

光泵铯蒸气激光的动力学模型^{*}

朱 琦 潘佰良[†] 陈 立 王亚娟 张迅懿

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

(2009 年 5 月 18 日收到; 2009 年 6 月 9 日收到修改稿)

建立了一个物理模型描述了光泵铯蒸气激光的动力学过程和激光机理. 结合实验参量, 经数值求解该模型, 定量分析了抽运光参量、缓冲气压和输出镜反射率等对激光输出功率和光光效率产生的影响, 得到了与实验基本一致的模拟结果. 表明该模型较好地反映了光泵铯蒸气激光的动力学机理和发射过程, 为该类激光的优化设计提供了借鉴和参考.

关键词: 铯蒸气激光, 物理模型, 抽运光参量, 光光效率

PACC: 4255H, 4260H, 4260D

1. 引 言

光泵碱金属蒸气激光是最近几年引起人们极大兴趣和获得快速发展的新型激光器件^[1-4], 兼有固体激光和气体激光的优点, 有望获得具有高质量光束的高效高功率近红外激光输出, 在激光冷却、定向能量传输、材料处理和医疗磁共振成像系统等方面有广泛的应用前景. 与其他高功率激光器相比, 光泵碱金属蒸气激光还具有量子效率高, 增益介质(气体)光学性能好和线宽窄(几 MHz)等优点.

自 2003 年 Krupke 等报道光泵铷蒸气共振跃迁 795 nm 波长激光以来^[5], 美国 Lawrence Livermore 国家实验室等科研组对光泵碱金属蒸气激光进行了持续的实验和理论研究, 并取得一些重大进展^[6-8]. 采用窄线宽(约 1 MHz)基模钛宝石激光为抽运源, 已实现光光效率为 63% 的铯激光的高效运转^[9]. 为了提高激光功率, 可采用高功率激光二极管和多个激光二极管列阵或激光二极管列阵堆作为抽运光源, 最近的实验结果表明, 采用双列阵和四列阵高功率激光二极管抽运方式, 已分别实现最大功率 17 W 和 48 W 的铷激光和铯激光, 对应的斜率效率达 53% 和 52%^[2,8].

与实验上取得的重要进展相比, 人们对光泵碱金属蒸气激光的机理和动力学过程的研究明显不

足, 只有少量文献结合已有的实验结果对该类激光的动力学过程进行了分析和计算模拟^[3,10]. 有关该类激光中的一些基本动力学过程如抽运光线宽、光斑和激光腔模式对激光能级抽运速率和激光效率的作用机理、高功率抽运时的热效应和抽运光与碱金属蒸气介质的相互作用机理等均未得到有效解决. 在深入分析和理解光泵铯蒸气激光的技术路线和激光机理的基础上, 结合我们以前有关脉冲金属蒸气激光动力学模型的研究内容^[11-15], 本文建立了一个物理模型描述了该激光中的各种微观动力学机理和激光发射过程, 经数值求解该模型, 定量分析了各工作参量与激光输出特性间的关系. 得到了与实验基本一致的模拟结果, 合理解释了现有的实验结果, 为该类激光的优化设计和提高其输出特性提供了理论依据.

2. 模型描述

模型考虑了光泵铯蒸气激光系统中抽运光(功率和线形)和谐振腔参量、吸收和辐射跃迁、精细混合碰撞等过程对铯原子有关能级粒子数和腔内外光子数密度的影响机理, 缓冲气压和组分、铯蒸气密度和抽运耦合方式与激光输出特性之间的内在联系, 给出了激光有关能级粒子数密度、腔内外光子数密度、激光功率等参量的变化方程.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10974176)和浙江省自然科学基金(批准号:Y1090087)资助的课题.

[†] E-mail: pbl66@zju.edu.cn

图 1 给出了光泵铯蒸气激光中铯原子能级示意图. 在几十 kPa 缓冲气体氦气和乙烷的铯蒸气中, 基态铯原子在抽运光作用下经吸收跃迁 $D2$ 线 ($6^2S_{1/2} - 6^2P_{3/2}$) 被有效抽运到 $6^2P_{3/2}$ 能级, $6^2P_{3/2}$ 能级的粒子通过与乙烷和氦气的混合碰撞和自旋耦合, 被快速弛豫到激光上能级 $6^2P_{1/2}$ 上, 从而在 $D1$ 线跃迁能级间 ($6^2P_{1/2} - 6^2S_{1/2}$) 形成粒子数反转, 产生激光. 考虑相关的抽运和排空过程, 铯原子有关能级粒子数密度的速率方程为

$$\frac{dn_1}{dt} = -\Gamma_p + \Gamma_1 + \frac{n_2}{\tau_{D1}} + \frac{n_3}{\tau_{D2}}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_2}{dt} = & -\Gamma_1 + \gamma_{2P_{3/2}-2P_{1/2}} \\ & \times \left\{ (n_3 - n_2) - \left[2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) - 1 \right] n_2 \right\} \\ & - \frac{n_2}{\tau_{D1}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} = & \Gamma_p - \gamma_{2P_{3/2}-2P_{1/2}} \\ & \times \left\{ (n_3 - n_2) - \left[2\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) - 1 \right] n_2 \right\} \\ & - \frac{n_3}{\tau_{D2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

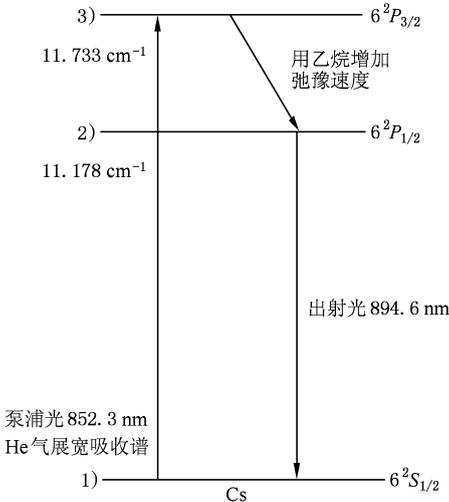


图 1 光泵铯蒸气激光过程中的铯原子能级示意图

其中 n_1 , n_2 和 n_3 分别为铯原子基态 $6^2S_{1/2}$ 、激光上能级 $6^2P_{1/2}$ 和能级 $6^2P_{3/2}$ 的粒子数密度, Γ_p 和 Γ_1 分别表示抽运光和激光对能级粒子数密度的抽运速率, $\gamma_{2P_{3/2}-2P_{1/2}}$ 为两分裂能级之间的粒子转移速率, ΔE 为两分裂能级的能级差, T 为开尔文温度, τ_{D1} 和 τ_{D2}

各为 $6^2P_{1/2}$ 和 $6^2P_{3/2}$ 能级的自发辐射寿命. 方程 (1) — (3) 中由缓冲气体碰撞、抽运光和激光引起的能级粒子数密度的变化速率为

$$\begin{aligned} & \gamma_{2P_{3/2}-2P_{1/2}} \\ & = n_{C_2H_4} \sigma_{(C_2H_4)}^{2P_{3/2}-2P_{1/2}} V_r(C_2H_4) \\ & \quad + n_{He} \sigma_{(He)}^{2P_{3/2}-2P_{1/2}} V_r(C_2H_4), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_p = & \frac{\eta_{mode} \eta_{del}}{V_L} \int d\lambda \frac{1}{hc/\lambda} \frac{dP_p}{d\lambda} \\ & \times \{1 - \exp[-(n_1 - 0.5n_3)\sigma_{D2}(\lambda)l]\} \\ & \times \{1 + R_p \exp[-(n_1 - 0.5n_3)\sigma_{D2}(\lambda)l]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 = & \frac{1}{V_L} \frac{P_L}{h\nu_L} \frac{R_{OC}}{1 - R_{OC}} \\ & \times \left(\frac{1}{\sqrt{t^2 R_{OC}}} - 1 \right) \left(1 + \sqrt{\frac{t^2}{R_{OC}}} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $n_{C_2H_4}$ 和 n_{He} 分别是乙烷和氦气的粒子数密度, $\sigma_{(C_2H_4)}^{2P_{3/2}-2P_{1/2}}$ 和 $\sigma_{(He)}^{2P_{3/2}-2P_{1/2}}$ 分别表示由乙烷和氦气引起的铯原子 $6^2P_{3/2} - 6^2P_{1/2}$ 能级间的碰撞截面, V_r 是各粒子间相对热运动速度, η_{mode} 为模式匹配系数, η_{del} 为增益介质对抽运光的耦合吸收系数, V_L 为激光腔模体积, $\sigma_{D2}(\lambda)$ 为吸收谱对应某一波长的吸收截面, l 为增益介质长度, R_p 是全反镜的反射系数, P_L 为激光功率, R_{OC} 为输出耦合镜的反射系数, ν_L 为出射光的频率, t 为光在腔内的单程传输系数.

基于以上的动力学方程, 我们利用 MATLAB 应用程序, 建立了一个描述光泵铯蒸气激光动力学过程和激光机理的物理模型, 根据文献 [3, 9] 报道的实验参量和有关动力学过程的速率系数及辐射跃迁等数据, 运用数值计算方法 (包括复合高斯积分法等) 定量分析了抽运光、输出镜反射率和缓冲气压等对激光输出特性的影响.

3. 模拟结果和讨论

3.1. 抽运光线宽的影响

对光泵铯蒸气激光而言, 抽运光与铯原子吸收跃迁 $D2$ 线的线形和带宽间的匹配程度是影响激光效率的关键所在. 铯原子 $D2$ 吸收线经与氦气碰撞加宽的线形可用洛伦茨分布表示, 其半宽为

$$\Delta\nu_{D2-He-broadened} \text{ FWHM}$$

$$= 19.3 \frac{\text{GHz}}{\text{amagat}} \sqrt{\frac{T}{294 \text{ K}}} n_{\text{He-amagat}}, \quad (7)$$

其中 T 为温度, $n_{\text{He-amagat}}$ 表示氦压, 该线宽与温度和氦压都有关系, 如在 383 K 和 62.5 kPa 氦压时, $D2$ 线宽为 12.7 GHz. 假设抽运光线形也为洛伦茨分布并且保持总抽运功率不变条件下, 计算模拟了抽运光线宽与铯激光上能级抽运速率和激光效率的关系如图 2 所示.

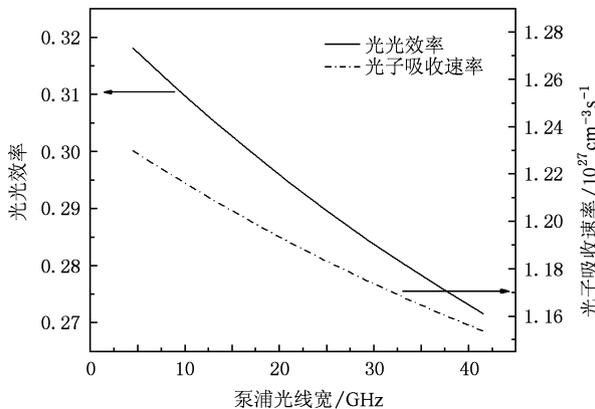


图 2 光光效率和光子吸收速率随抽运光线宽的变化曲线

表 1 列出了采用不同线宽 Ti: 蓝宝石激光抽运铯蒸气激光的实验结果. 对比图 2 的计算结果和表 1 的实验数据, 可以看出两者的变化趋势基本一致, 说明压缩抽运光线宽能显著提高光泵铯蒸气激光的抽运速率和光光效率.

表 1 不同抽运光线宽的实验结果

线宽	输入功率/W	输出功率/W	光-光效率/%
30 GHz ^[3]	0.774	0.235	30.36
200 kHz ^[9]	0.57	0.36	63.16

3.2. 缓冲气压的影响

在光泵铯蒸气激光系统的密封铯蒸气源中通常掺入一定压强的氦气和乙烷混合气体作为缓冲气体, 其中氦气起到增宽铯原子吸收跃迁 $D2$ 线和激光跃迁 $D1$ 线的线宽作用, 乙烷用来提高粒子从能级 $6^2P_{3/2}$ 向能级 $6^2P_{1/2}$ 的转移速率. 由于铯蒸气源的活性和密封性, 很难通过实验来实现氦气和乙烷的优化组合, 有必要通过理论模拟来定量分析缓冲气压对激光效率的影响. 根据文献[3]的实验参数, 在抽运光、激光腔参量和温度稳定条件下, 分别计算了氦气和乙烷压强与激光效率的关系如图 3 所示. 由图 3 知, 在文献[3]的 Ti: 蓝宝石激光抽运铯

蒸气激光的实验条件下, 当气压较低时(氦气压强 < 60 kPa, 乙烷压强 < 15 kPa), 激光效率随缓冲气压的增加快速提高, 之后趋向饱和, 出现效率下降的趋势, 这说明缓冲气压的大小和组分确实对激光输出特性影响较大, 在一定实验条件下存在一个最佳的缓冲气压组合参量.

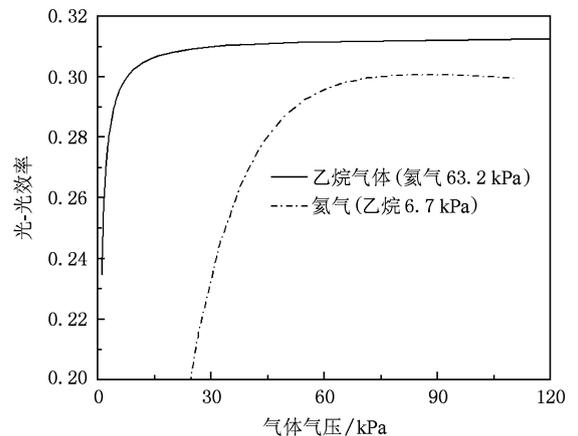


图 3 光光效率随乙烷和氦气压强的变化关系

3.3. 抽运光功率的影响

对光泵铯蒸气激光而言, 除了抽运光的线形和线宽之外, 抽运光功率对激光输出特性也产生重要影响. 根据文献[9]给出的实验参数, 我们定量计算了抽运光功率与激光输出功率和光光效率之间的关系, 并与文献[9]的实验结果进行比较, 结果如图 4 所示. 从图 4 知, 输出功率随输入功率变化的计算结果与实验结果基本一致, 表面该模型较好反映了光泵铯激光的动力学机理, 当抽运功率大于阈值时, 输出功率几乎随输入功率增加而线性上升, 由于 $6^2P_{3/2}$ 和 $6^2P_{1/2}$ 二能级间的弛豫速率是一定的, 对应的光光效率随着抽运功率的提高先快速上升, 之

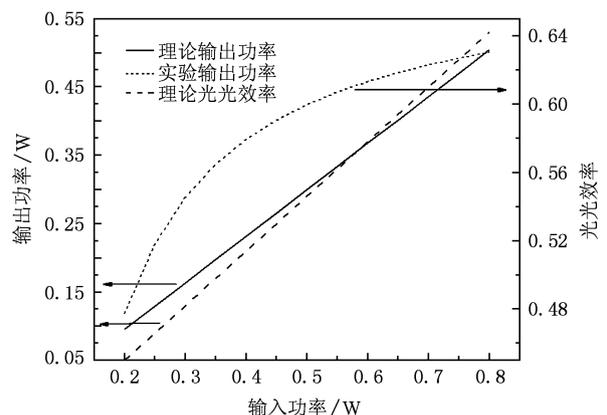


图 4 抽运光功率与激光输出功率和光光效率的关系

后逐渐达到饱和.

3.4. 输出镜反射率的影响

铯蒸气激光在谐振腔内来回振荡直到稳定出光的过程和输出镜的反射率有一定的联系,由(6)式也可见输出镜的反射系数 R_{oc} 和出射光功率相关. 为了定量分析输出镜发射系数对激光的作用机理,保持其他参量不变,设定 R_{oc} 分别等于 0.3, 0.5,

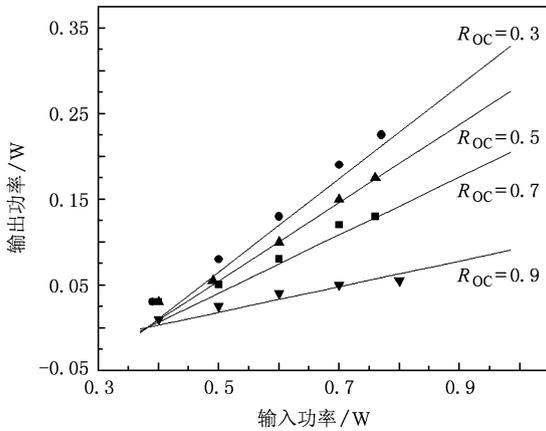


图5 不同 R_{oc} 时输出功率随输入功率变化的计算结果及实验对比

0.7, 0.9 时的情况, 分别计算了输出功率随输入功率的变化关系, 并且与文献[3]中的实验结果进行了比较, 发现两者基本一致, 进一步验证了模型的可靠性. 计算结果和实验数据如图5所示.

4. 结 论

在综合考虑光泵铯蒸气激光系统中抽运光和谐振腔参量、弛豫混合速率、吸收和辐射跃迁等过程对铯原子有关能级粒子数和腔内外光子数密度的影响机理等条件下, 本文建立了一个描述光泵铯蒸气激光动力学过程和激光机理的物理模型. 结合实验参数, 经数值计算, 定量分析了抽运光线形、功率、缓冲气压和组分及输出镜反射率对激光输出功率和效率的影响机理. 结果表明, 通过采用压缩抽运光线宽、增加抽运功率、在铯蒸气中掺入适量的氦气和乙烷气体等方式, 能有效提高光泵铯蒸气激光的输出特性. 通过与文献报道的实验结果比较, 验证了模拟结果的可靠性和准确性, 表面该模型较好地反映了光泵铯激光的动力学机理, 为该类激光优化设计和提高其输出特性提供了借鉴和参考.

- [1] Perschbacher Ty A, Hostutler D A, Shay T M 2007 *Proc. SPIE* **6346** 634607-1
- [2] Zhdanov B V, Knize R J 2008 *Proc. SPIE* **7005** 700524-1
- [3] Beach R J, Krupke W F, Kan V K, Payne S A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 2151
- [4] Ehrenreich T, Zhdanov B, Takekoshi T, Phipps S P, Knize R J 2005 *Electronics Lett.* **41** 47
- [5] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, Payne S A 2003 *Opt. Lett.* **28** 2336
- [6] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, Voci A, Knize R J 2007 *Opt. Express* **16** 748
- [7] Zhdanov B V, Knize R J 2007 *Opt. Lett.* **32** 2167
- [8] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, Voci A, Knize R J 2007 *Opt. Lett.* **33** 414
- [9] Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J 2006 *Opt. Commun.*

- 260** 696
- [10] Zhu Q, Yu J H, Zheng W, Quan H Y 2007 *Proc. SPIE* **6823** 68230o-1
- [11] Chen G, Feng J, Pan B L, Yao Z X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3149 (in Chinese) [陈 钢、冯 鉴、潘佰良、姚志欣 2005 物理学报 **54** 3149]
- [12] Chen L, Mao B N, Wang Y B, Wang L M, Pan B L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6976 (in Chinese) [陈 立、毛邦宁、王煜博、王丽敏、潘佰良 2007 物理学报 **56** 6976]
- [13] Chen L, Mao B N, Wang Y B, Wang L M, Pan B L 2007 *Opt. Commun.* **281** 1211
- [14] Pan B L, Chen G, Mao B N, Yao Z X 2006 *Opt. Express* **14** 8644
- [15] Mao B N, Pan B L, Chen L, Wang Y J, Yao Z X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1542

A kinetic model for optically pumped cesium vapor laser^{*}

Zhu Qi Pan Bai-Liang[†] Chen Li Wang Ya-Juan Zhang Xun-Yi

(*Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 18 May 2009; revised manuscript received 9 June 2009)

Abstract

A physical model is established to describe the kinetics and lasing mechanism of optically pumped cesium vapor laser. According to the experimental parameters, we analyze the influence of parameters of the pump light, the buffer gas pressure and the output coupler reflectivity on the output power and the optical-optical efficiency with the help of numerical method using this model. The simulation results are found to be in good agreement with that of experiments. It shows that this model reveals the kinetics and lasing mechanism of optically pumped cesium vapor laser correctly and is a theoretical guidance for the optimization of optically pumped alkali vapor laser.

Keywords: cesium vapor laser, physical model, parameters of pump light, optical efficiency

PACC: 4255H, 4260H, 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974176) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. Y1090087).

[†] E-mail: pbl66@zju.edu.cn