

准分子宽带抽运碱金属激光器输出特性分析

孙 伟^{1,2} 赵晓红^{1,2} 王世红² 刘万发¹ 谭彦楠¹

¹中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023

²北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘要 为了研究准分子宽带抽运碱金属激光器(XPAL)的输出特性,建立了增益介质为 Cs—Ar 混合气体的五能级 XPAL 的含时速率方程。使用三角脉冲型抽运,通过模拟计算得出了输出激光能量随输入脉冲抽运能量变化、温度变化、弛豫气体分子浓度变化的曲线图,模型得到的斜率效率和实验数据符合较好。结果表明,其他条件不变的情况下,温度越高,XPAL 的阈值和斜率效率越高;弛豫气体分子浓度足够大的时候, D_2 线激光会消失;XPAL 在 $T=515\text{K}$ 附近时效率最高。

关键词 激光器;准分子宽带抽运碱金属激光器;抽运阈值;斜率效率;速率方程模型

中图分类号 O432.1+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201542.s102013

Characteristic Analysis of Excimer Pumped Alkali Laser Output

Sun Wei^{1,2} Zhao Xiaohong^{1,2} Wang Shihong² Liu Wanfa¹ Tan Yannan¹

¹Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian Liaoning 116023, China

²Science School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract In order to study the output characteristic of the excimer broadband pumped alkali laser (XPAL), the time-dependent rate equation is established for the five-level XPAL, which takes Cs-Ar mixed gas as the gain medium. Using triangle pulse pump, the output laser energy curves are obtained by simulation when pump pulse energy, temperature, and concentration of relaxation gas change, and the slope efficiency obtained from the model agrees well with the experimental data. The results show that, the higher the temperature is, the higher the threshold and slope efficiency of the XPAL are, when the other conditions are fixed; D_2 line laser disappears when the concentration of relaxation gas is large enough; and XPAL has the highest efficiency when the temperature is around 515K.

Key words lasers; excimer pumped alkali laser; pump threshold; slope efficiency; the rate equation model

OCIS codes 140.1340; 140.3460; 140.3480; 140.3430

1 引 言

2003 年 Krupke 等^[1]提出半导体激光抽运碱金属蒸汽激光器(DPAL)理论并使用掺钛蓝宝石激光作为抽运源获得了铷激光输出,2005 年 Page 等^[2]实现了真正的半导体激光(LD)抽运铷激光输出,输出的 Rb 激光约 1 mW,其斜率效率小于 10%,远小于钛宝石模拟半导体抽运时的 81%,其原因在于碱金属 D_2 线极窄的吸收线宽(常温下约为 0.001 nm)。为了实现高功率 DPAL,人们在理论和实验上进行了深入研究^[3,4],最近 Bogachev 等^[5]报导了光光转换效率约为 48%的 1 KW 连续输出激光器,为目前输出功率最高的 DPAL 激光器。国内在 DPAL 领域也做了深入研究^[6-8]。由于碱金属原子 $n^2S_{1/2} \rightarrow n^2P_{3/2}$ 跃迁过程的碰撞展宽作用较小,抽运光波长区域与约 1 THz 带宽的 LD 阵列耦合实现非常困难,缩小 LD 阵列的输出会降低它们的效率,这需要每一个 LD 带宽固定到 $n^2S_{1/2} \rightarrow n^2P_{3/2}$ 跃迁区域,这将限制激光器的最高输出功率。针对半导体抽运源所面临的谱线匹配问题,通常采用增大缓冲气体压强(如氦气)和压窄半导体抽运线宽的方法,并通过加入烃类小分子缓冲气体来实现粒子快速弛豫到 $^2P_{1/2}$ 能级以抑制自发辐射,实现有效的粒子数反转。尽管在

收稿日期: 2015-01-04; 收到修改稿日期: 2015-02-08

作者简介: 孙 伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事非线性光学及碱金属激光器方面的研究。E-mail:swyudian@163.com

导师简介: 赵晓红(1964—),女,博士,教授,主要从事激光物理及非线性光学方面的研究。E-mail: x_zhao@bupt.edu.cn (通信联系人。)

窄带线宽 LD 阵列方面取得了显著进步,但是这种方法成本较高,而且利用这种窄带 LD 阵列获得高功率激光是不稳定的。

为解决抽运源与谱线匹配问题,Readle 等^[9]提出了准分子抽运碱金属激光器(XPAL),通过引入分子间作用,允许抽运频率偏离原子共振线,在 Cs-Ar 自然碰撞产生的碰撞对的蓝翼宽带吸收区抽运,如图 1 所示,利用 Cs、Ar 和乙烷的混合气体,通过激发 Cs-Ar 原子碰撞对及受激 Cs-Ar 准分子的解离,实现 XPAL 出光。与 DPAL 系统进行对比,Readle 等^[9-10],给出了详细的 XPAL 的讨论和四能级、五能级 XPAL 机理。Palla 等^[11-13]对脉冲型四、五能级 XPAL 理论模型进行了数值仿真,但由于 XPAL 动力学过程比较复杂,其仿真结果与实验不能很好符合。

本文根据建立的三角脉冲抽运 XPAL 的速率方程模型,通过研究激光能量随抽运光能量的变化,计算了 XPAL 的抽运阈值和斜率效率随温度、弛豫气体分子浓度的变化,为 XPAL 实验的优化提供参考。

2 XPAL 五能级速率方程模型

以 Cs 蒸气和 Ar 作为激光增益介质,脉冲抽运光近似为三角脉冲,在 Readle 五能级 XPAL 的理论模型基础上,考虑 CS 原子能级 Cs($6^2P_{3/2}$)、Cs($6^2P_{1/2}$)向 Cs($6^2D_{5/2}$)和 Cs($6^2D_{3/2}$)的跃迁,如图 2 所示,为简化研

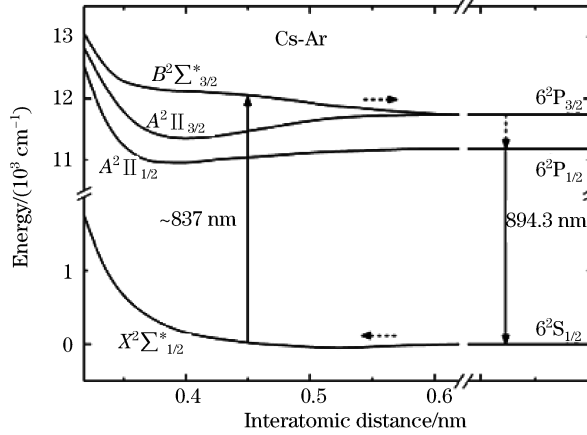


图 1 Cs-Ar 型 XPAL 抽运路径和产生激光的五能级模型示意图^[9]

Fig. 1 Pump path of the XPAL which takes Cs-Ar as gain medium and its five-level model^[9]

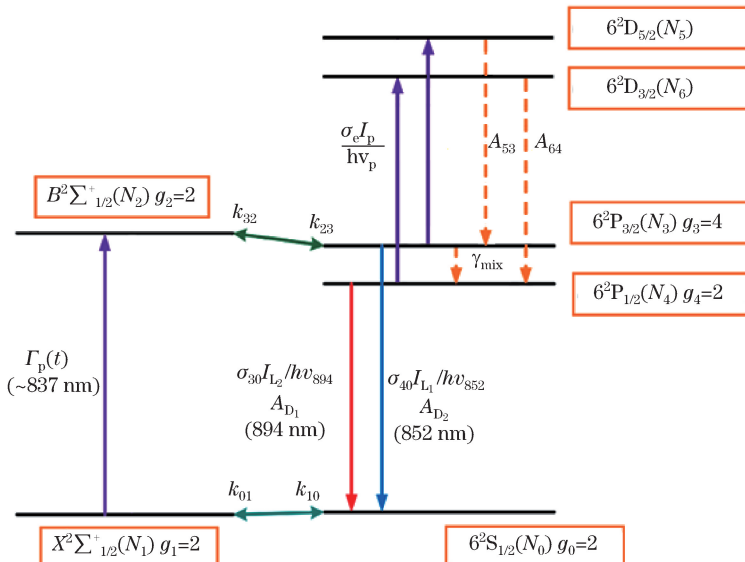


图 2 模型中各粒子转移过程的能级图(实线表示辐射跃迁)

Fig. 2 Energy level diagram indicating the various population transfer processes considered in the model. Solid lines indicate radiative transitions

究过程,使用 Carroll 等^[12]的假设: 1)在稳态激光输出时,Cs($6^2S_{1/2}$)和 CsAr($X^2\Sigma_{1/2}^+$)态维持平衡; 2)在稳态激光输出时,Cs($6^2S_{1/2}$)和 CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$)态之间保持平衡; 3)CsAr($A^2\Pi_{1/2}$)和 CsAr($A^2\Pi_{3/2}$)态的作用可以忽略; 4)Cs($6^2P_{1/2}$)态在四能级中不发挥重要作用; (5)CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$)态的自发辐射可以忽略; 6) [Ar]即 Ar 分子浓度不变; 7)在抽运束端面抽运光强是均匀的; 8)Cs($6^2S_{1/2}$) \rightarrow Cs($7^2P_{3/2}$)的双光子吸收可以忽略,忽略 $N_5 \rightarrow N_6$ 的无辐射跃迁,速率方程模型如下:

$$N_{\text{total}} = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6, \quad (1)$$

$$dN_0/dt = 0 = (\sigma_{40} I_{L_1}/h\nu_{L_1})(N_4 - N_0) + N_3/\tau_{30} + N_4/\tau_{40} \\ + (\sigma_{30} I_{L_2}/h\nu_{L_2})(N_3 - 2N_0) - k_{01} N_0 [M] + k_{10} N_2, \quad (2)$$

$$dN_1/dt = 0 = k_{01} N_0 [M] - k_{10} N_1 - (\sigma_p I_p/h\nu_p)(N_1 - N_2), \quad (3)$$

$$dN_2/dt = 0 = (\sigma_p I_p/h\nu_p)(N_1 - N_2) - k_{23} N_2 + k_{32} N_3 [M], \quad (4)$$

$$dN_3/dt = 0 = -(\sigma_{30} I_{L_2}/h\nu_{L_2})(N_3 - 2N_0) + k_{23} N_2 - k_{32} N_3 [M] - N_3/\tau_{30} \\ - \sigma_e I_p/(h\nu_p) N_3 - \gamma_{\text{mix}} [N_3 - 2N_4 \exp(-\Delta E/k_B T)] + A_{53} N_5, \quad (5)$$

$$dN_4/dt = 0 = -(\sigma_{40} I_{L_1}/h\nu_{L_1})(N_4 - N_0) - N_4/\tau_{40} \\ + \gamma_{\text{mix}} [N_3 - 2N_4 \exp(-\Delta E/k_B T)] - (\sigma_e I_p/h\nu_p) N_4, \quad (6)$$

$$dN_5/dt = 0 = (\sigma_e I_p/h\nu_p) N_3 - A_{53} N_5 + A_{64} N_6, \quad (7)$$

$$dN_6/dt = 0 = (\sigma_e I_p/h\nu_p) N_4 - A_{64} N_6, \quad (8)$$

$$dI_{L_1}/dt = 0 = N_4 c^2 \sigma_{40} h\nu_{L_1}/l_g + [R_{\text{oc}} t^4 \exp[\sigma_{40}(N_4 - N_0)2l_g] - 1] I_{L_1}/\tau_{\text{RT}}, \quad (9)$$

$$dI_{L_2}/dt = 0 = N_3 c^2 \sigma_{30} h\nu_{L_2}/l_g + [R_{\text{oc}} t^4 \exp[\sigma_{30}(N_3 - 2N_0)2l_g] - 1] I_{L_2}/\tau_{\text{RT}}, \quad (10)$$

式中各能级粒子数: N_0 为 Cs($6^2S_{1/2}$), N_1 为 CsAr($X^2\Sigma_{1/2}^+$), N_2 为 CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$), N_3 为 Cs($6^2P_{3/2}$), N_4 为 Cs($6^2P_{1/2}$), $[M]$ 为 Ar 粒子数密度; I_p 为增益池中抽运束光强, T 为模拟实验温度, ν_p 为抽运光束的频率, σ_{40} 、 σ_{30} 为 894 nm、852 nm 激光束的发射截面, I_{L_1} 、 I_{L_2} 分别为增益池内 894 nm、852 nm 激光光强。 ν_{L_1} 、 ν_{L_2} 分别为 D_1 、 D_2 线激光频率, τ_{40} 、 τ_{30} 分别为 N_4 、 N_3 态的自发辐射寿命, k_B 为波尔兹曼常数, l_g 为增益池长度, τ_{RT} 为光腔寿命, 如表 1 所示 k_{01} 、 k_{10} 、 k_{23} 、 k_{32} ^[11] 为结合速率常数, k 为反应速率常数。

定义平衡因子 f_{10} 和 f_{23} , 分别为 N_1/N_0 和 N_2/N_3 ^[14]:

$$f_{10} = N_1/N_0 = [\text{CsAr}(X^2\Sigma_{1/2}^+)]/[\text{Cs}(6^2S_{1/2})] \\ = (g_1/g_0) 4\pi R_0^2 \Delta R \exp(-\Delta E_{23}/k_B T) [M], \quad (11)$$

$$f_{23} = N_2/N_3 = [\text{CsAr}(B^2\Sigma_{1/2}^+)]/[\text{Cs}(6^2P_{3/2})] \\ = (g_2/g_3) 2\pi R_0^2 \Delta R \exp(-\Delta E_{23}/k_B T) [M], \quad (12)$$

式中 R_0 是蓝翼最佳原子核间距(Cs-Ar 为 4.5×10^{-10} m), ΔR 是维持共振吸收条件的距离范围(10^{-10} m), $[M]$ 为 Ar 分子浓度。 R_0 和 ΔR 间接取决于激发源带宽。(12)式中的倍数 2 是由于 Cs($6^2P_{3/2}$)和 Ar 原子的碰撞来自 CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$)和 CsAr($A^2\Pi_{1/2}$)势能曲线^[11]。

表 1 简单理论模型 XPAL 用到的反应常数^[11]

Table 1 XPAL reaction set used in the simple theoretical model^[11]

| Reaction | k | Unit |
|--|--|---|
| k_{01} Cs($6^2S_{1/2}$) + Ar \rightarrow CsAr($X^2\Sigma_{1/2}^+$) | $1.67 \times 10^{-11} T^{1/2} \exp(-14.39/T)$ | $\text{cm}^3 \cdot 7 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| k_{10} CsAr($X^2\Sigma_{1/2}^+$) \rightarrow Cs($6^2S_{1/2}$) + Ar | $6.76 \times 10^{-10} T^{1/2}$ | s^{-1} |
| k_{23} CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$) \rightarrow Cs($6^2P_{3/2}$) + Ar | $6.76 \times 10^{-10} T^{1/2}$ | s^{-1} |
| k_{32} Cs($6^2P_{3/2}$) + Ar \rightarrow CsAr($B^2\Sigma_{1/2}^+$) | $8.20 \times 10^{-12} T^{1/2} \exp(-358.13/T)$ | $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ |

抽运光束的吸收截面 σ_p 由吸收系数 α 和归一化吸收系数 k_{abs} 决定,

$$\alpha = k_{\text{abs}} N_0 [M] = \sigma_p N_1 \\ \Rightarrow \sigma_p = k_{\text{abs}} N_0 [M]/N_1 = k_{\text{abs}} [M]/f_{10}, \quad (13)$$

k_{abs} 、 N_0/N_1 即 f_{10} 的简单函数。 Phelps^[15] 得到了 CsAr 在 837 nm 的归一化吸收系数的固定值为 $1.3 \times 10^{-36} \text{cm}^5$, 也被 Readle 等^[9] 进行了验证。对于 Ar 为 $1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的 Cs-Ar 混合物, 在 450K 时, $\sigma_p = 5.27 \times 10^{-15} \text{cm}^2$, 为

为了方便计算, Cs($6^2P_{3/2}$) \rightarrow Cs($6^2D_{5/2}$)和 Cs($6^2P_{1/2}$) \rightarrow Cs($6^2D_{3/2}$)的吸收截面 σ_e 均取 $1.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ [11]。

对于抽运光没有透射传输损耗($t_p=1$),且高反镜的全部反射($r_p=1$),增益池中的纵向平均抽运光强表达式为[3]

$$I_p = (I_{\text{pin}} / [\sigma_p (N_2 - N_1) l_g]) * (\exp[\sigma_p (N_2 - N_1) 2l_g] - 1), \quad (14)$$

光腔寿命 τ_{RT} 可以由下式确定:

$$\tau_{\text{RT}} = l_g / (c\delta), \quad (15)$$

式中 $\delta = -(1/2) \ln(R_{\text{oc}} t^4)$, 得

$$\tau_{\text{RT}} = -2l_g / [c \ln(R_{\text{oc}} t^4)], \quad (16)$$

D_2 线和 D_1 线发射截面 σ_{30} 、 σ_{40} 由文献[16-17]计算。Cs 与 C_2H_6 、Cs 与 Ar 粒子间的相对速率为

$$v_{\text{Cs}-C_2H_6} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi} \left(\frac{1}{m_{\text{Cs}}} + \frac{1}{m_{C_2H_6}} \right)}, \quad (17)$$

$$v_{\text{Cs}-Ar} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi} \left(\frac{1}{m_{\text{Cs}}} + \frac{1}{m_{\text{Ar}}} \right)}, \quad (18)$$

弛豫速率为

$$\gamma_{\text{mix}} = \sigma_{C_2H_6} v_{\text{Cs}-C_2H_6} [C_2H_6] + \sigma_{\text{Ar}} v_{\text{Cs}-Ar} [Ar], \quad (19)$$

式中 $\sigma_{C_2H_6} = 5.2 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ [20], $\sigma_{\text{Ar}} = 5.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $[C_2H_6]$, $[Ar]$ 分别为 C_2H_6 , Ar 的粒子数密度[21]。Cs - Ar 混合气体 XPAL 系统的模型参数在表 2 中列出。

表 2 温度为 423K 时 Cs-Ar XPAL 系统的模型参数

Table 2 Parameters of the XPAL system model which takes Cs-Ar as gain medium, when the temperature is 423K

| Parameter | Value($T=423\text{K}$) |
|---|--------------------------|
| Rare gas concentration $[Ar]$ (pressure is $9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$) / cm^{-3} | 1.62×10^{19} |
| Ethane concentration $[C_2H_6]$ (pressure is $6.20 \times 10^4 \text{ Pa}$) / cm^{-3} | 1.06×10^{19} |
| Reduced absorption coefficient $k_{\text{abs}} / \text{cm}^5$ | 1.3×10^{-36} |
| Pump photon energy $h\nu_p / \text{J}$ | 2.375×10^{-19} |
| Laser photon energy (D_2 line) $h\nu_{L_2} / \text{J}$ | 2.332×10^{-19} |
| Laser photon energy (D_1 line) $h\nu_{L_1} / \text{J}$ | 2.224×10^{-19} |
| D_2 radiative lifetime τ_{30} / ns [18] | 30.5 |
| D_1 radiative lifetime τ_{40} / ns | 34.9 |
| Laser cross-section (D_2) $\sigma_{30} / \text{cm}^2$ | 1.38×10^{-13} |
| Laser cross-section (D_1) $\sigma_{40} / \text{cm}^2$ | 1.50×10^{-13} |
| Spontaneous emission rate $A_{53} \text{ s}^{-1}$ [19] | 1.65×10^7 |
| Spontaneous emission rate $A_{64} \text{ s}^{-1}$ [19] | 0.283×10^7 |
| Absorption cross-section σ_p / cm^2 | 5.29×10^{-15} |
| Gain length l_g / cm | 4 |
| Reflectivity of outcoupling mirror R_{oc} | 0.27 |
| Window transmission t_p | 0.975 |

3 计算结果

图 3 为工作温度分别为 423、443、463K, $P_{[Ar]} = 9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$, $P_{[C_2H_6]} = 6.20 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, 激光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化情况, 可以看出随着温度升高, 阈值会增大, 斜率效率 η 分别为 0.32%、0.81%、1.78%, 依次增大, 与预期相符。

在温度 423K, 加入 $9.49 \times 10^4 \text{ Pa Ar}$ 时, 提供 13.6 mJ 的强抽运脉冲, C_2H_6 分子浓度从 0 增加至 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 如图 4 所示, 894 nm 的激光在 C_2H_6 分子浓度为 $4.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时出现, 852 nm 的激光在 C_2H_6 分子浓度大于 $6.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时消失, 在两体积分子数之间, 894 nm 和 852 nm 的激光均存在。这与 Readle 的结论相似[9]。可以得出结论, 只要 C_2H_6 分子浓度足够大, 则只输出 894 nm 的激光。

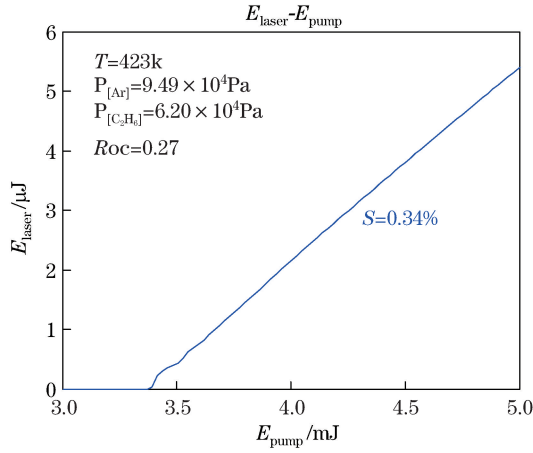


图 3 当 $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$, $P_{C_2H_6}=6.20 \times 10^4 \text{ Pa}$, $T=423 \text{ K}$, 443 K , 463 K 时, 激光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化图, 得出斜率效率 $R_{oc}=0.27$

Fig. 3 Five-level XPAL output pulse energy when $T=423 \text{ K}$, 443 K , 463 K , $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$, $P_{C_2H_6}=6.20 \times 10^4 \text{ Pa}$, $R_{oc}=0.27$

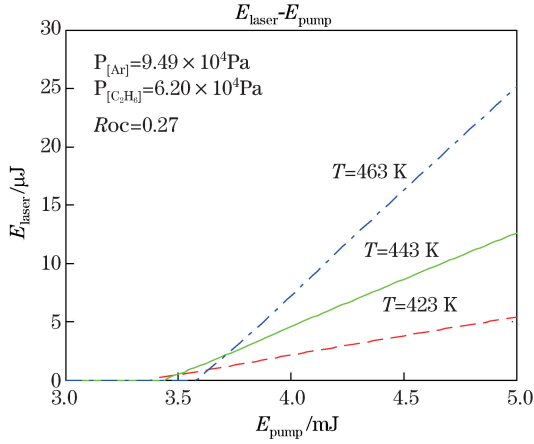


图 4 在 $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$, $T=423 \text{ K}$ 时, 894 nm(实线)、852 nm(虚线)的激光脉冲能量随 C_2H_6 分子浓度的变化图。 $\sigma_e=0$, $E_{pump}=13.6 \text{ mJ}$

Fig. 4 Output pulse energy E_{laser} at 852.1 nm (solid line) and 894.3 nm (dashed line) as a function of $[C_2H_6]$, when $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$ and the temperature is 423 K. These results are obtained by assuming $\sigma_e=0$ and $E_{pump}=13.6 \text{ mJ}$

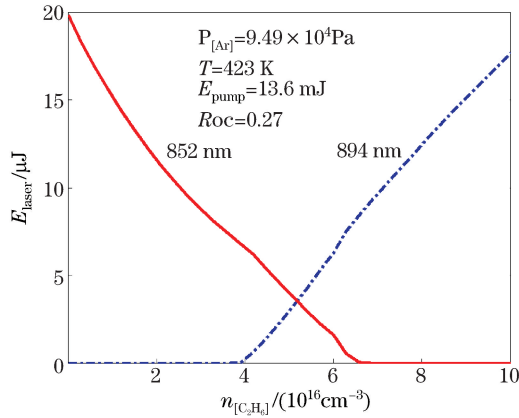


图 5 在 $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\lambda_p=836.7 \text{ nm}$ 时, 6.8, 8.5, 10.2 mJ 时激光脉冲能量随温度变化图

Fig. 5 Output pulse energy E_{laser} as a function of temperature at different pump pulse energies of 6.8, 8.5, 10.2 mJ, when $P_{Ar}=9.49 \times 10^4 \text{ Pa}$ and $\lambda_p=836.7 \text{ nm}$

随着温度的升高,激光能量会在 515K 附近出现一个峰值,如图 6 所示,并在温度很高时消失。随着抽运能量的增大,激光峰值能量增大,且随着抽运能量增大峰值有向右偏移的趋势。因此,提高工作温度是增加斜率效率的一个可行方案,在其他条件不变的情况下,对应最大光光效率和最低抽运能量分别有最佳温度。

图 7 为 $T=409\text{K}$, $[\text{Ar}]=1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 抽运脉宽 4ns, 增益池长度为 10 cm, 输出耦合镜反射率 0.5 条件下, 调整 $[\text{C}_2\text{H}_6]=0, 1 \times 10^{16}, 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 得到的 852 nm 激光脉冲能量随抽运脉冲能量变化图。图 8 为相同条件下, $[\text{C}_2\text{H}_6]=9 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 得到的 894 nm 激光脉冲能量随抽运脉冲能量变化图。从图中可以看出, 随着 C_2H_6 粒子数密度的增大, 852 nm 出光的抽运阈值将会变高, 而 894 nm 激光出光的抽运阈值会随之降低, 且四能级出光阈值较高。

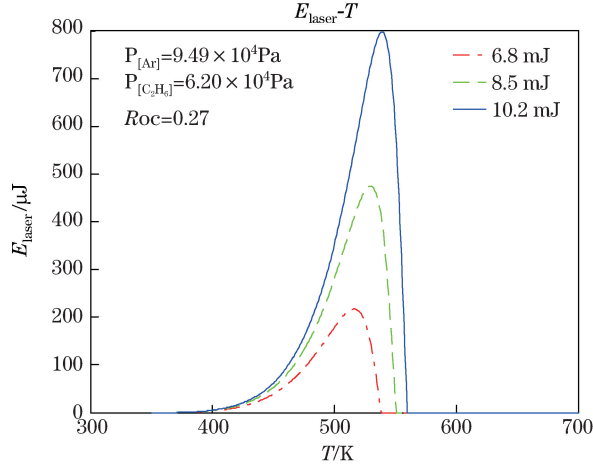


图 6 在 $[\text{Ar}]=1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $T=409\text{K}$, $\lambda_p=836.7 \text{nm}$, C_2H_6 分子浓度为 $0, 1 \times 10^{16}, 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时 852 nm 激光脉冲能量随抽运脉冲能量变化图

Fig. 6 Output pulse energy E_{laser} as a function of pump pulse energy at different C_2H_6 concentrations of $0, 1 \times 10^{16}, 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, when $[\text{Ar}]=1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $T=409 \text{K}$, $\lambda_p=836.7 \text{nm}$

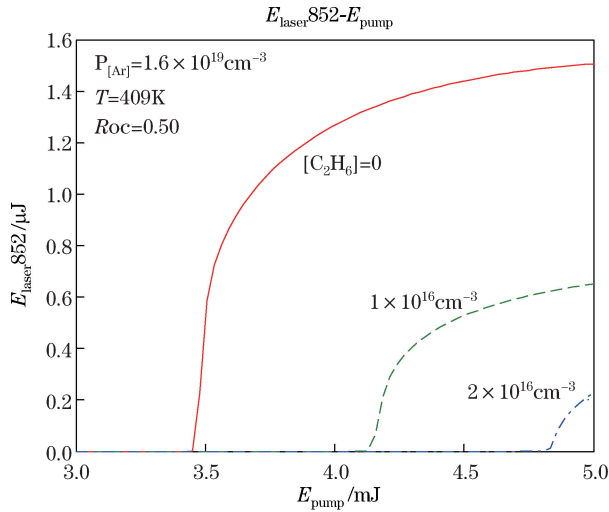


图 7 在 $[\text{Ar}]=1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $T=409 \text{K}$, $\lambda_p=836.7 \text{nm}$, C_2H_6 分子浓度为 $9 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 时 894 nm 激光脉冲能量随抽运脉冲能量变化图

Fig. 7 Output pulse energy E_{laser} as a function of pump pulse energy at different C_2H_6 concentrations of $9 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, when $[\text{Ar}]=1.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $T=409 \text{K}$, $\lambda_p=836.7 \text{nm}$

4 结 论

通过建立三角脉冲抽运的五能级速率方程,研究了准分子抽运碱金属激光器的抽运特性,改进了 XPAL

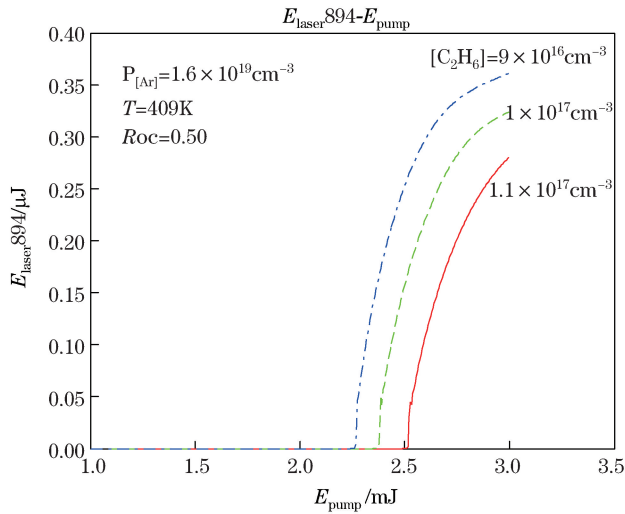


图 8 在 $[\text{Ar}] = 1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T = 409 \text{ K}$, $\lambda_p = 836.7 \text{ nm}$, C_2H_6 粒子数密度为 9×10^{16} 、 1×10^{17} 、 $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时 894 nm 激光脉冲能量随抽运脉冲能量变化图

Fig. 8 Predicted output pulse energy E_{laser} as a function of pump pulse energy, when $[\text{Ar}] = 1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $[\text{C}_2\text{H}_6] = 9 \times 10^{16}, 1 \times 10^{17}, 1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. These results are obtained by assuming $\sigma_e = 0$ and $T = 409 \text{ K}$ when $\lambda_p = 836.7 \text{ nm}$

理论模型。模型得到了激光能量随抽运能量、工作温度、弛豫气体浓度变化的曲线图。计算结果表明,在一定范围内,提高温度可以增大斜率效率和阈值;抽运能量越高得到激光能量越高,但如果温度太高,将不会出现激光输出;弛豫气体分子浓度会影响 D_1 、 D_2 线激光能量的输出。模型得到的斜率效率与实验结果符合较好,但阈值较高,原因是模型中某些参数需要进一步研究调整。下一步的研究将是改善模型参数,降低激光抽运阈值,以及考虑 $\text{Cs}(6^2\text{S}_{1/2} - 7^2\text{P}_{3/2})$ 的双光子吸收对 XPAL 带来的影响。

参 考 文 献

- 1 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. Resonance transition 795 nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336–2338.
- 2 R H Page, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. First demonstration of a diode-pumped gas (alkali vapor) laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, 2005; 467–469.
- 3 Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, *et al.*. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(12): 2151–2163.
- 4 Hager G D, Perram G P. A three-level analytic model for alkali metal vapor lasers; part I. narrowband optical pumping[J]. Applied Physics B, 2010, 101(1-2): 45–56.
- 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 Electronics, 2012, 42(2): 95.
- 6 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.* Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 10–18.
- 7 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): 10–18.
- 8 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.
- 9 杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 精细结构混合速率对激光二极管抽运碱金属蒸气激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2502–2507.
- 10 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): 59–62.
- 11 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): 59–62.
- 12 Readle J D. Atomic Alkali Lasers Pumped by the Dissociation of Photoexcited Alkali-Rare Gas Collision Pairs[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- 13 Galbally-Kinney K L, Kessler W J, Rawlins W T, *et al.*. Spectroscopic and kinetic measurements on alkali atom-rare gas excimers[J]. AIAA Paper, 2010; 5044.
- 14 Palla A D, Carroll D L, Verdeyen J T, *et al.*. High-fidelity modelling of an exciplex pumped alkali laser with radiative transport[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2011, 44(13): 135402.
- 15 Carroll D L, Verdeyen J T. A simple equilibrium theoretical model and predictions for a continuous wave exciplex pumped alkali laser[J].

- Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2013, 46(2): 025402.
- 13 Endo M, Nagai T, Wani F. Experimental investigation and numerical simulation of exciplex pumped alkali lasers[C]. XIX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2013: 867716.
 - 14 Hedges R E M, Drummond D L, Gallagher A. Extreme-wing line broadening and Cs-inert-gas potentials[J]. Physical Review A, 1972, 6(4): 1519.
 - 15 Chen C L, Phelps A V. Absorption coefficients for the wings of the first two resonance doublets of cesium broadened by argon[J]. Physical Review A, 1973, 7(2): 470.
 - 16 Pitz G A, Fox C D, Perram G P. Pressure broadening and shift of the cesium D₂ transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and ³He with comparison to the D₁ transition[J]. Physical Review A, 2010, 82(4): 042502.
 - 17 Pitz G A, Wertepny D E, Perram G P. Pressure broadening and shift of the cesium D₁ transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and ³He[J]. Physical Review A, 2009, 80(6): 062718.
 - 18 Steck D A. Cesium D line data[R]. Los Alamos National Laboratory, 2003: 124.
 - 19 Correll T L, Horvatic V, Omenetto N, *et al.*. Quantum efficiency improvement of a cesium based resonance fluorescence detector by helium-induced collisional excitation energy transfer[J]. SpectrochimicaActa Part B: Atomic Spectroscopy, 2005, 60(6): 765–774.
 - 20 Walentynowicz E, Phaneuf R A, Krause L. Inelastic collisions between excited alkali atoms and molecules X. Temperature dependence of cross sections for ²P_{1/2} ↔ ²P_{3/2} mixing in cesium, induced in collisions with deuterated hydrogens, ethanes, and propanes[J]. Canadian Journal of Physics, 1974, 52(7): 589–591.
 - 21 Krause L. Collisional excitation transfer between the ²P_{1/2} and ²P_{3/2} Levels in alkali atoms[J]. Applied Optics, 1966, 5(9): 1375–1382.

栏目编辑: 张 雁