

缓冲气体对碱金属蒸汽激光器工作特性的影响

徐 艳^{1,2}, 陈 飞¹, 谢冀江¹, 李殿军¹, 杨贵龙¹, 高 飞^{1,2}, 郭 劲¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于端面泵浦碱金属蒸汽激光器的速率方程模型, 研究了碱金属蒸汽激光器在不同缓冲气体环境中的工作特性。通过优化输出镜反射率、气体压强等参量, 获得了激光器在不同缓冲气体中的输出功率随温度的变化曲线。结果表明: 有烃 DPAL 中, 最佳输出功率和运行温度随能级混合速率的增大而分别增大和减小, 而且激光器在不同烃类气体下的最佳工作状态可用准二能级工作曲线描述; 无烃 DPAL 中, 氦气同位素 ^3He 可以大幅减小激光器的氦气压强, 而且能够提高 Rb-DPAL 的输出功率, 但是 K-DPAL 在 ^3He 中的输出功率略低。模拟结果与已报道的实验现象有较好的符合, 可为实验研究提供理论指导。

关键词: 碱金属蒸汽激光器; 缓冲气体; 碰撞展宽; 能级混合

中图分类号: TN2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0455-06

Influence of buffer gas on performance of alkali vapor laser

Xu Yan^{1,2}, Chen Fei¹, Xie Jijiang¹, Li Dianjun¹, Yang Guilong¹, Gao Fei^{1,2}, Guo Jin¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the rate equation model of end pumped alkali vapor laser, the characteristics of alkali vapor laser in different buffer gas environments were studied. The temperature vs output power of alkali vapor laser in different gas environments were obtained by optimizing the parameters of output coupler reflectivity and gas pressure. Results show that the optimal output power and operating temperature are improved and decreased with the increase of mixing rate in hydrocarbon DPAL respectively. And the optimal operation states of hydrocarbon DPAL can be described by its quasi two level operation curve. Moreover, the helium pressure in hydrocarbon free DPAL can be reduced largely by using ^3He gas. Besides by using ^3He gas, the output power can be improved for hydrocarbon free Rb-DPAL but not for hydrocarbon free K-DPAL. The simulated results have a good matching with reported experimental results, which will supply significant reference for further experimental research.

Key words: alkali vapor laser; buffer gas; collisional broadening; energy level mixing

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61308050); 激光与物质相互作用国家重点实验室自主研究课题(SKLLIM1210-01)

作者简介: 徐艳(1990-), 女, 硕士生, 主要从事新型激光器技术方面的研究。Email: 18792410097@163.com

导师简介: 谢冀江(1959-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光器及激光应用技术方面的研究。Email: laserxjj@163.com

0 引言

半导体激光泵浦的碱金属蒸汽激光器(DPAL)是一种近红外输出(Cs894.6nm,Rb795.0nm,K770.1nm)的三能级激光器,采用碱金属蒸汽作为激光增益介质,具有量子效率高、光束质量好、气体介质折射率扰动小和易于热管理等优点^[1]。作为一种潜在的高功率激光器,DPAL 能克服半导体激光泵浦的固体激光器(DPSSL)高功率运转时面临的严重热效应,以及化学气体激光器(DF 激光器或氧碘激光器)长时间运转时面临的气体供应和有害尾气的环境污染等问题。DPAL 的这些优点使其有望在很多领域获得广泛的应用,如激光加工、定向能传输及光电对抗等军事领域,且结合倍频技术可获得蓝紫激光输出,可用于激光显示、激光水下通讯和探测等领域。

DPAL 的增益介质中除了碱金属原子蒸汽外,还有其它缓冲气体。缓冲气体对 DPAL 的高效运转有着至关重要的作用:一是对碱金属原子的吸收谱进行碰撞展宽,使得碱金属蒸汽能够吸收更宽光谱范围的泵浦光能量;二是加快碱金属原子精细结构能级的混合速率,从而能够有效建立粒子数反转。DPAL 的缓冲气体主要包括惰性气体(氦气等)和烃类气体(甲烷、乙烷等)两类。在 2005 年首次运转的 Cs-DPAL 中^[2],采用乙烷同时作为碰撞展宽气体和能级混合气体,其压强仅 13.3 kPa,这是由于其半导体泵浦源的输出线宽也仅 1 MHz,13.3 kPa 的乙烷既能提供足够宽的原子吸收光谱也能提供足够快的精细结构能级混合速率。但是对于多数商用半导体激光器,其自由运转的输出线宽宽至几百吉赫兹,压窄后的线宽也仅窄至几十吉赫兹,因而需要更高压强的缓冲气体将碱金属原子的吸收谱充分展宽。过量的烃类气体会增加碱金属原子与其发生反应的可能,因而需加入不会与碱金属原子发生反应的惰性气体氦气作为碰撞展宽气体^[3-5],这也是目前大部分 DPAL 所采用的缓冲气体环境。2012 年实现的千瓦输出的 Cs-DPAL 中,使用了 4 个大气压的氦气和 1 个大气压的甲烷作为缓冲气体^[5]。此外,为了彻底避免碱金属原子与烃类气体分子的化学反应,在 Rb-DPAL 和 K-DPAL 中仅使用氦气作为缓冲气体,即无烃 DPAL^[6-7]。

文中旨在对半导体激光端面泵浦碱金属激光器进行运行参数的优化设计,分析缓冲气体对激光器工作特性的影响。基于端面泵浦的碱金属激光器速率方程模型,分别以 Cs、Rb、K 蒸汽作为激光介质,模拟了这三种激光介质在不同的缓冲气体环境下的工作特性,为实验研究提供理论指导。

1 理论模型

如图 1 所示,碱金属蒸汽激光跃迁属三能级激光系统,分别为基态能级 $^2S_{1/2}$,精细结构能级 $^2P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 。泵浦跃迁和激光跃迁分别由碱金属原子的 D2 线跃迁和 D1 线跃迁实现,激发态上的粒子通过自旋-轨道弛豫在精细结构能级之间转移。缓冲气体分子与碱金属原子的频繁碰撞可以加快自旋-轨道弛豫过程,同时也对碱金属原子的吸收光谱进行展宽。碱金属蒸汽激光器的其他动力学过程还包括自发辐射和电子态淬灭。由于碱金属原子的自发辐射寿命很短,其自发辐射过程很快,而电子态淬灭的过程则相对慢很多,因而在模拟中不考虑电子态淬灭对激发态粒子的消耗。

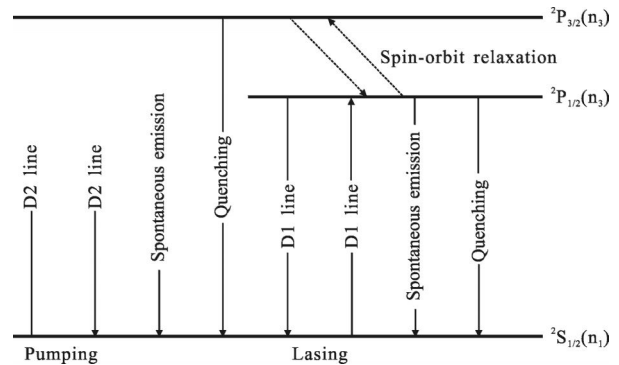


图 1 碱金属蒸汽激光器能级结构图

Fig.1 Energy level structure of DPAL

假设碱金属原子在介质池内均匀分布,DPAL 的动力学速率方程为:

$$\frac{dn_1}{dt} = -\left(n_1 - \frac{1}{2}n_3\right)\sigma_{D2}\frac{I_{p-cav}}{h\nu_{D2}} + (n_2 - n_1)\sigma_{D1}\frac{I_{l-cav}}{h\nu_{D1}} + n_3A_{31} + n_2A_{21} \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -(n_2 - n_1)\sigma_{D1}\frac{I_{l-cav}}{h\nu_{D1}} + \gamma_{32}\left[n_3 - 2n_2\exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right]\right] - n_2A_{21} \quad (2)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = \left(n_1 - \frac{1}{2}n_3\right)\sigma_{D2}\frac{I_{p-cav}}{h\nu_{D2}} - \gamma_{32}\left[n_3 - 2n_2\exp\left[-\frac{\Delta E}{k_B T}\right]\right] - n_3A_{31} \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = \sigma_{D1}(n_2 - n_1)cN\frac{1}{L} - \frac{N}{\tau_R} \quad (4)$$

$$n_1+n_2+n_3=n_0 \quad (5)$$

式中: n_0 为碱金属原子的总粒子数密度,主要与碱金属原子所处的环境温度有关; n_1 、 n_2 和 n_3 分别为基态能级 $^2S_{1/2}$ 、激光上能级 $^2P_{1/2}$ 和泵浦能级 $^2P_{3/2}$ 上的粒子数密度; N 为增益介质内的激光光子数密度; ΔE 为精细结构能级 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 间的能级差; T 为激光器的运行温度; h 为普朗克常数; k_B 为玻耳兹曼常数; c 为真空光速; ν_{D1} 和 ν_{D2} 分别为碱金属原子D1线和D2线的中心跃迁频率; A_{21} 和 A_{31} 分别为能级 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 上的粒子的自发辐射速率; l 为介质池的长度; L 为谐振腔长; τ_R 为腔内的激光光子寿命, $\tau_R=L/(\delta c)$; δ 为平均单程损耗因子, $\delta=-\ln(r_{oc}t^4)/2$,其中 r_{oc} 为输出镜反射率, t 为激光在腔内的传输率; I_{p-cav} 和 I_{L-cav} 分别为增益介质内的平均泵浦光强和激光光强; σ_{D2} 和 σ_{D1} 分别为碱金属原子的中心吸收截面和发射截面,其值的大小与碱金属原子的D2线和D1线的线宽有关。

$$\sigma_{D2}=\frac{A_{31}\lambda_{D2}^2}{2\pi^2\Delta\nu_{D2}} \quad (6)$$

$$\sigma_{D1}=\frac{A_{21}\lambda_{D1}^2}{4\pi^2\Delta\nu_{D1}} \quad (7)$$

式中: $\Delta\nu_{Di}(i=1,2)$ 为经碰撞展宽后的碱金属原子D1线或D2线的线宽; λ_{D1} 和 λ_{D2} 分别为碱金属原子D1线和D2线的中心跃迁波长。碱金属原子的D1和D2线宽与碰撞展宽气体的种类和压强有直接关系。

$$\Delta\nu_{Di}=\Gamma_{Di}P_B \quad (8)$$

式中: $\Gamma_{Di}(i=1,2)$ 为碰撞展宽气体对碱金属原子D1线或D2线的碰撞展宽系数; P_B 为碰撞展宽气体的压强。公式(2)中的 γ_{32} 为精细结构能级混合速率,其值越大越容易建立粒子数反转。

$$\gamma_{32}=\rho\sigma_{mix}\nu_r \quad (9)$$

式中: ρ 为能级混合气体分子的密度,与能级混合气体的分压强 P_M 有关; σ_{mix} 为能级混合气体分子作用于碱金属原子的混合截面; ν_r 为缓冲气体分子与碱金属原子之间的相对热运动速率。混合速率的大小也与能级混合气体的种类和压强直接相关。在稳态连续输出情况下,公式(1)~(4)均等于零,此时的输出激光光强为:

$$I_{out}=\frac{(1-r_{oc})t\delta}{(1+\sqrt{r_{oc}})(1-t^2\sqrt{r_{oc}})}I_{L-cav} \quad (10)$$

激光输出功率表示为:

$$P_{out}=I_{out}S_{beam} \quad (11)$$

式中: S_{beam} 为输出激光光斑的截面积。根据以上动力学模型,采用高斯厄米数值积分法和牛顿迭代法在MATLAB中可编程求得在不同缓冲气体环境下DPAL的输出功率等参数的数值解。

2 模拟结果和分析

2.1 模拟条件

DPAL主要有有烃和无烃两种缓冲气体环境,在前者中的DPAL称为有烃DPAL,Cs、Rb和K蒸汽均可以作为有烃DPAL的增益介质;在后者中的DPAL称为无烃DPAL,由于Cs-He的能级混合截面很小,只有Rb和K蒸汽可以作为无烃DPAL的增益介质。文中模拟了Cs-DPAL和Rb-DPAL在有烃缓冲气体中的工作特性,有烃缓冲气体的组成为氦气和烃类气体,以及Rb-DPAL和K-DPAL在无烃缓冲气体中的工作特性。模拟中,介质池长 l 为50 mm,泵浦光输出线宽 $\Delta\nu_p$ 为15 GHz,泵浦功率 P_{in} 为20 W,激光在腔内的传输率 t 为96.5%,输出激光光斑半径 ω_L 为200 μm ,模式匹配度 $\eta_{mode}=(\omega_L/\omega_p)^2=1$ 。

2.2 有烃 DPAL

氦气或烃类气体都能对Cs或Rb原子的吸收谱起到碰撞加宽的作用。对于Cs和Rb蒸汽介质,起加速精细结构能级混合速率作用的缓冲气体主要是烃类气体,氦气也能起到加速精细结构能级混合速率的作用,但由于Cs-He和Rb-He的能级混合截面比Cs- C_nH_{2n+2} 和Rb- C_nH_{2n+2} 的能级混合截面分别小五个数量级和两个数量级,因而在有烃Cs-DPAL和Rb-DPAL中,氦气的能级加速作用忽略不计。缓冲气体对Cs和Rb原子的作用参数如表1所示。

如图2所示,为泵浦功率20 W时,Cs-DPAL和Rb-DPAL分别在各混合缓冲气体环境中的输出功率随运行温度的变化情况。其中,氦气压强为80 kPa,烃类气体压强为21.3 kPa。模拟中,输出镜反射率 r_{oc} 为优化参量,从而获得各运行温度下的最大输出功率。从图2中可知,在各缓冲气体环境中,激光器的输出功率随温度的升高而先增大后减小。此外,以Cs-DPAL为例,在 $^4\text{He-CH}_4$ 、 $^4\text{He-C}_2\text{H}_6$ 、 $^4\text{He-C}_3\text{H}_8$ 缓冲气体环境中,使激光器输出功率最大的最佳工作温度依次减小,对应的最佳输出功率逐渐增大。表2列出了Cs-DPAL和Rb-DPAL在各缓冲气体环境

表 1 有烃 DPAL 中缓冲气体分子对 Cs 和 Rb 原子的作用参数

Tab.1 Interaction parameters between buffer gas molecules and alkali atoms (Cs and Rb) in hydrocarbon DPAL

Buffer Gas	Cs-DPAL		Rb-DPAL	
	Parameter	Reference	Parameter	Reference
⁴ He	$\Gamma_{D1}=21.5$ GHz/amg @21 °C; $\Gamma_{D2}=19.3$ GHz/amg @21 °C	Ref. [8]	$\Gamma_{D1}=18.0$ GHz/amg @ 80 °C $\Gamma_{D2}=18.1$ GHz/amg @ 80 °C	Ref. [12]
	$\sigma_{\text{mix}}=3.90 \times 10^{-20}$ cm ²	Ref. [9]	$\sigma_{\text{mix}}=1.03 \times 10^{-17}$ cm ²	Ref. [13]
CH ₄	$\sigma_{\text{mix}}=2.14 \times 10^{-15}$ cm ²	Ref. [10]	$\sigma_{\text{mix}}=4.2 \times 10^{-15}$ cm ²	Ref. [14]
C ₂ H ₆	$\sigma_{\text{mix}}=5.20 \times 10^{-15}$ cm ²	Ref. [11]	$\sigma_{\text{mix}}=7.70 \times 10^{-15}$ cm ²	Ref. [14]
C ₃ H ₈	$\sigma_{\text{mix}}=7.40 \times 10^{-15}$ cm ²	Ref. [11]	-	-

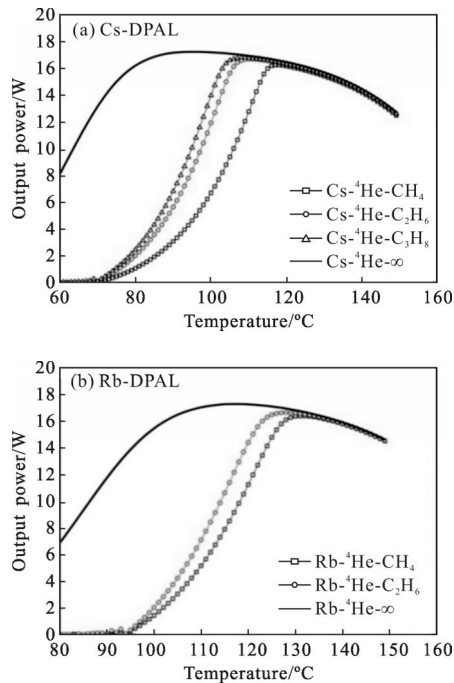


图 2 不同缓冲气体环境下的激光输出功率随温度的变化
Fig.2 Dependence of output power on temperature in different buffer gas environments

表 2 Cs-DPAL 和 Rb-DPAL 的最佳运行参数

Tab.2 Optimal operation parameters of Cs-DPAL and Rb-DPAL

Gain medium	$T/^\circ\text{C}$	$\gamma_{32}/10^9 \text{ s}^{-1}$	$\Delta/10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$	P_{out}/W
Cs- ⁴ He-C ₃ H ₈	109	2.09	1.2849	16.8
Cs- ⁴ He-C ₂ H ₆	110	1.71	1.2779	16.7
Cs- ⁴ He-CH ₄	118	0.93	1.2570	16.2
Rb- ⁴ He-C ₂ H ₆	128	2.72	1.1415	16.6
Rb- ⁴ He-CH ₄	131	1.91	1.1290	16.4

中的最佳运行参数,其中 Δ 是激光器运转过程中的粒子循环速率密度,表征单位时间内在三个能级间循环转移的碱金属原子数密度。

$$\Delta = \gamma_{32} \left[n_3 - 2n_2 \exp \left[-\frac{\Delta E}{k_B T} \right] \right] \quad (12)$$

能级混合速率是影响循环速率密度的主要因素,循环速率密度越大,激光器的输出功率越高。由表 1 可知,CH₄、C₂H₆、C₃H₈ 分子作用于碱金属原子的能级混合截面逐渐增大,因而在相同压强下,工作在 ⁴He-CH₄、⁴He-C₂H₆、⁴He-C₃H₈ 缓冲气体中的激光器的能级混合速率也逐渐增大,相应的输出功率也逐渐增大。对于同一种能级混合气体,其压强越大,激光器的能级混合速率越大,输出功率也越高。

此外,当激光器运行到大于最佳工作温度后,各缓冲气体环境中的输出功率随温度的变化曲线基本一致。图 2 中,实线表示在 80 kPa 氦气压强和无限大的能级混合速率下,激光器的输出功率变化情况,即准二能级工作曲线。在无限大的能级混合速率下,激光器的输出功率能够随泵浦功率的增大而一直以恒定的斜效率增大。由图 2 可见,随着能级混合速率的增大,输出功率-温度变化曲线不断逼近准二能级工作曲线,因而准二能级工作曲线代表了 DPAL 的一系列最佳工作状态。准二能级工作曲线上对应最大输出功率的点代表激光器的最佳工作状态,此时的输出功率为最佳输出功率,温度为最佳温度。图 2 中 Cs-DPAL 的最佳输出功率和最佳温度分别为 17.25 W 和 95 °C, Rb-DPAL 的为 17.26 W 和 117 °C。最佳输出功率和最佳温度的大小与氦气压强有关,图 3 所示为 Cs-DPAL 中最佳温度和最佳输出功率随氦气

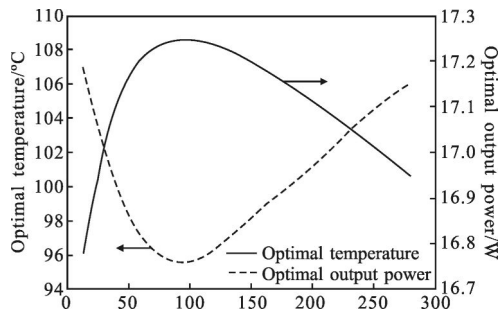


图 3 最佳温度和最佳输出功率随氦气压强的变化

Fig.3 Dependence of optimal temperature and optimal output power of Cs-DAPL on helium pressure

压强的变化。由图 3 可知,最佳温度随氦气压强的增大先降低后升高,而最佳输出功率则相反。

2.3 无烃 DPAL

无烃 DPAL 彻底避免了碱金属与乙烷的化学反应,Rb 和 K 蒸汽的碰撞展宽和能级加速同时由氦气实现。氦气有两种同位素原子 ^3He 和 ^4He ,表 3 列出了这两种同位素分别对 Rb 和 K 原子的展宽系数和能级混合截面。由于氦气压强对无烃 DPAL 的工作特性有着极其重要的影响,模拟中同时将输出镜反射率和氦气压强作为优化参量,从而获得不同温度

表 3 无烃 DPAL 中氦气分子对 Rb 和 K 原子的作用参数

Tab.3 Interaction parameters between helium molecules and alkali atoms (Rb and K) in hydrocarbon free DPAL

Buffer Gas	Rb-DPAL		K-DPAL	
	Parameter	Reference	Parameter	Reference
^4He	$\Gamma_{D1}=18.0 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$	Ref. [12]	$\Gamma_{D1}=14.1 \text{ GHz/amg @ } 197 \text{ }^\circ\text{C}$	Ref. [16]
	$\Gamma_{D2}=18.1 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$		$\Gamma_{D2}=19.9 \text{ GHz/amg @ } 197 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\sigma_{\text{mix}}=1.03 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	Ref. [13]	$\sigma_{\text{mix}}=1.78 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$	Ref. [17]
^3He	$\Gamma_{D1}=18.7 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$	Ref. [12]	$\Gamma_{D1}=14.3 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$	Ref. [18]
	$\Gamma_{D2}=20.8 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$		$\Gamma_{D2}=19.6 \text{ GHz/amg @ } 80 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$\sigma_{\text{mix}}=1.54 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	Ref. [15]	$\sigma_{\text{mix}}=2.67 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$	Ref. [15]

下的最大输出功率。

图 4 为无烃 Rb-DPAL 和 K-DPAL 的最佳输出功率随温度的变化情况,表 4 为无烃 DPAL 的最佳工作参数。结果表明:与有烃 Rb-DPAL 相比,无烃 Rb-DPAL 的最佳工作温度有小幅升高,最佳输出功率明显降低。例如,有烃 Rb-DPAL 的最佳工作温度在 130°C 左右,而无烃 Rb-DPAL 的在 160°C 左右。此

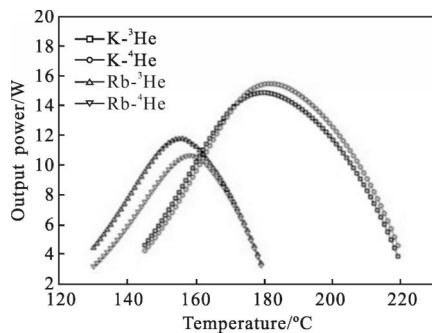


图 4 无烃 Rb-DPAL 和 K-DPAL 中输出功率随温度的变化

Fig.4 Dependence of output power of hydrocarbon Rb DPAL and K DPAL on temperature

表 4 无烃 Rb-DPAL 和 K-DPAL 的最佳运行参数

Tab.4 Optimal operation parameters of hydrocarbon free Rb-DPAL and K-DPAL

Gain medium	$T/^\circ\text{C}$	P_{He}/kPa	$R_{\text{oc}}/\%$	P_{out}/W
Rb- ^4He	158	111.4	25	10.6
Rb- ^3He	156	709	15	11.8
K- ^4He	181	91.2	10	15.5
K- ^3He	180	70.9	5	14.9

外,与有烃 Rb-DPAL 相比,无烃 Rb-DPAL 所需的氦气压强也大幅升高,但使用 ^3He 作为缓冲气体可以有效减小氦气压强,而且也能提高无烃 Rb-DPAL 的输出功率。因为在无烃 Rb-DPAL 中,氦气的压强首先要使激光器的能级混合速率达到理想值,同位素 ^3He 提供的能级混合截面大于 ^4He ,因而达到相同能级混合速率所需的氦气压强则减少,而且 Rb 原子的激光吸收和发射截面也略有增大,使得激光器的输出功率增大。对于无烃 K-DPAL, ^4He 缓冲气体的输出功率则略高于 ^3He 缓冲气体,但是最佳状态时

的 ^3He 压强则略小于 ^4He 压强。

3 结 论

文中基于端面泵浦 DPAL 的速率方程模型,模拟了 Cs-DPAL、Rb-DPAL 和 K-DPAL 的激光输出功率随温度的变化特性,优化获得了这三种 DPAL 在不同的缓冲气体环境下的最佳工作状态。

对于有烃 DPAL,碰撞展宽气体主要为氦气,能级混合气体主要为烃类气体。结果表明,能级混合速率越快,激光器的最佳工作温度越低,最佳输出功率越大,该能级混合速率与烃类气体的种类和压强有关。此外,激光器在不同烃类气体下的最佳工作状态可用其准二能级工作曲线描述。准二能级工作曲线即激光器在能级混合速率无限大时的输出功率随温度的变化曲线。模拟结果发现,在准二能级工作曲线上最佳温度后的每一点都表示激光器在特定能级混合速率下的最佳工作状态。

对于无烃 DPAL,氦气同时作为碰撞展宽气体和能级混合气体。结果表明:与有烃 Rb-DPAL 相比,无烃 Rb-DPAL 的最佳工作温度和最佳缓冲气体气压需要升高,最高输出功率稍有降低。此外,无烃 Rb-DPAL 在 ^3He 中的工作特性优于其在 ^4He 中的工作特性,所需的氦气压强减少 36% 以上,输出功率也略有提高;而对于无烃 K-DPAL,其在 ^3He 中的输出功率略低于在 ^4He 中的输出功率,但其在 ^3He 中工作所需的氦气压强也减少近 22%。氦气压强的减小对无烃 DPAL 的稳定运转有着至关重要的意义。

参考文献:

- [1] Gao Fei, Chen Fei, Xie Ji jiang, et al. Analysis on performance of diode-pumped Cs vapor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2386–2391. (in Chinese)
- [2] Ehrenreich T, Zhdanov B, Takekoshi T, et al. Diode pumped caesium laser[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(7): 415–416.
- [3] Page R H, Beach R J, Kanz V K. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser [J]. *Opt Lett*, 2006, 31 (3): 353–355.
- [4] 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.
- [5] 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 Electron*, 2012, 42 (2): 95–98.
- [6] Zweiback J, Krupke W F. 28 W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser [J]. *Opt Exp*, 2010, 18(2): 1444–1449.
- [7] Zweiback J, Hager G, Krupke W F. High efficiency hydrocarbon-free resonance transition potassium laser[J]. *Opt Commun*, 2009, 282: 1871–1873.
- [8] Andalkar A, Warrington R B. High-resolution measurement of the pressure broadening and shift of the Cs D1 and D2 lines by N_2 and He buffer gases [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65: 032708.
- [9] Krause L. Collisional excitation transfer between the $^2\text{P}_{1/2}$ and $2\text{P}_{3/2}$ levels in alkali atoms [J]. *Appl Opt*, 1966, 5 (9): 1375–1382.
- [10] Pitz G A. Transfer between the cesium $6^2\text{P}_{1/2}$ and $6^2\text{P}_{3/2}$ levels induced by collisions with H_2 , HD, D_2 , CH_4 , C_2H_6 , CF_4 , and C_2F_6 [J]. *Phys Rev A*, 2011, 84: 032708.
- [11] Walentynowicz E, Phaneuf R A, Krause L. Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules. X. Temperature dependence of cross sections for $^2\text{P}_{3/2}$ – $^2\text{P}_{1/2}$ mixing in cesium, induced in collisions with deuterated hydrogens, ethanes, and propanes [J]. *Can J Phys*, 1974, 52: 589–591.
- [12] Romalis M V, Miron E, Gates G D. Pressure broadening of Rb D1 and D2 lines by ^3He , ^4He , N_2 , and Xe: Line cores and near wings [J]. *Phys Rev A*, 1997, 56(6): 4569–4578.
- [13] Pitre B, Rae A G A, Krause L. Sensitized fluorescence in vapors of alkali metals. VI. Energy transfer in collisions between rubidium and inert gas atoms [J]. *Can J Phys*, 1966, 44: 731–737.
- [14] Hryciyshyn E S, Krause L. Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules. VII. Sensitized fluorescence and quenching in mixtures of rubidium with H_2 , HD, D_2 , N_2 , CH_4 , CD_4 , C_2H_4 , and C_2H_6 [J]. *Can J Phys*, 1970, 48: 2761–2768.
- [15] Wu S S Q, Soules T F, Page R H, et al. Resonance transition 795-nm rubidium laser using ^3He buffer gas [J]. *Opt Commun*, 2008, 281: 1222–1225.
- [16] Kantor P Y, Penkin N P, Shabanov L N. Broadening of the KI 769.9 and 766.5 nm lines by inert gases [J]. *Opt Spectrosc*, 1985, 59: 151–155.
- [17] Ciury J, Krause L. $4^2\text{P}_{1/2}$ – $4^2\text{P}_{3/2}$ mixing in potassium induced in collisions with noble gas atoms [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1982, 28: 457–461.
- [18] Kluttz K A, Averett T D. Pressure broadening and frequency shift of the D1 and D2 lines of Rb and K in the presence of ^3He and N_2 [J]. *Phys Rev A*, 2013, 87: 032516.