文章编号:1002-2082(2011)03-0582-09

碱金属激光器问题分析与研究展望

谢希盈,雷 訇,张 翔,孙 哲,李 强

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

摘 要:简要概述了半导体泵浦碱金属激光器(DPAL)的产生背景与独特优势,以其特性为基础、应用为导向,基于国内外最新进展分析了谱线匹配、连续稳定运转和提高输出功率这三大问题,并对新型复合受激态准分子宽带泵浦碱金属激光器(XPAL)的基本原理及优缺点进行了阐述。通过对碱金属激光器现有解决思路进行对比和总结,在能级理论和缓冲气体作用机理、泵浦机理和腔结构以及高功率定标放大等方面,对未来可能的研究方向进行了展望,以期突破DPAL 相关技术瓶颈,实现高能量高光束质量的红外激光输出。

关键词:激光器;碱金属激光器;DPAL;定标放大;XPAL

中图分类号:TN248 **文献标志码**:A

Key technologies of alkali lasers and its future development

XIE Xi-ying, LEI Hong , ZHANG Xiang, SUN Zhe, LI Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The invention background of alkali laser and its unique advantages are briefly introduced. Based on recent achievements of diode-pumped alkali laser (DPAL), the key technologies that includes line width matching, continuously stable operation and power enhancement are analyzed to meet the application demands. The basic principle of a novel exciplex pumped alkali laser (XPAL), as well as its advantages and disadvantages are explained. By discussing problems existing in this field, potential research work on energy level theory, pump mechanism, buffer gas effect, cavity structure optimization and high-power scaling is proposed to improve output characteristics of DPAL.

Key words: laser; alkali laser; DPAL; scaling magnification; XPAL

引言

随着军事科技的进步和民用需求的增加,高平均功率半导体泵浦激光器(DPL)的发展面临着能源与有效热控两大问题[1]。基于热管理的不同思路,在空间域、时间域和材料学领域的创新引致了薄片激光器、光纤激光器、固体热容激光器以及气/液体作为增益介质的非全固态 DPL,如半导体泵浦的碱金属蒸汽激光器(DPAL)。它相比传统DPL 具有量子效率高、光学性能好、输出线宽窄(可达 MHz 量级)的突出优点,是诞生于 21 世纪发展最为快速的新型激光器之一。

与传统全固态激光器相比,碱金属蒸汽介质可通过流动有效克服热效应和负热透镜进行补偿,除具有固态激光器的特点外,DPAL 还兼有气体激光器的优势。在高功率激光系统中采用非稳腔,可以实现大模体积、大数值孔径和近衍射极限的激光输出。碱金属激光器在近红外波段(Cs: 894 nm;Rb: 795 nm)的波长优势显示出较好前景,美国空军军官学校(USAFA)认为其可用于ABL 和 ATL 机载导弹防御以及单兵便携式防空系统(MANPADS)[2]。同时,光泵浦 Cs 和 Rb 激光器还在 2 μm~5 μm 的中红外范围存在能量,落在大气传输透射窗口的波长适于开展红外对抗(IRCM)。USAFA 十分看好高功率 LDAs 泵浦的

收稿日期:2010-09-19; **修回日期**:2010-12-01

作者简介:谢希盈(1986—),女,北京人,硕士研究生,主要从事能量光电子方向的研究。E-mail:XieXiyingFLY@sohu.com

紧凑型高功率碱金属激光器用作强激光定向系统主激光。另外,由于比传统 DPL 更好的综合性能,以及近大气传输窗口且与几种主流半导体光电转换材料的高效吸收峰较好的吻合[3]的波长(770 nm～895 nm),以 DPAL 为光源的太空激光传能系统将结合功率和光束质量优势,光-光转换效率高可减少废热,且工作物质优廉无害,故在航空航天领域也有着广阔的应用前景。

1　基本原理

位于元素周期表 IA 族的碱金属原子能级结构相似,最外层均只有一个价电子,能级间隔适应半导体泵浦线宽,常用的增益介质为 K、Rb、Cs,如图 1 所示。由于激发态与上能级间隔很小,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 线激光跃迁具有极高的量子效率(K 为 99.6%、Rb 为 98.1%、Cs 为 95.3%,而 1.06 μm 的 Nd:YAG 仅 76%),故 DPAL 从原理上很容易获得 100%/cm 的高增益,实现高光束质量近衍射极限的激光输出。

IA	D_1(激光) /nm	D_2(泵浦) /nm	$\Delta E(^2P_{1/2}-^2P_{3/2})$ /cm^{-1}
^{1}H			
^{3}LI	671	671	0.34
^{11}Na	590	589	17.2
^{19}K	770	766	57.7
^{37}Rb	795	780	237.5
^{55}Cs	895	852	554.1
^{87}Fr	所有已知同位素均极不稳定		

图 1　碱金属原子 D_1 和 D_2 跃迁波长及能级间隔

Fig. 1　Transition wavelengths and energy level separations of alkali atoms D_1 and D_2

在某些缓冲气体的作用下,碱金属原子具有非常适合半导体泵浦的能级结构和光谱特性,如图 2 所示。碱金属蒸汽中充入 He,使 D_2 谱线碰撞加宽,提高泵浦吸收率[4];C_2H_6 用于加速两上能级间的能量交换,快速混合$^2P_{1/2}\leftrightarrow{}^2P_{3/2}$精细结构,形成准二能级,抑制自发辐射,实现有效的粒子数反转。

2　典型实验与问题分析

2.1　碱金属激光器的谱线匹配问题

2003 年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室

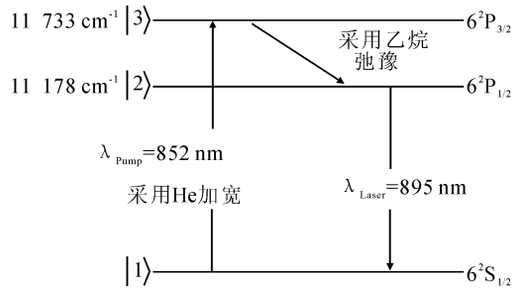


图 2　缓冲气体作用下的 Cs 能级结构

Fig. 2　Structure of Cs energy levels with buffer gas

(LLNL)的 W. F. Krupke 等人利用可调谐 Ti:sapphire 激光泵浦 Rb 蒸汽,首次实现了波长 795 nm 的 30 mW 铷激光输出[5]。此后碱金属激光器发展迅速,得到越来越多的关注,国内外多家科研机构先后参与了研究[3,6]。然而,半导体泵浦碱金属激光器所面临的最大核心问题,即在 D_2 跃迁吸收谱线线宽很窄情况下提高泵浦光吸收效率。

按照目前已见报道的 3 种不同解决思路,相应地可将碱金属激光器的研究大致分为 3 个阶段:1) 钛宝石激光器模拟半导体泵浦,追求高泵浦吸收率以验证高全光效率;2) 半导体激光器泵浦,从泵浦和吸收线宽两方面着手,追求高输出能量和系统稳定性;3) 利用增益介质方面的创新(如 XPAL)来提高吸收效率,尝试突破 DPAL 技术瓶颈。

2.1.1　钛宝石模拟半导体泵浦的碱金属激光器

2006 年美国空军军官学校 B. V. Zhdanov 等人采用相干公司的单纵模 Ti:sapphire 激光器(泵浦线宽小于 1 MHz,远窄于经 6.66×10^4 Pa 乙烷缓冲作用展宽的 10 GHz 吸收线宽),端面泵浦 Cs 蒸汽[7]。由于良好匹配了泵浦光与腔模式(图 3)并优化了激光器相关参数,实现了 99.4%的泵浦吸收率,得到了 0.36 W 的 Cs 激光输出,光-光转换效率 63%,且获得了目前实验所达到的碱金属激光器的最高斜率效率 81%。

钛宝石激光模拟半导体泵浦的前期实验,是为了排除半导体泵浦与碱金属吸收线宽不匹配的影响,验证碱金属激光器的最大理论效率。这一实验证明了碱金属蒸汽激光器在高泵浦吸收率条件下,可达到很高的全光效率和很好的光束质量。但其极低的功率无法适应碱金属激光器的应用要求,故这一阶段研究的主要意义在于为真正的 DPAL 确定更窄泵浦线宽、更稳定连续运转和更高输出能量的目标。

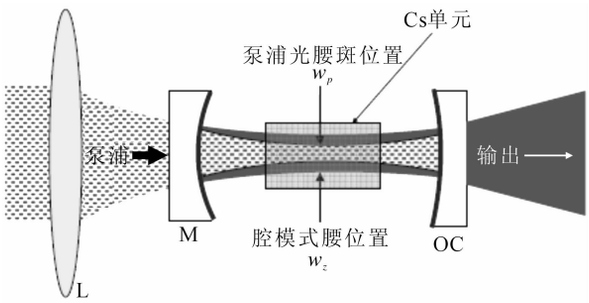


图 3　端面泵浦 Cs 激光器泵浦光与腔模式的良好匹配

Fig. 3　Optimum matching of pump beam and cavity mode of end-pumped Cs laser

2.1.2　半导体泵浦的碱金属激光器(DPAL)

2005 年 LLNL 使用多模半导体激光泵浦 Rb 蒸汽,首次实现了真正的半导体泵浦碱金属激光器,输出 Rb 激光约 1 mW[8]。尽管这是碱金属激光器领域里程碑式的进展,但实验中极低的斜率效率(小于 10%)远小于钛宝石模拟半导体泵浦时得到的 81%,其原因在于泵浦线宽远大于吸收线宽。纯净碱金属蒸汽的典型多普勒加宽吸收线宽约为 10^{-4} nm,这比商用多模 LDA 的线宽(nm 量级)小许多个数量级,故实现高功率 DPAL 主要面临 3 方面问题:1) 采用合适的泵浦结构使得泵浦能量被有效吸收,实验证明[9]侧面泵浦非稳腔结构很可能成为适应高功率 DPAL 发展的主要方式;2) 形成高速有效的 D_2 跃迁,并使粒子聚集在激光上能级,而不是消耗在荧光或热弛豫($^2P_{3/2}$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,这可以通过加入烃类小分子缓冲气体来实现[10],如乙烷);3) 集聚的反转粒子数尽可能多地用于激光谐振,以避免反转粒子数浪费(如烧孔效应)。

针对半导体泵浦源所面临的谱线匹配问题,可以采用增大缓冲气体压强以加宽碱金属蒸汽 D_2 跃迁吸收谱线,或压窄 LDA 泵浦线宽以匹配低气压下碱金属吸收线宽的方式。当碱金属蒸汽中不充入缓冲气体时,吸收谱线加宽取决于多普勒加宽 $\Delta\lambda_D$。当碱金属蒸汽中充入高压 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,光谱线宽加宽为 $\Delta\lambda_L$(压力展宽的典型值约为 0.15 MHz/Pa),如表 1 所示。

表 1　几种碱金属吸收光谱的多普勒线宽和碰撞均匀加宽线宽(T=100℃)

Table 1　Linewidth broadened by Doppler effect and collision of alkali absorption spectrum(T=100℃)

碱金属	λ_{pump}/nm	$\Delta\lambda_D$/×10^{-3} nm	P_{buffer}/×10^4 Pa	$\Delta\lambda_L$/×10^{-2} nm
K	766	1.64	4.36	1.64
Rb	780	1.16	4.20	1.16
Cs	852	1.02	2.64	1.02

比较 $\Delta\lambda_D$ 和 $\Delta\lambda_L$,由碰撞加宽的吸收光谱线宽是原有多普勒加宽的 10 倍。按照碱金属原子吸收的碰撞加宽系数估算,若缓冲气体气压 P_{buffer} 增加到 2×10^6 Pa,碱金属原子的吸收线宽可以达到约 0.5 nm[3]。要匹配 LDA 的线宽,则需使用高压缓冲气体将碱金属吸收谱线加宽到 1 nm 即 10^3 GHz 量级,相应的缓冲气体压强须达到约 2.53×10^6 Pa,而这会导致碱金属激光器出现其他有害问题(吸收截面减小、需要保持高工作温度、加剧碱金属原子与缓冲气体间的化学反应)。

采用波长敏感元件实现不同外腔方式压窄和稳频 LDA 输出谱线来匹配用小于 1.013×10^5 Pa 缓冲气体加宽的碱金属吸收谱线,以 Cs 蒸汽混合 6.33×10^4 Pa 氦气为例,如表 2 所示。一些实验已经证明 LDA 的线宽可被成功压窄到 10 GHz 即 10^{-2} nm 量级。

表 2　Cs 原子光谱数值(充入 6.33×10^4 Pa 氦气)

Table 2　Spectrum values of Cs(buffered by 6.33×10^4 Pa He)

跃迁谱线/nm	辐射寿命/ns	自然线宽/×10^{-2}GHz	多普勒线宽(FWHM,T=110℃)/×10^{-1} GHz	碰撞加宽线宽(FWHM)/×10 GHz	原子横截面/×10^{-9}cm^2	碰撞加宽谱线中心横截面/×10^{-13}cm^2
D_1(895)	34.9	2.9	4.1	1.42	1.53	4.84
D_2(852)	30.5	3.3	4.3	1.27	2.31	9.32

2007 年 USAFA 使用全息平面反射光栅[11]成功地将 LDA 线宽压窄到 11 GHz(见图 4),使之很好地与 Cs 的吸收线宽(仅用 1.013×10^5 Pa 缓冲气体加宽)相匹配。16 W 的 LDA 端面泵浦

Cs[12]得到输出功率 10 W 的连续 Cs 激光,并获得了目前已知的 DPAL 最高斜率效率为 68%和光-光转换效率为 62%。

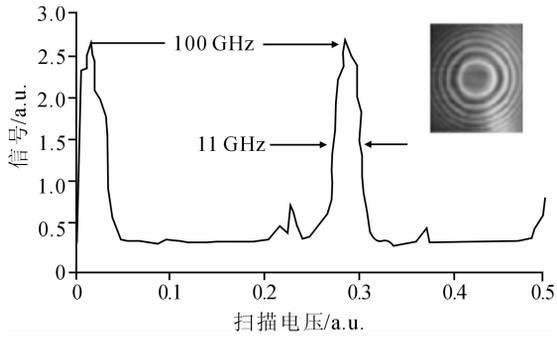


图 4　全息平面反射光栅压窄 LDA 输出光谱

Fig. 4　Output spectrum of LDA with holographic plane reflection gratings

为了进一步提高输出能量,2009 年 Zhdanov 小组又成功使用 15 个体布拉格光栅(VBG)外腔压窄稳频的窄带 LDAs(线宽约 7 GHz),侧面泵浦 Cs 蒸汽(见图 5),得到斜率效率 43%,全光效率 31%,并获得了目前 Cs 激光的最大输出功率 49 W。

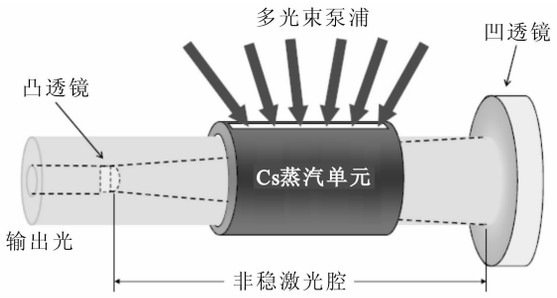


图 5　横向泵浦非稳腔 Cs 激光器结构示意图[9]

Fig. 5　The design of transversely pumped Cs laser with unstable resonator[9]

由于激光模式与增益介质中泵浦光模体积之间更好的匹配,使之比端面泵浦稳腔 Cs 激光器的效率高出 2 倍多,证明了高增益的碱金属原子采用非稳腔侧面泵浦结构的优势。然而,这个系统的斜率效率仍低于端面泵浦(Ti:sapphire 泵浦的 81%[7]和 LD 泵浦 68%[12]),这可以解释为通过窄缝到达增益介质全体积上的泵浦光不均匀。

分析以上实验结果,压窄 LDA 谱线(GHz 量级)和增加缓冲气体压强(1.013×10^5 Pa 以下)两种手段的结合使用,是解决 DPAL 谱线匹配问题最具前途的研究方向。

2.1.3　准分子宽带泵浦的碱金属激光器(XPAL)

由于上述实验中突显出的外腔压窄 LDA 泵浦源带来的诸多负面影响(体积功率比减小、能量利用效率降低、结构复杂性增大、系统成本提高),2009 年伊利诺斯大学和 CU 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泵浦碱金属激光器(XPAL)的概念[13],其基本工作原理如图 6 所示。这种结构虽然仍拟采用半导体激光器泵浦,但因其实质是准分子吸收了泵浦能量,故称之为复合受激态宽带泵浦碱金属激光器。XPAL 与 DPAL 相比最突出的优势在于复合受激态准分子具有"蓝翼"和"红翼",使得吸收光谱显著增宽,而 DPAL 只可吸收窄线宽的中心泵浦光实现受激辐射。故尽管其洛伦兹增宽线宽只有 0.03 nm,但准分子吸收带宽已可高效吸收 2 nm 左右的半导体泵浦光。

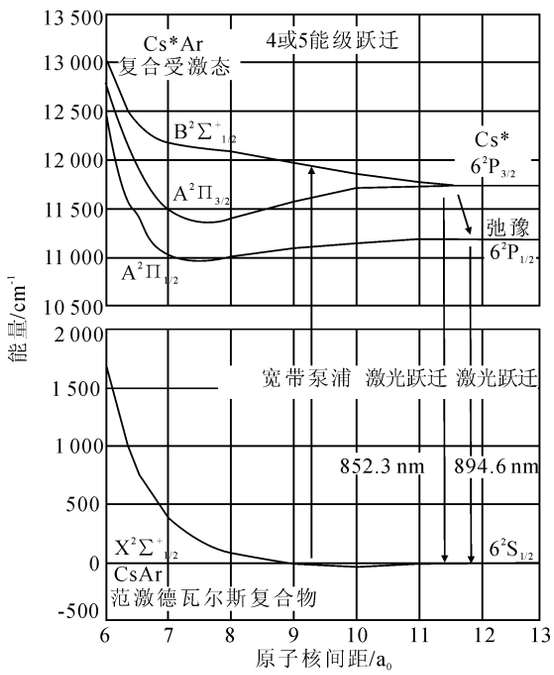


图 6　Cs-Ar 准分子能级结构及其对应状态

Fig. 6　Energy level diagram for the Cs-Ar exciplex and the corresponding states of Cs

2009 年伊利诺斯大学的 J. D. Readle 等人[14]使用染料激光器(线宽 4 ns～5 ns,即 7 GHz),在 819 nm～862 nm 范围内调谐输出 6 mJ 泵浦光,获得的 Cs 激光(充入 6.66×10^4 Pa 氩气和 $1.33\times10_4$ Pa 乙烷)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 7)。

另一 Cs-Kr 实验的结果如图 8 所示[15],×10 表示 $\lambda_p<847$ nm 部分放大了 10 倍。通过对比分析发现,光激励 Cs-Kr 碰撞对所需泵浦能量阈值比 Cs-Ar 碰撞对大约低 40%。同时,要实现原子

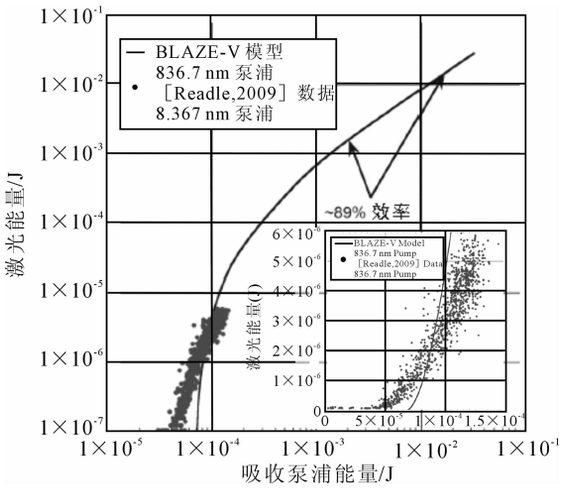


图 7　Cs-Ar **实验的斜率效率**(T=435 K,吸收泵浦能量 40 μJ)

Fig. 7　**Slope efficiency of Cs-Ar experiment** (T=435 K, 40 μJ pump energy absorbed)

碰撞对的光缔合,原子激励能级的量子效率必须大于 94%。上述 2 个实验验证了准分子条件下,835 nm～842 nm 和 850～854 nm 两个波长范围内的泵浦均获得了 852 nm 的激光输出,这为使用普通宽带半导体光源泵浦碱金属激光器提供了可能。

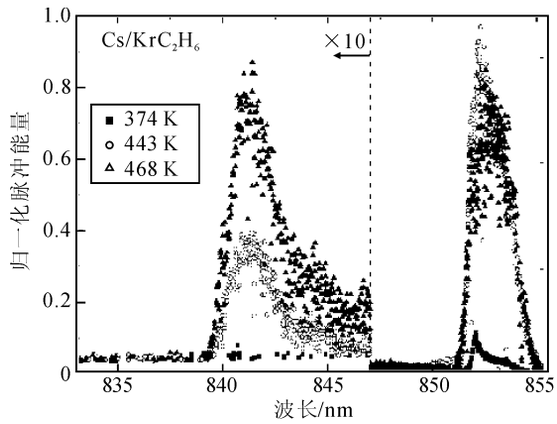


图 8　Cs-Kr **准分子激光辐射光谱**

Fig. 8　**Radiation spectrum of Cs-Kr exciplex**

总结起来,XPAL 与传统 DPAL 相比的优点主要体现在以下 4 个方面:

1) 光泵浦碱金属-稀有气体原子对,在短波长或长波长一侧均可实现跃迁,因此 XPAL 泵浦源成本较低、且对半导体线宽的要求较易实现;

2) DPAL 产生激光只能通过 D_1 原子跃迁,而 XPAL 通过选择适当的泵浦波长范围,可实现 D_2 或 D_1 原子跃迁产生激光,故可摆脱对乙烷的依赖;

3) 不需要从 $P_{3/2}$ 到 $P_{1/2}$ 的碰撞弛豫过程即可产生激光并获得更多的波长,且有可能使用量子效率更高的碱金属原子(Li 或 Na)产生激光;

4) 由于碱金属-稀有气体的特定形式,与相应的稀有气体之间存在着潜在变化的相互作用,故有很多可适应准分子受激辐射机理的吸收光谱,这为碱金属之外的广义 XPAL 提供了可能(例如 Mg-稀有气体[13]等准分子泵浦原子激光器)。

XPAL 实质上是在寻求突破 DPAL 吸收线宽瓶颈的研究背景下应运而生的,从泵浦源的角度来看仍可归为半导体泵浦的碱金属激光器。目前采用染料激光器泵浦的实验也只是为日后真正使用半导体泵浦进行模拟,而该领域研究尚处起步阶段,实验结果尚不理想。尽管具有吸收光谱范围宽、可摆脱对乙烷的依赖等优点,但 XPAL 的系统组成和化学机理与 DPAL 结构相比更为复杂、成本较高,这都是影响其发展前景的不确定因素。

2.2　DPAL **连续稳定运转的问题**

制约 DPAL 性能进一步提高的另一关键因素即随着输出能量的提高,半导体泵浦带来的热效应问题和使用乙烷实现谱线匹配引入的化学沉积问题。在 2008 年 USAFA 进行的 4 个 LDA 泵浦 Cs 激光器实验[16]中观察到:脉冲方式下斜率效率 52%,光-光转换效率 49%;连续方式下热效应影响严重(由于 Cs 量子效率为 95.3%,故 4.7%的泵浦功率以热的形式进入增益介质)。即使泵浦功率只有几十瓦,仍观察到增益介质内部温度显著上升,这与 Rb 激光器实验中观察到的、温度超过 104 ℃之后输出功率出现下降趋势[17]不谋而合。增益单元内泵浦光范围里缓冲气体的显著升温会导致热透镜效应,改变谐振腔结构,破坏稳定性,造成损耗增加,使输出功率在温度更高时下降。为减少增益介质热效应,USAFA 在 2009 年横向泵浦 Cs 激光器实验[9]中,采用脉冲方式泵浦 LDAs 和 Cs 蒸汽,脉宽 500 μs,重复频率 20 Hz(占空比 1%)。值得说明的是,由于激光开关时间小于 1 μs,用 500 μs 脉宽去泵浦 Cs 激光器,实质上类似于热效应很弱时的连续泵浦。从图 9 可明显看出 Cs 激光输出受热效应的影响,在 500 μs 的泵浦脉冲宽度里,输出激光功率降低了约 20%,而泵浦脉冲幅度并无变化。对输出脉冲功率的指数拟合得到衰减时间约 26 ms,它取决于系统设计和泵浦功率量级。同时,废热处理不力将进一步加剧乙烷与碱金属原子反应生成碳氢化合物,以及完全反应产物 $6X+C_2H_6 \rightarrow 6XH$(碱金属水合物) $+2C$(石墨)的积聚,导致化学沉积污染即"激

光雪”[18]现象,影响碱金属激光器的连续高功率运转能力。对此,USAFA 进行了不同缓冲气体的对比实验研究,观察到 Cs 或 K 原子蒸气中充入乙烷缓冲气,在高温下均出现窗镜污染,而充入氦气则未产生碳氢化合物沉积,如图 10 所示。此后,Zhdanov 等人于 2007 年成功完成了 K-He 激光系统有效运行和良好化学稳定性的实验。同年,LLNL 亦开始转入无烃类化合物碱金属激光器的研究,并以实验证实了同样机理的 Rb-He 激光器[19]。2010 年,LLNL 只使用 He 同位素开展了无碳氢化合物 DPAL 的实验[20](图 11),采用 VBG 压窄的 0.35 nm 半导体堆栈泵浦 Rb 激光,光-光转换效率仅为 2%。但实验中发现,使用 2.84×10^5 Pa 的 ^{3}He 缓冲气,经功率放大后可达到 28 W 平均功率,意味着它比传统 He 有更好的缓冲气体功能(4.05×10^5 Pa 天然 ^{4}He 时为 24 W),如图 12 所示,虽不及烃类分子(甲烷、乙烷),但 ^{3}He 相比 ^{4}He 在连续和脉冲输出方式下都具有明显优势。然而,去掉乙烷避免化学沉积的代价是极低的泵浦吸收率以致极低的全光效率。这是因为乙烷的作用在于抑制自发辐射,实现有效粒子数反转,使被 D_2 跃迁所吸收的激发到 $^2P_{3/2}$ 的粒子在自发跃迁或能量淬灭回到基态 $^2S_{1/2}$ 之前,快速弛豫到激光上能级 $^2P_{1/2}$,而目前尚无其他缓冲气能发挥有效加速两上能级间能量交换,促进精细结构混合的替代作用。

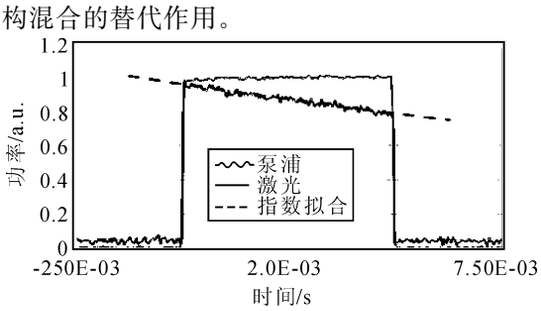
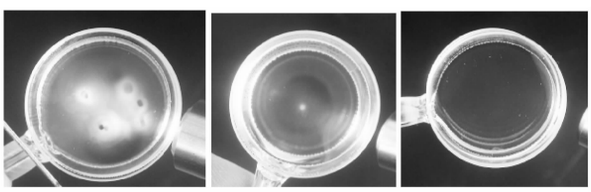


图 9　Cs 激光输出、泵浦脉冲及其指数拟合

Fig. 9　Cs laser output, pump power pulse and exponential decay of the output power



(a) Cs-乙烷，120℃　(b) K-乙烷，120℃　(c) K-He，150℃

图 10　不同缓冲气体下化学沉积情况对比,无碳氢化合物沉积

Fig. 10　Contamination in cell windows with different buffer gases

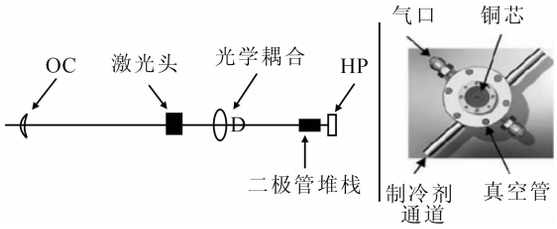


图 11　无碳氢化合物的实验结构及其激光头

Fig. 11　Experimental setup and laser head detail

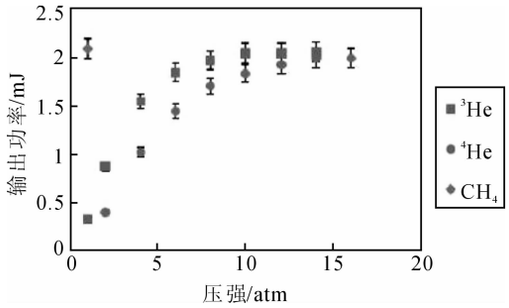


图 12　缓冲气体种类和压强与不同脉冲输出能量的关系

Fig. 12　Pulsed output energy versus types of gas and pressure

2.3　DPAL 输出功率提高的问题

对比前述碱金属激光器预期应用中的指标要求,现有实验结果尤其在高功率方面尚存很大差距,故提高 DPAL 输出能量是碱金属激光器研究面临的又一关键问题。为此,USAFA 和 LLNL 采用不同的思路进行了探索和实验。2010 年 Zhdanov 小组基于侧面泵浦非稳腔结构,开展了碱金属激光器主振荡功率放大(MOPA)实验[21],首次实现了侧面泵浦 Cs 蒸汽的功率放大,得到了最大 10 倍的放大系数,具有较高的全光效率(高于 30%),如图 13 所示。

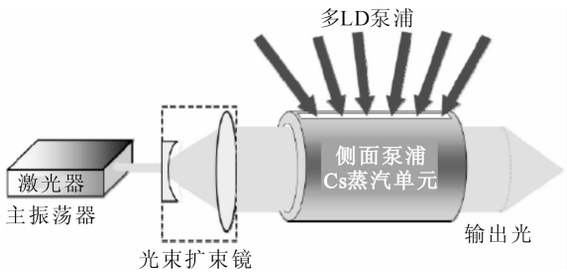


图 13　功率放大部分的基本结构

Fig. 13　Basic structure of the power amplifier

采用 2007 年报道的碱金属主控 Cs 激光器输出的 894 nm 激光[12]作为放大器的种子光,使之沿泵浦单元轴向入射。在通过被泵浦的增益介质之前,种子光扩束至直径 5 mm。放大单元由 15 个

852 nm 半导体激光器侧面泵浦,这与 2009 年报道的 49 W 激光器[9]具有相同的结构。为避免连续运转时不断恶化的热效应,该碱金属激光器主振荡功率放大系统采用准连续方式运转,所有功率数值均为峰值功率,如图 14 所示。注入种子光输出功率 5 W 时获得了最大 25 W 的激光输出,放大系数约为 5;当种子光输出功率约 0.5 W 时,得到了最大 10 倍的放大系数。

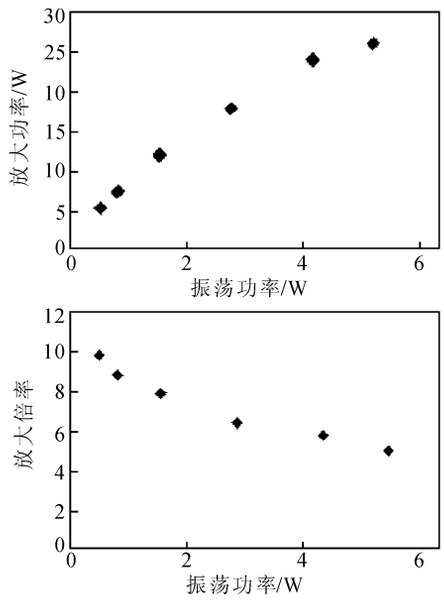


图 14　侧面泵浦放大器的输出功率和放大因子与主振荡器输入功率的函数关系

Fig. 14　Output and amplification factor of side-pumped amplifier versus input power of master oscillator

从图 14 可以看出,实验已接近饱和状态,即种子光几乎吸收了增益介质中所有可用储能。借鉴固体激光器设计原理,利用光泵浦碱金属放大器链增加负载功率,有效实现了碱金属激光器的 MOPA,还可通过增大激光模体积、匹配泵浦光与激光模式来优化腔结构,提高输出功率及全光效率。与单谐振荡器相比,MOPA 结构能简化多泵浦源的使用,同时解决过多热量进入增益介质引发的热效应问题,实验证明碱金属激光器主振荡功率放大是提高 DPAL 性能指标的一种有效方法。

与 MOPA 方式不同,LLNL 的 Krupke 小组于 2005 年首次实现 DPAL[8]时,提出了碱金属激光器定标放大以获得高功率的波导型系统概念,如图 15 所示。采用侧面泵浦非稳腔的结构,通过整形系统使 LDA 泵浦光的光斑尺寸与工作区域端面相匹配,以高效地耦合进增益区域中。这种波导型结构主要有以下几个优点:

1) 增益区域面体比较大,利于散热;温度梯度小,易获得高光束质量;

2) 具有较大发散角的半导体泵浦光可以很好地被约束在工作区内,并因曲折前进而获得更大光程,增加对泵浦光的吸收;

3) 光放大路径加长可以充分利用反转粒子数,使整个工作区成为有效的激光模体积。

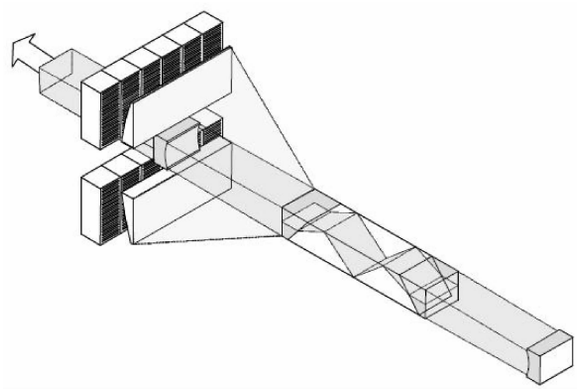


图 15　功率定标放大 DPAL 系统概念图

Fig. 15　Concept for a power-scaled DPAL laser

2008 年,在美国导弹防御机构的资助下,LLNL 基于上述结构设计实现了无碳氢化物的碱金属(Rb)激光器定标放大完整系统,得到目前最高的 100 W 峰值功率(脉宽 100 μs,增益单元长度 3 cm)。这一成果对定标放大系统的未来具有里程碑式的启示意义:

1) 作为第一个无碳氢化合物而达到这一峰值功率量级的 DPAL,它进一步证明了这是目前功率定标放大最为可行的技术路线,可真正实现连续运转流动蒸汽单元的 DPAL;

2) 这是目前唯一达到兆瓦量级,而只需可轻松放大到超高功率水平的普通半导体阵列实现的 DPAL。其他 DPAL 结构都需使用 10 GHz ~20 GHz 范围的激励源,且体积大、结构复杂、价格昂贵,不适于定标放大;

3) 首次使用了可根据泵浦不同而按比例放大的结构,这是所有定标放大系统的主要部件,并为此研制了高性能的 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的 Rb 最佳密度数值等指标。

3　研究方向展望

一项新技术的吸引力与生命力取决于其本质上的有用性,而碱金属激光器的突出优点正在于波长、效率、能量 3 大方面。光-光转换效率高、废热少,光束质量好、输出光谱线宽极窄,且波长处于大气窗口、易被半导体材料吸收,加之工作物质优廉、能源利用率高、无化学危害等,这些都保证了碱金属激光器很好的科研前景和实用性能。从 2003 年(首次实现钛宝石泵浦的碱金属激光器)到 2005 年(首次实现半导体泵浦的碱金属激光器)至今,DPAL 相关技术日新月异。侧面泵浦非稳腔结构、缓冲气体的使用,提高泵浦吸收率、追求更高能量和稳定性等方面的趋势与目标日渐明朗。

纵观以上实验并分析可以预见,半导体泵浦碱金属激光器的研究将主要围绕以下几个方面深入展开:

1) 泵浦机理和腔结构的优化,实现模式匹配以提高碱金属激光器的能量利用效率;

2) 碱金属蒸汽能级理论及缓冲气体作用机理的研究,实现无碳氢化合物稳定运转;

3) 功率定标放大相关技术的突破,实现高能量高光束质量的红外激光输出。

参考文献:

[1] 杜祥琬. 对高平均功率 DPL 的几点认识[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(增刊): 1-3.
DU Xiang-wan. Some comments on high average power DPL [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17 (S0): 1-3. (in Chinese with an English abstract)

[2] KNIZE R J, ZHDANOV B, EHRENREICH T. Alkali lasers for homeland and national security[C]. US:OSHS, 2005.

[3] 余建华, 祝强, 全鸿雁, 等. 高功率碱金属蒸汽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.
YU Jian-hua, ZHU Qiang, QUAN Hong-yan, et al.. High power alkali vapor laser used in geo-synchronous satellite launching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(11): 18-23. (in Chinese with an English abstract)

[4] 朱琦, 潘佰良, 陈立, 等. 光泵铯蒸气激光的动力学模型[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1797-1801.
ZHU Qi, PAN Bai-liang, CHEN Li, et al.. A kinetic model for optically pumped cesium vapor laser [J]. Acta. Phys. Sin., 2010, 59(3): 1797-1801. (in Chinese with an English abstract)

[5] KRUPKE W F, BEACH R J.. Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.

[6] ZHU Qi, PAN Bai-liang, CHEN Li, et al.. Analysis of temperature distributions in diode-pumped alkali vapor lasers[J]. Opt. Commun., 2010, 283: 2406-2410.

[7] ZHDANOV B V, EHRENREICH T, KNIZE R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser [J]. Opt. Commun., 2006, 260: 696-698.

[8] PAGE R H, BEACH R J, KANZ V K, et al. First demonstration of a diode-pumped gas (alkali vapor) laser[C]. US: CLEO, 2005.

[9] ZHDANOV B V, SHAFFER M K, KNIZE R J. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. Opt. Express, 2009, 17 (17): 14767-14770.

[10] 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):051405-1-9.
YANG Zi-ning, WANG Hong-yan, LU Qi-sheng, et al.. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 051405-1-9. (in Chinese with an English abstract)

[11] ZHDANOV B V, EHRENREICH T, KNIZE R J. Narrowband external cavity laser diode array[J]. Electron. Lett., 2007, 43(4):221-222.

[12] ZHDANOV B, KNIZE R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser [J]. Opt. Lett., 2007, 32(15): 2167-2169.

[13] READLE J D, WAGNER C J. Lasing in alkali atoms pumped by the dissociation of alkali-rare gas exciplexes (excimers) [J]. SPIE, 2009, 7196: 71960D1-8.

[14] PALLA A D, CARROLL D L, READLE J D, et al. Multi-dimensional modeling of the XPAL system [J]. SPIE, 2010,7581: 75810L1-12.

[15] READLE J D, VERDEYEN JT, EDEN J G., et al. Cs 894.3 nm laser pumped by photoassociation of Cs-Kr pairs: excitation of the Cs D2 blue and red satellites [J]. Opt. Lett., 2009, 34 (23): 3638-3640.

[16] ZHDANOV B V, SELL J, KNIZE R J. Multiple

laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. Electron. Lett., 2008, 44(9):582-584.

[17] ZHDANOV B V, STOOKE A, BOYADJIAN G, et al.. Laser diode array pumped continuous wave Rubidium vapor laser[J]. Opt. Express,2008, 16(2): 748-751.

[18] ZHDANOV B V, KNIZE R J. Hydrocarbon-free potassium laser[J]. Electron. Lett., 2007, 43(19): 2423-2425.

[19] SHELDON S Q W, SOULES T F, PAGE R H, et al. Hydrocarbon-free resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Opt. Lett., 2007, 32(16): 2423-2425.

[20] ZWEIBACK J, KRUPKE W F. 28W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser [J]. Opt. Express., 2010, 18(2): 1444-1449.

[21] ZHDANOV B V, SHAFFER M K, KNIZE R J. Scaling of diode pumped Cs laser: transverse pump, unstable cavity, MOPA[J]. SPIE, 2010, 7581: 75810F1-6.

(上接第 581 页)

REN Gang, CAI Bang-wei, ZHONG Ming, et al. Theoretical design of 3 μm ~4 μm KTA optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal Lasers, 2006, 30(sup):222-225. (in Chinese with an English abstract)

[8] 王滨,李彤,吕百达 等. 中红外砷酸钛氧钾光参量振荡器的实验研究[J]. 激光技术,2007,31(3)225-227. WANG Bin, LI Tong, LÜ Bai-dA, et al.. Experimental study of a kalium titanyl arsenate optical parametric oscillator in the mid-infrared band[J]. Laser Technology,2007,31(3)225-227. (in Chinese with an English abstract)