

# 相对论电子束激励的宽带 Rb<sub>2</sub> 准分子发射 及其增益观测\*

邢 达 谭石慈

植田宪一

(华南师范大学激光生命科学研究所以 广州 510631) (电气通信大学激光科学研究中心 日本东京 182)

**提要** 由相对论电子束激发稀有气体和碱金属 Rb 的混合蒸气, 观察到来自 Rb<sub>2</sub> ( $2^3\Pi_g \rightarrow 1^3\Sigma_u^+$ ) 准分子的橙红色发射带。实验研究了橙红带随温度和抽运功率的依赖特性。当抽运强度超过 10 mJ/cm<sup>3</sup> 时, 观测到自发辐射放大(ASE) 现象和一个最大值为 3.5% cm<sup>-1</sup> 的有效增益系数(603 nm 处)。

**关键词** Rb<sub>2</sub> 准分子, 橙红色发射带, 电子束激励

## 1 引 言

对光学抽运的双原子分子激光已研究得相当广泛, 其中碱金属二聚物分子受到特殊的青睐, 因为其分子结构简单, 稳定, 容易产生以及有较大的受激发射截面。碱金属二聚物的三重态跃迁是一个典型的准分子跃迁体系, 曾被预言是一种相当可能产生宽带可调谐的、高效率和高功率激光的介质<sup>[1]</sup>。光学抽运的碱金属准分子的扩散带(diffuse band) 跃迁已经较仔细研究过<sup>[2,3]</sup>。作为实用型激光器发展的一个重要步骤, 文献[4~6] 报道了采用相对论电子束抽运稀有气体与碱金属混合蒸气, 成功地观测到了多种碱金属准分子的扩散带跃迁。对于实用性激光器件, 要求有一个较高的抽运速率或上能级反转粒子数密度及足够的激活体积。高能电子束抽运恰能解决这两个难题<sup>[7]</sup>。最近作者又报道了电子束抽运的 K<sub>2</sub> 黄带准分子跃迁增益的观测结果<sup>[8]</sup>。本文作为发展这种碱金属体系准分子激光器的进一步工作, 报道由相对论电子束激励的 Rb<sub>2</sub> ( $2^3\Pi_g \rightarrow 1^3\Sigma_u^+$ ) 橙红带准分子跃迁增益的实验观察。

## 2 实验装置

本研究中使用的实验装置类似于文献[7] 中所描述的。电子束激发的金属蒸气热池的剖面结构如图 1 所示。电子束激发区由长 20 cm, 直径为 5 cm 的半圆柱体组成, 两个带水冷体的端管将抽运区与光学窗隔离。半圆柱体焊接在一个带有矩形窗口的法兰盘上, 通过此矩形窗口可将电子束耦合进激活区。矩形窗口由一个厚 30 μm 的 Inconel 合金膜所密封, 此膜可以在 600°C 以下承受 3 atm 以上的压力, 并且可以允许电子束穿过。为了解决热池的密封问题, 我们

\* 国家杰出青年科学基金(69725009)、国家自然科学基金(69678030) 资助项目。

在不锈钢的端面法兰和端盖法兰上设计了相同尺寸的三角形刀刃, 由一对刀刃加以铜密封圈可以将 Inconel 合金膜很好地密封在热池的电子束入射窗上。由于腔内压力远大于腔外, 密封膜外需要有支撑物, 考虑到尽量不影响电子的通过, 实验装置采用 Hibachi-like 的支撑结构。两个 MgF<sub>2</sub> 光学窗片与光轴成 Brostow 角将两个输出窗密封。一个不锈钢芯网放入热池内用于碱金属蒸气的循环(类似热管炉的情况)。为了防止碱金属蒸气的凝结以及稳定工作状态, 在半圆柱体下部单独设计了一个碱金属储存库, 半圆柱体的激活区部分一般保持比库区的温度高 30℃ 左右。这一点对控制激活区内碱金属蒸气密度的均匀性以及抑制多聚物的产生是非常重要的。

使用半圆筒形的加热体可用来加热热池, 但实验中我们发现了一种更简单有效的利用辐射加热的方法。将三根 20 cm 长的卤素石英加热灯, 分别固定在半圆柱形热池的上、下和侧面, 每只灯功率为 500 W 并带有镀金的抛物面反射镜。使用这种方法可以很简单地把热池温度控制在 400~ 500℃ 之间。温度测量表明在中心区域 16 cm 长的范围内, 温差只有 3℃。

实验中使用脉冲电子束装置作为激发源, 所提供的束流参数是峰值电流为 12 kA, 束尺寸为 12.0 cm × 2.2 cm, 脉冲宽度(FWHM)为 50 ns, 电子能量为 300 keV。此电子束流被轴向外加均匀磁场(0.07 T)约束, 穿过阳极膜以及一个厚为 2 cm 的真空隔层, 再通过 Hibachi-like 结构窗以及 Inconel 合金膜, 射入保持均匀碱金属蒸气的热池。来自热池激活区的发射光由前向收集, 通过 15 m 长的光纤后进入 0.3 m 焦长的光学多道光谱分析仪(Princeton Instruments, Inc.)。当使用 1200 line/mm 光栅时, 此系统的光谱分辨能力是每道为 0.12 nm。在大部分实验中, 加在探测器上的取样门脉冲宽度为 500 ns。

在实验前, 热池经过严格的烘烤和真空除气 48 h, 经抽真空到 10<sup>-6</sup>, 充入 He 或 Ar, 以及 Ar/He 混合气体。Rb 的蒸气压被控制在 0.15~ 3.0 kPa 之间。碱金属蒸气的密度根据蒸气压曲线和实测温度通过计算得出<sup>[6]</sup>。

### 3 实验结果和讨论

图 2 中 a 线给出了电子束激励的 Ar/Rb 混合蒸气中观察到的 570~ 630 nm 之间的自发荧光发射光谱。Ar 气体压力为 30 kPa, 热池温度为 360℃, 此温度对应一个 1.5 kPa 的 Rb 饱和蒸气压。在 580~ 610 nm 之间, 观察到了一个宽带的连续发射, 此发射峰已在较早的实验中被标定为 Rb<sub>2</sub> (2<sup>3</sup>Π<sub>g</sub> → 1<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) 准分子的发射<sup>[2,6]</sup>。光谱展现三个相叠的发射峰, 发射集中在 597~ 607 nm 之间, 其总宽达到 10 nm, 峰值位置与光学激发实验<sup>[2]</sup>中观察到的光谱位置基本相同。在较高的温度范围内, 光谱上出现一些凹陷, 这是由于 Rb 蒸气自吸收的缘故。实验中也观察到一些 Rb 原子以及离子的强辐射线。这些辐射线在较低的 Rb 蒸气压时其强度远大于 Rb<sub>2</sub> 发射带。但随着 Rb 蒸气压的增加, Rb<sub>2</sub> 准分子发射强度增加迅速, Rb 原子谱线强度下降而线宽增加。实验中观察了发射带对热池温度以及缓冲气体种类的趋势性。实验结果表明, 光谱的

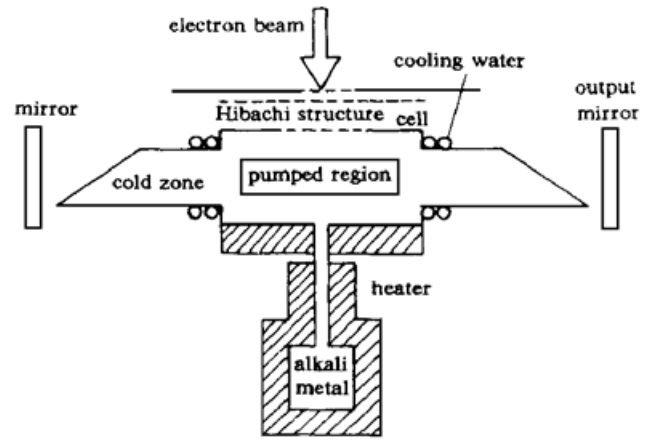


图 1 电子束激发的金属蒸气热池的剖面结构图  
Fig.1 Simplified cross-sectional view of the hot vapor cell coupled to the electron beam machine

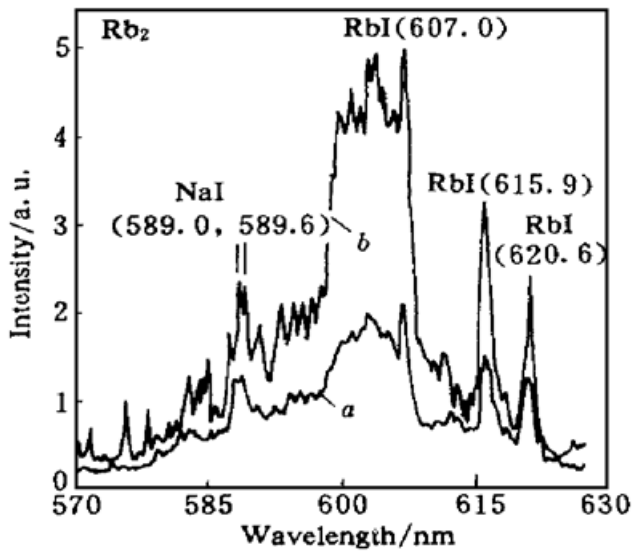


图2 曲线 *a* 为电子束激励的 Ar/Rb 混合蒸气中观察到的 Rb<sub>2</sub> 橙红带准分子荧光发射光谱。Ar 气体压力为 30 kPa, 热池温度为 360°C。曲线 *b* 为 Rb<sub>2</sub> 橙红带准分子的 ASE 发射光谱

Fig. 2 (a) The emission spectrum of Rb<sub>2</sub> orange band excimer from the electron-beam-excited Rb/Ar mixture. The cell temperature is 360°C and the Ar gas pressure is 30 kPa; (b) The ASE spectrum of the orange band from the electron-beam-excited Rb/Ar vapor mixture

了自发辐射的放大现象。

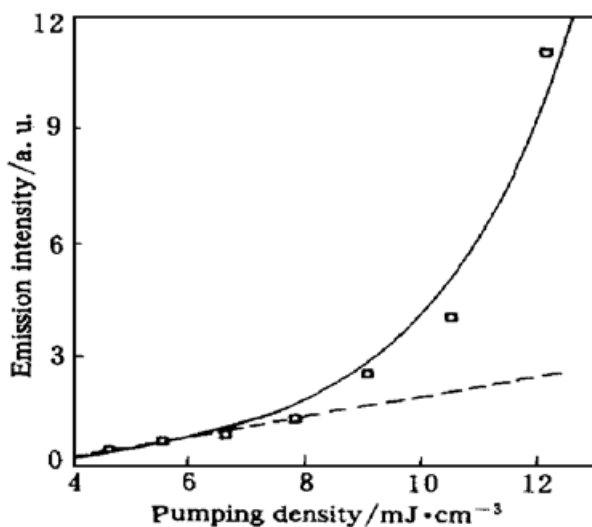


图3 Rb<sub>2</sub> 准分子 603 nm 处发射强度对应抽运功率密度的变化

Fig. 3 Observed pumping power density dependence of the Rb<sub>2</sub> excimer emission

峰值位置和形状不随缓冲气体的种类以及 Rb 蒸气压的变化而有明显的改变。图 2 中曲线 *b* 给出了在实验中观察到的自发辐射放大(ASE)发射光谱。其抽运功率密度为 9 mJ/cm<sup>3</sup>, 其他条件与曲线 *a* 相同。ASE 现象出现在 598~ 607 nm 之间。光谱展示了一个准连续的发射谱带, 这与光学激励下<sup>[2]</sup>所观察到的结果有所不同。

来自 Rb<sub>2</sub> 准分子的发射带也出现在当 Ne 或 He 气体被掺杂作为缓冲气体的情况。但是由于 Ne 惰性气体离子谱线丰富, 光谱变得较为复杂, 在这里暂不给出。另外, 由于 He 气体对电子束的 Stopping Power 较低, 激活区内馈入能量较少, 故发射光谱较弱。

图 3 给出一个在 Ar/Rb 混合蒸气中观察到的 603 nm 发射峰对应抽运功率密度的变化。热池温度为 360°C, Ar 缓冲气体压力为 30 kPa。当抽运功率密度较低时, Rb<sub>2</sub> 准分子的发射强度近似呈线性增加(见图中虚线所示), 此时的发射是典型的自发辐射荧光。当抽运功率密度超过 9 mJ/cm<sup>3</sup> 左右, 橙红带准分子发射强度有一个明显的超线性增加, 同时发射光谱宽度变窄, 出现了

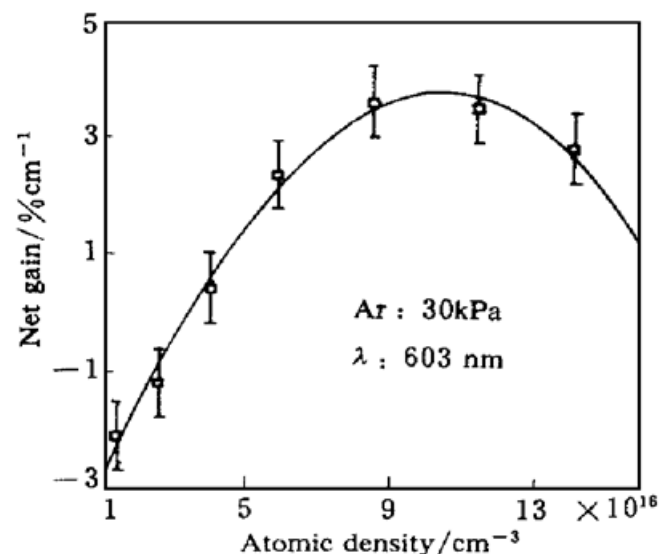


图4 Rb<sub>2</sub> 准分子橙红带有效增益系数对 Rb 蒸气密度的依赖性

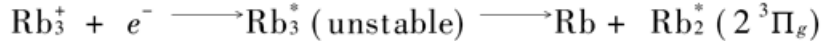
Fig. 4 The Rb atomic density dependence of the effective gain coefficient of Rb<sub>2</sub> excimer band

Ar pressure: 42 kPa

实验中, 通过两种方法测量了橙红带准分子的有效增益。第一种方法是使用一个探测光束沿轴向通过增益区, 直接测量输出光束的光谱强度增加。实验中使用的探测光束是经过严格准直的, 其束径为 5 mm, 发散角为 8 mrad。第二种方法是在实验光路上使用一个准直的后反射镜, 测量在有镜和无镜情况下 603 nm 处光谱输出的强度比。在此情况下, 总净增益可由  $\gamma L = LN[(I_{\text{with}}/I_{\text{without}}) - 1]$  算出。其中  $L$  为有效增益长度。由于在激活区两端存在一定的热对流, 这将引起光学附加损耗, 所以有效增益长度应略小于 12 cm 的抽运区长度。在当前的实验中,  $L$  估算为 10 cm, 这一数值的误差估计在  $\pm 10\%$ 。

实验中两种增益测量方法得到的数值偏差在 10% 之内。图 4 给出的净增益系数值是两种测量方法的平均。其抽运功率密度为  $10.5 \text{ mJ/cm}^3$ 。从图中可见, 当蒸气密度很低时, 分子激发态的产率很低, 其净增益为负, 这表示腔内吸收情况。随 Rb 原子密度的增加, 净增益由负变正, 并在  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  原子密度附近产生一最大值, 此值估算为  $3.5\% \text{ cm}^{-1}$ 。这个数值可以进一步通过增加电子束的抽运能量而增加。

关于高效率的橙红带辐射的产生机制, 被认为是经由高密度 Rb<sub>3</sub><sup>+</sup> 的选择性解离产生 Rb<sub>2</sub> 准分子的激发态<sup>[5,6]</sup>。首先, 在电子束激发条件下, Rb<sup>+</sup> 和 Rb<sub>2</sub><sup>+</sup> 可以直接由电子碰撞激发和潘宁电离产生。尽管 Rb<sup>+</sup> 和 Rb<sub>2</sub><sup>+</sup> 是最初的电离产物, 但最终电离气体中密度最大的离子却是 Rb<sub>3</sub><sup>+</sup><sup>[7]</sup>。这是由于 Rb<sub>3</sub><sup>+</sup> 离子与其他离子相比具有更低的电离能以及更稳定的基态。理论计算结果表明, 在较弱电离的碱金属蒸气中,  $\text{Rb}^+/\text{Rb}_2^+/\text{Rb}_3^+ = 1/1/99$ <sup>[6]</sup>。最后, Rb<sub>3</sub><sup>+</sup> 通过选择性复合解离机制形成跃迁的上能级布居, 即



这一复合解离过程的能量差在 Na 和 K 系统中分别为 0.03 eV 和 0.28 eV, 对 Rb 系统尚无确切数据。但根据实验结果, 可以推测此过程具有较大的反应截面。有趣的是, 在无选择性的多个电离过程中吸收的能量通过一个选择性的单一过程形成上能级布居, 这样的体系将是可能产生高效率激光跃迁的体系。由此也可以预测碱金属准分子  $2^3\Pi_g \rightarrow 1^3\Sigma_u^+$  跃迁将非常适合用电子束或快放电激励。

## 参 考 文 献

- 1 J. P. Woerdman. Laser-excited broadband violet emission from sodium molecules. *Opt. Commun.*, 1978, **26**(22): 216~ 219
- 2 W. T. Luh, J. T. Bahns, A. M. Lyyra *et al.*. Direct excitation studies of the diffuse bands of alkali metal dimers. *J. Chem. Phys.*, 1988, **88**(4): 2235~ 2241
- 3 Q. Wang, Z. W. Lu, Z. G. Ma. Laser oscillation of the lowest triplet-triplet transition in Na<sub>2</sub>. *Science in China E*, 1996, **39**(6): 591~ 598
- 4 D. Xing, K. Ueda, Q. Zhang *et al.*. Na<sub>2</sub>c  $^3\Sigma_g^+ \rightarrow a^3\Sigma_u^+$  bound-free emission by electron-beam excitation. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(5): 917~ 922
- 5 D. Xing, K. Ueda, H. Takuma. K<sub>2</sub> yellow-band and Rb<sub>2</sub> orange-band excimer emissions by electron-beam excitation. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(24): 2960~ 2962
- 6 D. Xing, Q. Wang, S. Tan *et al.*. Triplet-state bound-free transitions of alkali dimers (Na<sub>2</sub>, K<sub>2</sub> and Rb<sub>2</sub>) by electron-beam excitation. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1765~ 1771
- 7 J. T. Bahns, M. Koch, W. C. Stwalley. Laser-induced plasmas in metal vapors. *Laser and Particle Beams*, 1989, **7**(3): 545~ 556
- 8 D. Xing, Q. Wang, S. C. Tan. Amplified spontaneous emission of K<sub>2</sub> yellow band excimer and its gain measurement by e-beam-pumping. *Chinese J. Lasers*, 1998, **B7**(2): 97~ 102

# Rb<sub>2</sub> Orange Band Excimer Emission and Its Gain Observation by Relativistic e-beam Pumping

Xing Da Tan Shici

(*Laser Life Science Institute, South China Normal University, Guangzhou 510631*)

K. Ueda

(*Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Tokyo 182, Japan*)

**Abstract** An amplified spontaneous emission and a maximum net gain coefficient of  $3.5\% \text{ cm}^{-1}$  of the Rb<sub>2</sub> orange band (601~608 nm) were observed from the e-beam-excited mixture of Rb/Rb<sub>2</sub> vapor with argon buffer gas. The dissociative recombination of Rb<sup>+</sup> was discussed as an efficient formation process of the upper state by the electron beam pumping.

**Key words** Rb<sub>2</sub> excimer, orange band, e-beam excitation