光的成熟的高功率窄线宽半导体抽运源,各个实验室基本都是自行研制,技术上难度较大。同时,碱金属原子和烃类分子在高温下容易发生化学反应,限制了激光器的高功率运转。

3) 复合受激态抽运的碱金属激光器。其方案很好地实现了吸收线宽与抽运光线宽的匹配;并且不需要烃类缓冲气体,扩大了系统的工作温度,并且高的工作温度可以增加碱金属蒸气的浓度,有益于高功率激光输出。但实现高效吸收只能提高工作温度以增加碱金属蒸气的浓度,这对蒸气池系统的设计提出更高的要求。同时高功率运转时的准分子的稳定性还有待考证,目前其相关机理有待进一步深入研究。

基于上述目前主要技术方案的分析和高功率窄线宽半导体抽运源技术的限制,认为采用线宽稍宽的高功率半导体激光器抽运源(线宽~1 nm)和高压He缓冲气体相结合的技术方案,有望实现高功率碱金属激光器的运转。此方案成本相对较低,但对其峰值功率要求较高,可采用脉冲阵列结合侧抽运波导结构可降低对半导体激光器峰值功率的要求;上能级弛豫问题在高压下也能得到一定程度的解决;同时此方案只充He,不含烃类缓冲气体,高功率时相对稳定,可以工作在更高温度、更高碱金属浓度环境下,有利于实现高功率输出;此外,如果再结合碱金属蒸气循环技术来克服碱金属中性粒子的损耗和热效应问题,可实现更高功率输出。此方案是目前有望实现高功率碱金属激光的潜在技术路径之一。

参考文献

- 1 P Rabinowitz, S Jacobs, G Gould. Continuous optically pumped Cs laser [J]. *Appl Opt*, 1962, 1(4): 513-516.
- 2 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.
- 3 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs) [C]. *SPIE*, 2004, 5448: 7-17.
- 4 R J Beach, W F Krupke, V K Kanz, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling [J]. *J Opt Soc Am B*, 2004, 21(12): 2151-2163.
- 5 B V Zhdanov, T Ehrenreich, R J Knize. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser [J]. *Opt Commun*, 2006, 260(2): 696-698.
- 6 B V Zhdanov, R J Knize. Progress in alkali lasers development [C]. *SPIE*, 2008, 6874: 68740F.
- 7 B V Zhdanov, F Kontur. Tunable single frequency cesium laser [J]. *Opt Commun*, 2007, 280(1): 161-164.
- 8 C V Sulham, G A Pitz, G P Perram. Blue and infrared stimulated emission from alkali vapors pumped through two-photon absorption [J]. *Appl Phys B*, 2010, 101(1-2): 57-63.
- 9 N D Zamoski, G D Hager, W Rudolph, *et al.*. Experimental and numerical modeling studies of a pulsed rubidium optically pumped alkali metal vapor laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(5): 1088-1099.
- 10 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.

- 11 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.
- 12 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.
- 13 B V Zhdanov, R J Knize. Efficient diode pumped cesium vapor amplifier [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(15–16): 4068–4070.
- 14 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.
- 15 B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Scaling of diode pumped Cs laser: transverse pump, unstable cavity, MOPA [C]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810F.
- 16 W F Krupke. Diode pumped alkali lasers (DPALs)—an overview [C]. *SPIE*, 2008, 7005: 700521.
- 17 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.
- 18 J Zweiback, A Komashkoa, W F Krupke. Alkali vapor lasers [C]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810G.
- 19 J Zweiback, W F Krupke. Rubidium and potassium alkali lasers [C]. *SPIE*, 2009, 7196: 71960E.
- 20 A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, *et al.*. Diode–pumped caesium vapour laser with closed–cycle laser–active medium circulation [J]. *Quantum Electron*, 2012, 42(2): 95–98.
- 21 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.
- 22 B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. *Opt Express*, 2009, 17(17): 14767–14770.
- 23 J D Readle, C J Wagner, J T Verdeyen, *et al.*. Lasing in Cs at 894.3 nm pumped by the dissociation of Cs–Ar excimers [J]. *Electron Lett*, 2008, 44(25): 1466–1467.
- 24 J D Readle, C J Wagner, J T Verdeyen, *et al.*. Lasing in alkali atoms pumped by the dissociation of alkali–rare gas exciplexes (excimers) [C]. *SPIE*, 2009, 7196: 71960D.
- 25 A D Palla, D L Carroll, J T Verdeyen, *et al.*. Multi–dimensional modeling of the XPAL system [C]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810L.
- 26 J D Readle, J T Verdeyen, J G Eden, *et al.*. Cs 894.3 nm laser pumped by photo– association of Cs–Kr pairs: excitation of the Cs D₂ blue and red satellites [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(23): 3638–3640.
- 27 J D Readle, C J Wagner, J T Verdeyen, *et al.*. Excimer–pumped alkali vapor lasers: A new class of photo association lasers [C]. *SPIE*, 2010, 7581: 75810K.
- 28 A D Palla, D L Carroll, J T Verdeyen, *et al.*. High–fidelity modeling of an exciplex pumped alkali laser with radiative transport [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2011, 44(13): 135402.
- 29 A D Palla, T V Joseph, D L Carroll. Exciplex pumped alkali laser (XPAL) modeling and theory [C]. *SPIE*, 2010, 7751: 77510F.
- 30 J D Readle, J G Eden, J T Verdeyen, *et al.*. Four level, atomic Cs laser at 852.1 nm with a quantum efficiency above 98%: Observation of three body photo association [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(2): 021104.
- 31 J D Readle. Atomic Alkali Lasers Pumped by the Dissociation of Photoexcited Alkali–Rare Gas Collision Pairs [D]. Urbana–Champaign: University of Illinois, 2010.
- 32 J D Readle, C J Wagner, J T Verdeyen, *et al.*. Pumping of atomic alkali lasers by photoexcitation of a resonance line blue satellite and alkali–rare gas excimer dissociation [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(25): 251112.
- 33 J T Schultz, S Abend, D Döring, *et al.*. Coherent 455 nm beam production in a cesium vapor [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(15): 2321–2323.
- 34 T Meijer, J D White, B Smeets, *et al.*. Blue five–level frequency–upconversion system in rubidium [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(7): 1002–1004.
- 35 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Diode–pumped rubidium vapor laser [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2011, 23(9): 2273–2274
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 半导体抽运铷蒸气激光器国内首次出光 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2273–2274.
- 36 Xie Xiyang, Lei Hong, Zhang Xiang, *et al.*. Key technologies of alkali lasers and its future development [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 582–590.
谢希盈, 雷 甸, 张 翔, 等. 碱金属激光器问题分析与研究展望 [J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 582–590.
- 37 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.
- 38 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 0514051.
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): 0514051.
- 39 Li Yuandong, Wang Hongyan, Yang Zining, *et al.*. Signal broad area high power laser diode with narrowed linewidth [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 0214011.
李元栋, 王红岩, 杨子宁, 等. 窄线宽单宽面源大功率半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 0214011.
- 40 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Influence of fine structure mixing rate on laser diode pumped alkali laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2502-2507.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 精细结构混合速率对半导体抽运碱蒸气激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2502-2507.
- 41 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Influence of spectrum of characteristics on diode pumped alkali laser [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2010, 22(10): 2257-2262.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 光谱特性对半导体抽运碱蒸气激光器性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2257-2262.
- 42 Zining Yang, Hongyan Wang, Qisheng Lu, *et al.*. Modeling of an optically side-pumped alkali vapor amplifier with consideration of amplified spontaneous emission [J]. Opt Express, 2011, 19(23): 23118-23131.
- 43 Zining Yang, Hongyan Wang, Qisheng Lu, *et al.*. Modeling, numerical approach, and power scaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(6): 1353-1364.
- 44 Zhu Qiang, Yu Jianhua, Quan Hongyan, *et al.*. Theoretical analysis of high-power diode laser pumped alkali vapor laser [J]. Infrared & Laser Engineering, 2007, 36: 85-88.
祝强, 余建华, 全鸿雁, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸气激光器的理论模拟[J]. 红外与激光工程, 2007, 36: 85-88.
- 45 Yu Jianhua, Zhu Qiang, Xie Wu, *et al.*. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser [J]. Laser & Optoelectronics, 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[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(7): 46-51.
- 46 Yue Desheng, Li Wenyu, Wang Hongyan, *et al.*. Alkali-vapor laser-excimer pumped alkali laser [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2012, 24(10): 2271-2276.
岳德胜, 李文煜, 王红岩, 等. 准分子宽带抽运碱金属激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2271-2276.
- 47 Yue Desheng, Li Wenyu, Wang Hongyan, *et al.*. Analysis of threshold pump intensity of excimer pumped alkali laser [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2012, 24(11): 2537-2542.
岳德胜, 李文煜, 王红岩, 等. 准分子宽带抽运碱金属激光器抽运特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2537-2542.
- 48 Yang Jing, Pan Bailiang, Wang Yajuan, *et al.*. Analysis on compressing the line-width of the pump source of diode-pumped alkali (vapor) lasers [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 407-411.
杨静, 潘佰良, 王亚娟, 等. 光泵碱金属蒸气激光抽运光源线宽压缩的分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 407-411.
- 49 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, *et al.*. A tunable diode laser with narrow linewidth for Rb vapor pumping [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(5): 902-905.
李志永, 谭荣清, 徐程, 等. 用于Rb蒸气激光抽运的可调谐窄线宽半导体激光器[J]. 光电子·激光, 2012, 23(5): 902-905.
- 50 Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, *et al.*. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102009.
徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出2.8W线偏振铷激光[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102009.
- 51 Tan Yannan, Li Yimin, Gong Faquan *et al.*. 420 nm alkali blue laser based on two-photon absorption [J]. Chinese J 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.
- 52 Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.*. Diode pumped cesium vapor laser [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2014, 26(1): 010102.
李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 半导体抽运铯蒸气实现激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 010102.
- 53 Yu Desheng, Li Lihang, Li Wenyu, *et al.*. Lasing in Rb pumped by dissociation of Rb-Ar excimer [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2013, 25(1): 1-2.
岳德胜, 李礼航, 李文煜, 等. 准分子宽带抽运碱金属激光器实现铷激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 1-2.