

钠乙烷准分子产生钠 D₂ 线荧光寿命的实验研究

胡 墅¹, 盖宝栋^{1,2}, 夏栩笙^{1,2}, 郭敬为^{1*}, 王鹏远¹, 李 慧¹, 刘金波¹, 何 山^{1,2}, 蔡向龙¹, 陈 莹¹

¹中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 准分子宽带抽运钠金属激光器具有实现钠信标光源的潜质, 该激光器在运转过程中需要借助准分子将钠原子由基态转换为激发态, 因此有必要对由准分子解离产生的钠原子激发态荧光寿命开展实验研究。采用不同波长的蓝翼抽运光对不同温度的钠乙烷准分子体系进行激发, 分别测量钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命。结果表明, 3²P_{3/2} 与 3²P_{1/2} 能级的荧光寿命明显长于其自然寿命, 且激发波长越长, 荧光寿命延长得越明显。辐射捕获效应是导致荧光寿命延长的另一个因素。随着泵浦单光子能量下降, 钠乙烷准分子被激发到 A²Π_{3/2} 态的概率变大, 能够长时间产生激发态钠原子, 这也会使荧光寿命延长。与钠 D₁ 线相比, 钠乙烷准分子体系钠 D₂ 线的放大自发辐射信号的可放大性更好。更好的可放大性以及较长的荧光寿命使得钠 D₂ 线激光更易于实现。

关键词 激光器; 受激准分子激光器; 碱金属蒸气; 荧光寿命; 辐射俘获; 放大自发辐射

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901003

Experimental Study of Sodium D₂ Line Fluorescence Lifetime of Sodium-Ethane Excimer Pairs

Hu Shu¹, Gai Baodong^{1,2}, Xia Xusheng^{1,2}, Guo Jingwei¹, Wang Pengyuan¹, Li Hui¹,
Liu Jinbo¹, He Shan^{1,2}, Cai Xianglong¹, Chen Ying¹

¹Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Excimer pumped sodium laser has the potential to realize the sodium beacon light source. During the operation of the laser, excimer is utilized to pump sodium atom from ground state to excited state, so it is necessary to experimentally study the fluorescence lifetime of excited sodium atom produced from dissociation of excimer pairs. In this work, sodium-ethane excimer pairs are excited by blue satellite pumping light with different wavelengths, and the fluorescence lifetimes of sodium D₁ and D₂ lines are measured at different operation temperatures. The experiment results demonstrate that the fluorescence lifetimes of 3²P_{3/2} and 3²P_{1/2} states are obviously longer than their natural lifetimes, the longer the excitation wavelength, the more obvious the extended fluorescence lifetime. Radiation trapping effect is considered as another factor that leads to the fluorescence lifetime lengthening. On the other hand, as the single photon energy decreasing, the probability of excimer pairs excited to A²Π_{3/2} state increases, and the excited sodium atom can be produced during a longer period, and this may also lead to the fluorescence lifetime lengthening. For sodium-ethane excimer pairs, the amplification characteristic of sodium D₂ line amplified spontaneous emission signal is better than that of sodium D₁ line. The better amplification characteristic and longer fluorescence lifetime make sodium D₂ line laser easier to achieve.

Key words lasers; excimer lasers; alkali metal vapor; fluorescence lifetime; radiation trapping; amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.2180; 140.1340; 020.2070

收稿日期: 2017-03-28; **收到修改稿日期:** 2017-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61505210)、中国科学院化学激光重点实验室创新课题基金(KLCL-2016-N12)

作者简介: 胡 墅(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事碱金属激光器方面的研究。E-mail: hushu@dicp.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: jingweigu@dicp.ac.cn

1 引 言

二极管抽运碱金属激光器(DPAL)具有体积小、增益系数高、量子效率高、易于流动散热、光束质量好等诸多优点^[1],受到了国内外研究人员的广泛关注^[2-8]。但 DPAL 的吸收线宽和激光的发射线宽严重不匹配,导致绝大多数抽运光不能被碱金属吸收。2008 年,准分子宽带抽运碱金属激光器(XPAL)的概念被提出^[9],之后研究人员陆续实现了不同准分子体系下铯 D₁ 线(894 nm)激光输出^[10]、铯 D₂ 线(852 nm)激光输出^[11]、铷 D₁ 线(795 nm)激光输出^[12]、钠与氙气准分子的钠 D₁ 线和 D₂ 线激光输出^[13],以及铷与氙气准分子体系下的铷 D₂ 线(780 nm)激光输出^[14]。2015 年,中国科学院电子学研究所对连续抽运 XPAL 机制下的抽运阈值特性进行了理论研究^[15]。

在研究激光体系过程中,激光上能级的荧光寿命是评价激光体系运转方式的重要参考依据之一。有人针对钠、铷、铯等碱金属蒸气激发态能级的荧光寿命进行研究后发现,实验获得的荧光寿命明显长于自然寿命^[16-18]。在原子蒸气中,如果激发态原子被其他基态原子包围,共振辐射出的光子就会被再吸收和多次发射,直到光子逃离出蒸气,这一过程称为辐射捕获效应^[19],该效应会导致观测寿命比自然寿命长。XPAL 在运转过程中不采用碱金属原子能级共振辐射波长对应的激发波长,而是利用蓝翼伴峰波长激发准分子,随后激发态的准分子快速解离,产生激发态碱金属原子。目前尚未查到这一过程中碱金属原子荧光寿命研究的相关文献。

本文围绕可用于钠信标光源^[20]的准分子宽带抽运钠金属激光器(XPNaL)开展工作。通过实验研究了钠乙烷准分子新体系在不同工作温度下的钠 D₁ 线和钠 D₂ 线荧光寿命,特别是钠乙烷准分子体系在不同波长蓝翼抽运光激发下的钠双线荧光寿命的变化,分析了荧光寿命延长的机理。此外,还研究了钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的放大自发辐射(ASE),分析了钠乙烷准分子体系的荧光寿命对粒子数反转的影响。

2 基本原理及实验装置

XPNaL 的工作机理示意图如图 1 所示。以钠乙烷准分子体系为例,基态钠原子与乙烷分子通过碰撞形成 X²Σ_{1/2}⁺态准分子,钠乙烷准分子吸收蓝翼吸收带的抽运光后跃迁到 B²Σ_{1/2}⁺态,进而快速分解为乙烷及 3²P_{3/2}态、3²P_{1/2}态的钠原子,钠原子在 3²P_{3/2} → 3²S_{1/2}过程中受激辐射产生波长为 589.16 nm 的激光(钠 D₂ 线)。

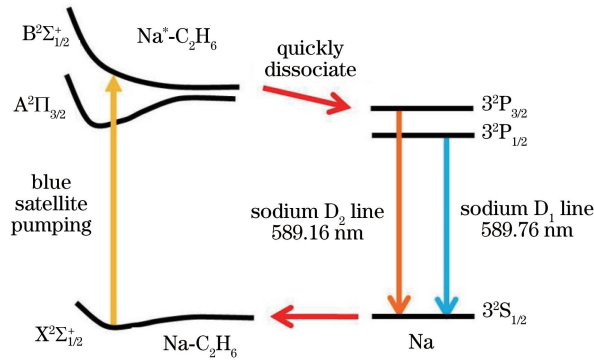


图 1 XPNaL 工作机理示意图

Fig. 1 Schematic of XPNaL operation mechanism

采用时间切片技术测量荧光寿命,实验装置示意图如图 2 所示。采用 Nd:YAG 激光器(PRO-290-30EH, Spectra-Physics)倍频输出的 532 nm 激光对 NarrowScan 脉冲染料激光器(Radiant Dyes GmbH)进行抽运,染料激光脉宽约为 8 ns,重复频率为 30 Hz,染料激光被聚焦于钠池中心。钠池的长度为 10 cm,直径为 2.5 cm。向池内充入乙烷气体,使常温下池内压力为 80 kPa。利用加热炉控制钠池的温度,加热炉侧面有观察窗口,通过该窗口可将光纤耦合进 FHR1000 型光谱仪对荧光进行探测,通过时间延迟器(DG645)外触发控制 Nd:YAG 激光器与光谱仪增强电荷耦合器件(ICCD)探测器同步触发,再利用光谱仪 ICCD 探测器的延时启动控制功能,在一定曝光时间内将钠 D₂ 线与钠 D₁ 线的荧光强度依次记录下来,从而完成对

整个荧光曲线的记录。在外触发下,ICCD的灵敏度极高,可以探测到弱的荧光信号;利用光谱仪光栅分离钠 D_1 线与钠 D_2 线,可以消除测量过程中波长的干扰。

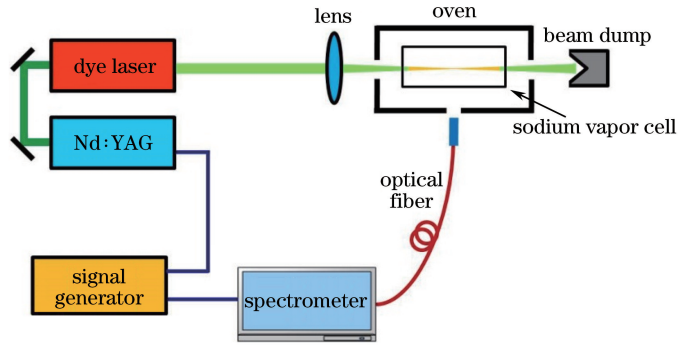


图 2 测量荧光寿命的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental device for testing fluorescence lifetime

3 实验结果与讨论

将钠池加热到 $250\text{ }^\circ\text{C}$,并将光谱仪 ICCD 的曝光时间开启到 500 ns ,以便在时域上完全捕获光谱。抽运波长为 553 nm 的激光激发钠乙烷准分子后,光谱仪就会捕获到钠 D_1 线和 D_2 线的荧光信号,如图 3 所示,钠双线的信号清晰可辨。由于 $3^2\text{P}_{3/2}$ 能级和 $3^2\text{P}_{1/2}$ 能级的间隔仅为 17.2 cm^{-1} ,因此钠 D_1 线和钠 D_2 线的荧光信号强度几乎一样。

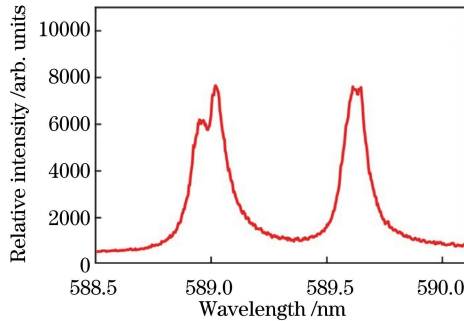


图 3 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 下钠乙烷准分子体系钠 D_1 线和钠 D_2 线的荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of sodium-ethane excimer pairs sodium D_1 and sodium D_2 lines at $250\text{ }^\circ\text{C}$

将光谱仪 ICCD 的曝光时间开启到 6 ns ,依次记录不同触发时间下的荧光光谱,绘制出荧光衰减曲线,如图 4(a)所示,荧光寿命可以通过拟合荧光衰减曲线获得,如图 4(b)所示。由图 4(a)可以看出,钠 D_2 线荧光信号随时间延长呈现为指数衰减的趋势。为减小拟合误差,先对荧光信号强度取对数,然后再进行线性拟合,去掉抽运光持续作用下的数据点以及末端线性度较差的数据点,对中间段的线性点进行拟合,获得荧光寿命为 $(18.6 \pm 0.4)\text{ ns}$ 。

通过图 4(b)可以发现,随着缓冲气体乙烷的引入,其与钠原子形成的激发态准分子解离后的钠 D_2 线的荧光寿命大于其自然寿命 (16.254 ns) ^[21],这一实验现象可以用辐射捕获效应进行解释。需要注意的是,不是直接采用钠 D_1 线或钠 D_2 线共振波长激发钠原子,而是先激发准分子,然后利用准分子的解离来获得激发态钠原子。因此,准分子的作用机理是不能忽略的。将钠池的工作温度升高,分别测量抽运波长为 553 nm 激光激发下的钠 D_1 线和钠 D_2 线的荧光寿命。由图 5 可以看出:在相同的条件下,钠 D_1 线与钠 D_2 线的荧光寿命非常接近;随着钠池的工作温度升高,测得的荧光寿命逐渐延长;在 $250\sim 290\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内,随着温度升高,钠双线的荧光寿命以单调函数形式增加。在高温下,钠原子数量增多,其与乙烷分子的碰撞更加剧烈,形成的准分子数量也会增加,不仅激发态的钠原子数量增多,而且基态的钠原子数量也有所增加,这就导致激发态钠原子辐射出的光子被俘获的概率增大,故而测得的荧光寿命也会延长。将工作温度提高

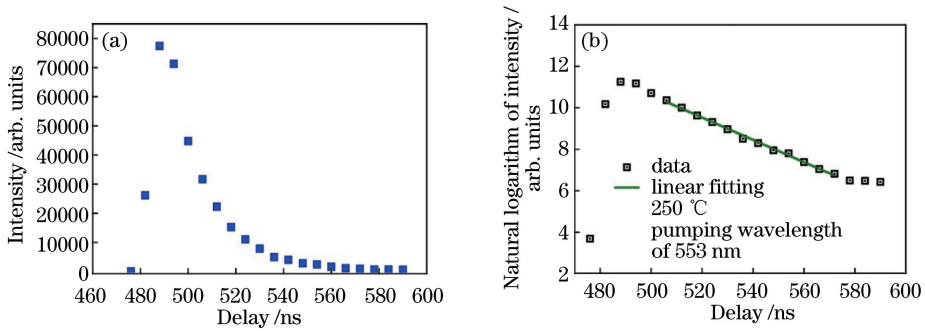


图 4 钠乙烷准分子体系钠 D₂ 线的时间分辨荧光光谱。(a) 荧光衰减曲线; (b) 线性拟合曲线

Fig. 4 Time-resolved fluorescence spectra of sodium-ethane excimer pairs sodium D₂ line.

(a) Fluorescence decay curve; (b) linear fitting curve

到 300 °C, 钠原子数量提高到 $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 比 250 °C 下的钠原子数量提高了约一个数量级, 钠 D₂ 线的荧光寿命由 18.6 ns 增加到 33.3 ns。继续提高钠池的工作温度至 340 °C, 测得钠 D₂ 线的荧光寿命为 34.4 ns, 该温度下的钠原子数量为 $9.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 形成的准分子更多, 但荧光寿命增加得并不明显(相对于 300 °C), 这是因为 340 °C 下的辐射捕获效应已趋于饱和。随着工作温度不断升高, 共振激发碱金属蒸气产生的辐射捕获效应会达到饱和, 荧光寿命会出现拐点^[22], 这源于高温下淬灭现象与辐射捕获效应的共同作用^[17]。

XPAL 可以实现对抽运光的宽带吸收, 因此有必要采用不同抽运波长的激光激发钠乙烷准分子, 通过测量钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命研究准分子对荧光寿命的影响。图 6 给出的是 250 °C 下分别由 547, 553, 563 nm 波长激光激发出的钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命。由图 6 可以看出: 随着抽运波长增加, 钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命均逐渐增加; 在 547 nm 波长激光的激发下, 钠 D₂ 线的荧光寿命为 16.7 ns, 非常接近 D₂ 线的自然寿命(16.254 ns); 将激发波长调谐到 563 nm 后, 钠 D₂ 线的荧光寿命为 20.3 ns。基于图 1 所示的 XPNaL 工作机理进行分析, 抽运光子能量无法将 $X^2\Sigma_{1/2}^+$ 态准分子全部激发到 $B^2\Sigma_{1/2}^+$ 态, 抽运单光子的能量越低, 准分子可能被激发到势能稍低的 $A^2\Pi_{3/2}$ 态的数量就越多, 而 $A^2\Pi_{3/2}$ 态是束缚态, 其解离到 $3^2P_{3/2}$ 态的时间远长于 $B^2\Sigma_{1/2}^+$ 解离到 $3^2P_{3/2}$ 态的时间, $3^2P_{3/2}$ 态的钠原子将得到补充, 因此就会表现出钠 D₂ 线荧光寿命随抽运波长的变化。

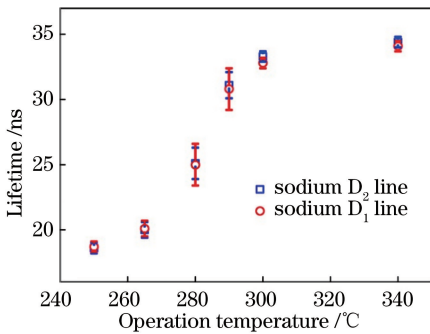


图 5 不同温度下由 553 nm 激光激发出的钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命

Fig. 5 Fluorescence lifetimes of sodium D₁ line and sodium D₂ line excited by laser with wavelength of 553 nm at different operation temperatures

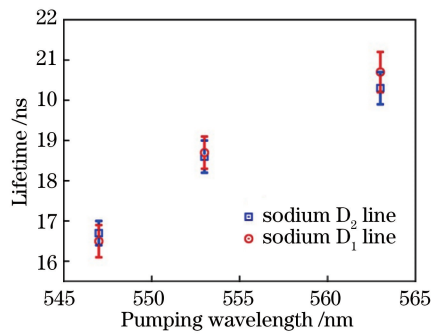


图 6 250 °C 下由不同波长激光激发出的钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命

Fig. 6 Fluorescence lifetimes of sodium D₁ line and sodium D₂ line excited by laser with different wavelengths at 250 °C

将光纤探头置于钠池端面窗口的一侧, 在 300 °C 下探测到的钠双线的 ASE 信号如图 7(a) 所示。可以看出, 图 7(a) 中钠 D₂ 线的线宽明显比图 3 中钠 D₂ 线的线宽窄, 说明 300 °C 下探测到的信号为钠 D₂ 线的 ASE 信号。碱金属原子能级的自然寿命普遍较短, 如果采用脉宽较短的脉冲激光抽运碱金属原子, 将存在抽运时间短、激光上能级粒子数积累时间不足以及粒子数反转困难等问题, 而辐射捕获效应却使光子被反复吸收, 再次在激光上能级进行粒子积累, 有利于粒子数反转。

将图 7(a)中 589.6 nm 波长附近的信号放大后可发现非常微弱的钠 D₁ 线的 ASE 信号,如图 7(a)中的小图所示。钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光信号强度基本一致,但钠乙烷准分子体系钠 D₂ 线 ASE 信号的强度明显高于钠 D₁ 线 ASE 信号的强度,在 300 °C 下,前者约为后者的 140 倍。钠乙烷准分子激发态 B²Σ_{1/2}⁺ 态和 A²Π_{3/2} 态解离后直接产生 3²P_{3/2} 钠原子,在信号沿抽运光方向放大的过程中,3²P_{3/2} 态的粒子快速积累,短时间内形成了粒子数反转;同时,由于 3²P_{3/2} 态与 3²P_{1/2} 态之间的能级间隔较小,存在弛豫过程,因此 3²P_{1/2} 态也实现了粒子数反转。钠 D₂ 线在与钠 D₁ 线的竞争中更具有优势,粒子主要积累到 3²P_{3/2} 态,并且大部分直接由 D₂ 线通道辐射回到基态 3²S_{1/2},使钠 D₂ 线的放大程度更为明显,钠 D₁ 线通道受到一定抑制。

将钠池工作温度升高到 340 °C,在相同的抽运能量下获得的 ASE 信号如图 7(b)所示。由图 7(b)可以看出,钠 D₂ 线的信号进一步放大(与 300 °C 相比),而钠 D₁ 线信号依然不明显。340 °C 下钠 D₂ 线和钠 D₁ 线的 ASE 信号强度分别为 300 °C 下的 7.5 倍和 5.9 倍,钠 D₂ 线的 ASE 信号放大得更明显,这也进一步说明了粒子主要积累到 3²P_{3/2} 态,并且大部分直接由 D₂ 线通道辐射回到基态 3²S_{1/2}。

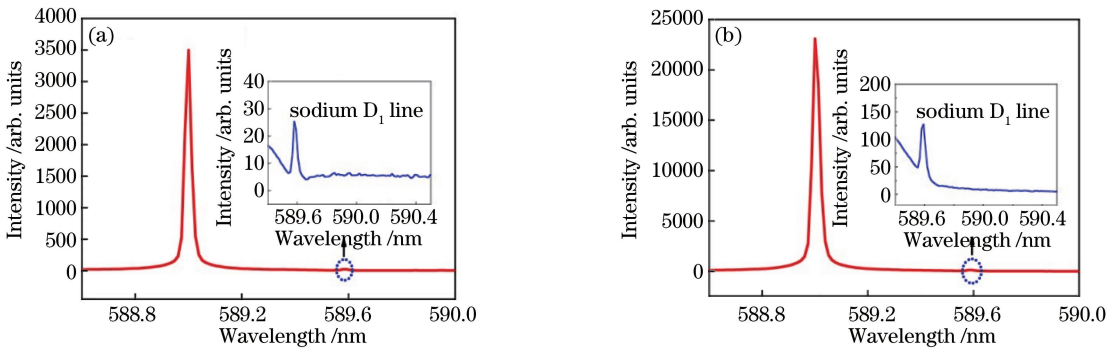


图 7 不同温度下测得的钠乙烷准分子体系钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的 ASE 信号。(a) 300 °C ;(b) 340 °C

Fig. 7 Measured ASE signals of sodium-ethane excimer pairs sodium D₁ line and sodium D₂ line at different temperatures. (a) 300 °C ; (b) 340 °C

对于三能级激光体系或者激光下能级为基态的激光体系来说,由于基态的粒子数始终存在,因而出光阈值较高,实现粒子数反转较为困难。对于 XPAL 来说,除激光下能级为基态外,激光上能级 3²P_{3/2} 态也主要由激发态准分子的解离产生。而准分子的形成则由钠原子与缓冲气体的碰撞几率决定,准分子由基态到激发态也存在着概率,这些因素都会导致 XPAL 粒子数反转更加困难。钠乙烷准分子体系由于激光上能级的荧光寿命较长,可以使激光上能级的粒子数积累时间变长。随着温度升高,钠 D₂ 线 ASE 信号强度增加得更快,这更有利于粒子数集中在 3²P_{3/2} 能级,实现 589.16 nm 激光输出。

4 结 论

在 553 nm 波长激光激发下,通过实验测得钠乙烷准分子体系钠 D₁ 线和钠 D₂ 线的荧光寿命延长,这源于辐射捕获效应。随着工作温度升高,钠双线的荧光寿命逐渐增加,但是随着辐射捕获效应趋于饱和,荧光寿命的延长趋缓。针对 XPAL 可实现宽带抽运的特性,利用蓝翼伴峰内不同波长的激光激发钠乙烷准分子体系,结果发现激发波长越长,钠双线的荧光寿命延长的幅度越大。分析认为,在辐射捕获效应作用的同时,随着抽运单光子能量降低,准分子可能被激发到势能稍低的 A²Π_{3/2} 态的数量增多,使激发态钠原子在较长时间内得到补充,这也会使得荧光寿命延长。与钠 D₁ 线相比,钠乙烷准分子体系钠 D₂ 线 ASE 信号的可放大性更好,粒子主要积累到 3²P_{3/2} 态,且大部分直接由 D₂ 线通道辐射回基态 3²S_{1/2},钠 D₁ 线通道受到了一定抑制。D₂ 线良好的可放大性与较长的激光上能级荧光寿命都有利于钠 D₂ 线激光的实现。

参 考 文 献

- [1] Krupke W F. Diode pumped alkali lasers (DPALs)—a review(rev1)[J]. Progress in Quantum Electronics, 2012, 36 (1): 4-28.
- [2] 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): 95-98.
- [3] Hostutler D A, Klennert W L. Power enhancement of a rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier [J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 8050-8053.
- [4] Wang Y, Kasamatsu T, Zheng Y J, *et al.* Cesium vapor laser pumped by a volume-Bragg-grating coupled quasi-continuous-wave laser-diode array[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(14): 141112.
- [5] 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.
- [6] 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 2.8 W 线偏振铷激光[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102009.
- [7] Chen Fei, Gao Fei, Xu Yan, *et al.* Diode-pumped cesium vapor laser with high efficiency output[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0102011.
陈飞, 高飞, 徐艳, 等. 激光二极管抽运铯蒸气激光实现高效率瓦级输出[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102011.
- [8] Tan Yannan, Li Yimin, Liu Tong, *et al.* 16.8 W diode pumped rubidium vapor laser with Brewster angle structure[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0302004.
谭彦楠, 李义民, 刘通, 等. 布儒斯特角结构 16.8 W 半导体抽运铷蒸气激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0302004.
- [9] Readle J D, Wagner J T, Verdeyen J T, *et al.* Lasing in Cs at 894.3 nm pumped by the dissociation of CsAr excimers [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(25): 1466-1467.
- [10] Readle J D, Verdeyen J T, 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]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3638-3640.
- [11] Readle J D, Eden J G, Verdeyen J T, *et al.* Four level, atomic Cs laser at 852.1 nm with a quantum efficiency above 98%: observation of three body photoassociation[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(2): 021104.
- [12] Readle J D. Atomic alkali lasers pumped by the dissociation of photoexcited alkali-rare gas collision pairs [D]. Urbana, Illinois: The University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010: 56-58.
- [13] Hewitt J D, Eden J G. Lasing on the D lines of sodium pumped by free→free transitions of Na-Xe collision pairs[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 241109.
- [14] Yue Desheng, Li Lihang, Li Wenyu, *et al.* Lasing in Rb pumped by dissociation of Rb-Ar excimers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(1): 1-2.
岳德胜, 李礼航, 李文煜, 等. 准分子宽带泵浦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.
- [15] Huang W, Tan R, Li Z, *et al.* Theoretical model and simulations for a cw exciplex pumped alkali laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31698-31715.
- [16] Garver W P, Pierce M R, Leventhal J J. Measurement of atomic densities using radiation trapping[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1982, 77(3): 1201-1205.
- [17] Zamoski N D, Rudolph W, Hager G D. A study of collisional quenching and radiation-trapping kinetics for Rb(5p) in the presence of methane and ethane using time-resolved fluorescence[J]. *Journal of Physics B*, 2009, 42(24): 245401.
- [18] Davila R C, Perram G P. Spin-orbit relaxation of cesium 7²D in mixtures of helium and argon[J]. *Physical Review A*, 2016, 93: 033418.
- [19] Molisch A F, Oehry B P, Schupita W, *et al.* Radiation trapping in atomic vapours in finite-cylinder vapour cells excited by a laser beam[J]. *Journal of Physics B*, 1997, 30(8): 1879-1891.
- [20] Lu Yanhua, Huang Yuanfang, Zhang Lei, *et al.* Research progress of sodium guide star lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 071406.
鲁燕华, 黄园芳, 张雷, 等. 钠导星激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 071406.
- [21] Volz U, Majerus M, Liebel H, *et al.* Precision lifetime measurements on NaI 3p²P_{1/2} and 3p²P_{3/2} by beam-gas-laser spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(16): 2862-2865.
- [22] Kopystynska A, Kowalczyk P. Time dependences in energy transfer process induced by collision between two 3P-excited sodium atoms[J]. *Optics Communications*, 1978, 25(3): 351-354.