

由原子强四波混频光共振激发 Na_2 产生的 紫外受激辐射*

周国运** 秦莉娟 黄小仙 王祖赓

(华东师范大学物理系、中国科学院上海光机所、
华东师范大学量子光学联合开放研究实验室, 上海 200062)

提要 用波长为 578.7 nm 的激光双光子共振激发 Na-Na₂ 混合样品中的钠原子 ($3S \rightarrow 4D$), 在紫外区 320~370 nm 范围内得到了四十多条受激辐射线。标识和分析的结果表明, 钠原子中共振增强的四波混频光作为一个次级激发源将 Na₂ 从基态 $X^1\Sigma_g^+$ 共振激发到 $C^1\Pi_u$ 态, 继而由 $C^1\Pi_u$ 向 $X^1\Sigma_g^+$ 态跃迁产生了上述的紫外受激辐射线。

关键词 Na₂, 四波混频光, 共振激发, 紫外受激辐射

1 引 言

对于 Na₂ 从 $C^1\Pi_u$ 到 $X^1\Sigma_g^+$ 跃迁所产生的 360 nm 附近的紫外辐射, 已有不少作者进行过研究和报道。布居 $C^1\Pi_u$ 态的途径有多种, 例如用 YAG 三倍频激光 (354.7 nm)^[1] 或 N₂ 激光 (337.1 nm)^[2] 单光子共振激发 Na₂ 直接布居 $C^1\Pi_u$ 态; 用波长为 578.7 nm 的激光双光子共振激发原子到 4D 态, 通过碰撞转移布居 $C^1\Pi_u$ 态; 用 589.0, 589.6 nm 的激光激发原子到 3P 态, 通过碰撞转移布居 $A^1\Sigma_g^+$ 或 $b^3\Pi_u$ 态, 然后再吸收一个光子将分子激发到里得堡态, 经碰撞弛豫后布居 $C^1\Pi_u$ 态^[3]; 用波长为 642.5, 642.9 和 643.6 nm 的激光双光子激发分子到里得堡态, 然后通过碰撞布居 $C^1\Pi_u$ 态^[4] 等。

本工作是用波长为 578.7 nm 的激光激发 Na-Na₂ 混合蒸气, 首先由双光子共振激发使 Na 从 3S 跃迁到 4D 态, 通过共振四波混频过程, 产生了波长为 330.2 nm 的强混频光, 该混频光又共振激发 Na₂ 到 $C^1\Pi_u$ 态, 从而发生 $C^1\Pi_u \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ 态的跃迁产生了位于 320~370 nm 范围内的众多紫外受激辐射线。

* 国家自然科学基金资助项目。

** 工作单位: 河南信阳师范学院物理系。

收稿日期: 1993 年 7 月 5 日, 收到修改稿日期: 1993 年 10 月 25 日

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。激发源为法国 Quantel 公司生产的 Datchrom 5000 型 YAG 泵浦的可调谐脉冲染料激光器,其脉冲宽度约 12 ns,重复频率为 10 Hz;干涉滤光片在 540~640 nm 波长范围内的反射率大于 90%,在 322~500 nm 波长范围内的透过率约 85%;0.5 m 光栅单色仪的测量精度为 0.05 nm;光电倍增管为 R106 型,对紫外光有较好的响应;Boxcar 为 EG&G 公司的 4100 型;热管炉的加热区长约 18 cm,内装约 10g 的钠样品。

为了避免泵浦光及 330.2 nm 强混频光的干扰,采用如图 1 所示的后向探测方法。其中滤光片 3 不仅将由透镜 2 会聚的泵浦光反射到热管炉中,而且能滤掉从热管炉散射回来的泵浦光,又能让待测信号透过(为了提高进入热管炉中泵浦光的强度以及尽可能接收到大的信号,应使经滤光片的反射光和入射光夹角尽量的小,实验中两束光的夹角小于 30°)。信号经单色仪后由光电倍增管探测,经 Boxcar 处理后由记录仪记录下有关的发射谱和时间谱。

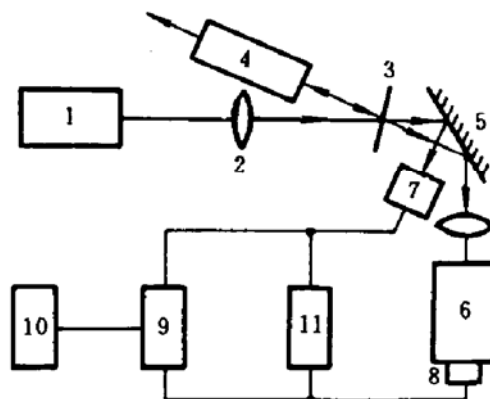


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1—Laser; 2—Lens; 3—Filter; 4—Heat pipe oven; 5—Mirror;
6—Monochromator; 7—Trigger; 8—Photomultiplier;
9—Boxcar; 10—Chart recorder; 11—Oscilloscope

3 结果及分析

在炉温 540°C 、每个激光脉冲约 3 mJ 的实验条件下,用波长为 578.7 nm 的激光双光子激发钠蒸气,钠原子与钠分子的蒸气压分别为 1200 Pa 和 57 Pa。在 320~370nm 范围内得到了 40 多条结构清晰的分子紫外受激辐射线,如图 2 所示。在短波区谱线间隔为 1.73 nm 对应于钠分子基态的较低振动能级间隔。实验测得紫外辐射信号有较好的方向性,且与激光、330.2nm 的混频光的发散角大致相同。

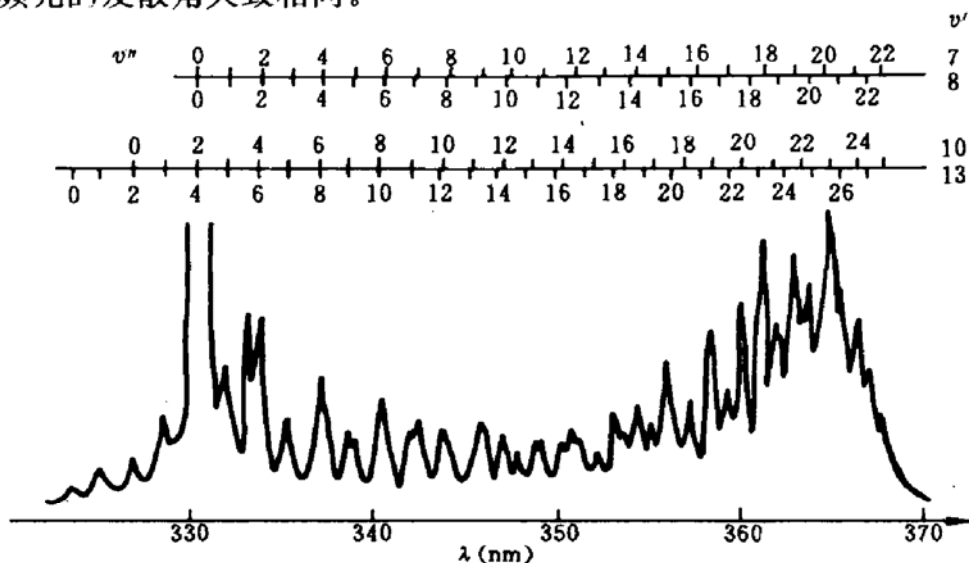


Fig. 2 Lower: UV stimulated emission line; upper: vibrant quantum numbers of relevant molecular transitions. Pump wavelength 578.7 nm; $T = 540^\circ\text{C}$

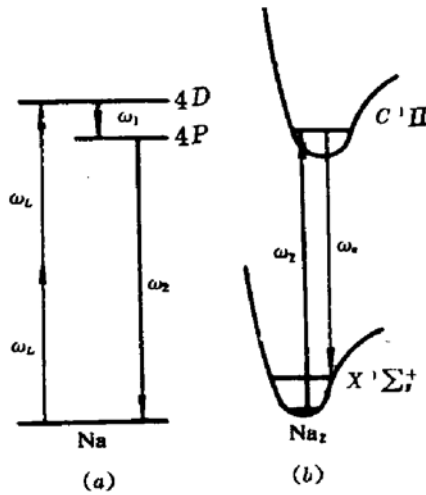
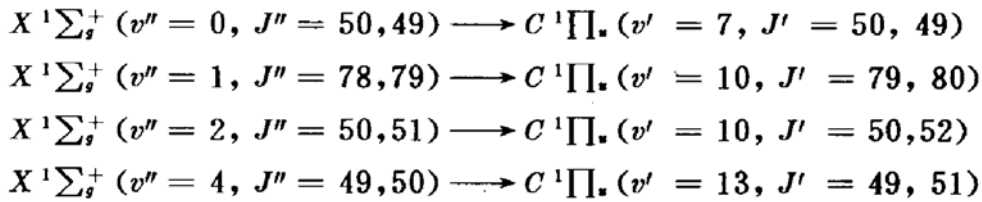


Fig. 3 Relevant energy level diagram generating the UV stimulated emission and mixing wave

众所周知,双光子共振激发钠原子到 4D 态,通过如图 3(a) 所示的四波混频过程,可产生频率为 $\omega_2 = 2\omega_L - \omega_1$ 的强混频光。该混频光有两个波长成份,波数分别为 30266.88 和 30272.51 cm^{-1} ,它们位于 Na_2 的 $C^1\Pi \leftarrow X^1\Sigma_g^+$ 吸收波段范围内。 Na_2 共振吸收了 330.2 nm 的强混频光后布居了 $C^1\Pi$ 态, Na_2 从 $C^1\Pi \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ 态跃迁(如图 3(b) 所示)便产生了如图 2 所示的紫外受激辐射光谱。

我们运用文献所给出的 $X^1\Sigma_g^+$ 和 $C^1\Pi$ 态的分子常数^[5,6],并编制计算程序让计算机筛选出以两个混频光激发 Na_2 发生共振吸收的、且对辐射贡献大的跃迁,它们分别为



这就是说,由两个混频光激发 Na_2 ,使 $C^1\Pi$ 态的 $v' = 7, 10, 13$ 等的有关转动能级获得了布居,对应辐射过程的跃迁为

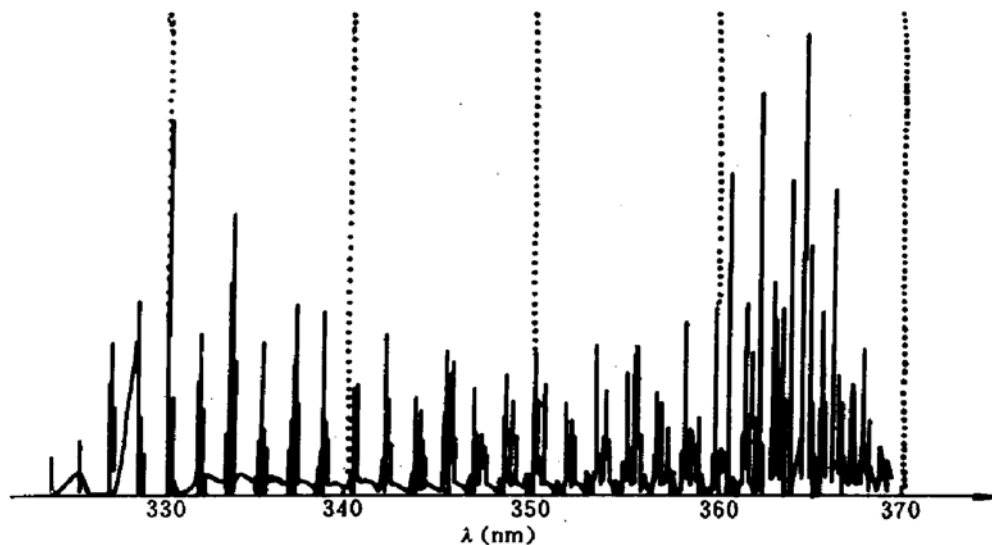
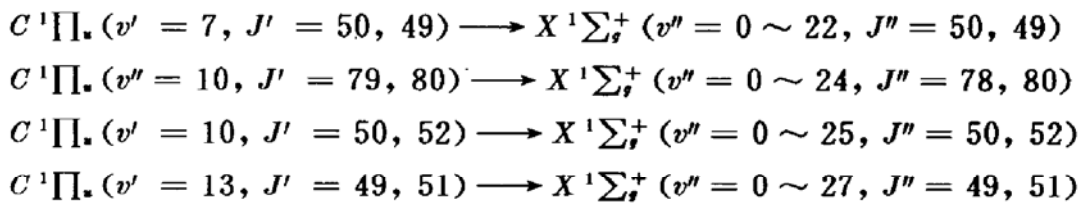


Fig. 4 The UV stimulated emission spectrum from theoretical calculation

这些计算的辐射跃迁波长值很好地与实验所测得的数十条受激辐射波长值相吻合。图 2 的上部示出了计算和对实验辐射线标识的结果(除了 333.17 nm 这条谱线外所有谱线都归为上述

跃迁过程的辐射,对于这条特殊的谱线经分析认为是一条四波混频信号,由 330.2 nm 和受激辐射中的 360.75, 364.07 nm 与钠蒸气非线性相互作用的结果)。由此证实了由钠原子中产生的 330.2 nm 的强四波混频光作为次级激发源使 Na₂ 产生 $C^1\Pi_u \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ 受激辐射的机制。

如果再计及 $C^1\Pi_u \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ 的跃迁偶极矩^[7],则可算得如图 4 所示的包括强度分布的辐射谱,可以看出计算的波长范围及强度分布与实验结果是一致的。

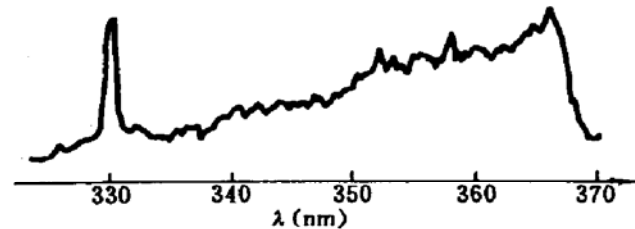


Fig. 5 UV emission spectrum. Pump wavelength: 568.8 nm; $T = 540^\circ\text{C}$

(3S) 碰撞能量转移使 Na 的 3P 态获得布居,再由 568.8 nm 激光的第二步激发而使 Na 的 4D 态得到布居。显然,由这种分子-原子的混合激发过程,不可能产生波长为 330.2 nm 的混频光,也就不可能获得由该混频光为次级激发源所激发的诸多分子受激辐射谱线。图 5 为混合激发时在相同紫外区内所测到的辐射谱,这里已不见清晰的谱线结构,信号强度也约只有图 2 辐射信号的四分之一(位于 330.2 nm 附近的信号为原子 4P → 3S 的荧光辐射)。这是由 Na (4D) - Na₂ ($X^1\Sigma_g^+$) 碰撞能量转移能使 Na₂ 的 $C^1\Pi_u$ 态的众多振转能级得到布居,它们向 $X^1\Sigma_g^+$ 态跃迁可产生在这宽波段范围内的准连续辐射。

图 6 为测得的几种辐射信号的时间谱(即某一波长信号的强度随时间的分布),其中(a), (b) 和 (c) 分别对应激光(578.7 nm), 混频光(330.2 nm)和 578.7 nm 激光激发的信号光(364.3 nm)的时间谱(图中的小峰是由于电缆和光电倍增管阻抗不匹配而产生的信号反射),可以看出,三者的形状基本相同,只是信号光(c)的峰值比激光(a)和混频光(b)的峰值稍微有一点延迟,延迟量分别约为 6 ns 和 1.3 ns;而混合激发所产生的分子信号的时间谱(d)不但形状与前三者不同,而且要比 578.7 nm 激发产生的信号延迟约 13~14 ns,这主要是由混合共振激发中的碰撞过程所引起的。这些都表明,虽然用波长 578.7 nm 和 568.8 nm 的激光激发都使 4D 态获得了布居,但所产生的分子紫外辐射的机制却是不同的。

实验和标识的结果还表明,所测得的分子辐射线是 Q 支,其原因是 Q 支的 Honl-London 因子大,并且受激辐射各支之间有强烈的竞争,所以 Q 支得到了放大,而 P, R 支受到了抑制。

为了与上述这种特殊的激发和辐射机制作对比,实验中还使用了我们早先所提出的混合激发机制^[8]。用波长为 568.8 nm (3P → 4D 的共振波长)的激光激发 Na₂-Na 系统,Na₂ 首先由基态 $X^1\Sigma_g^+$ 被激发到 $A^1\Sigma_g^+$ 态,通过 Na₂ ($A^1\Sigma_g^+$) - Na

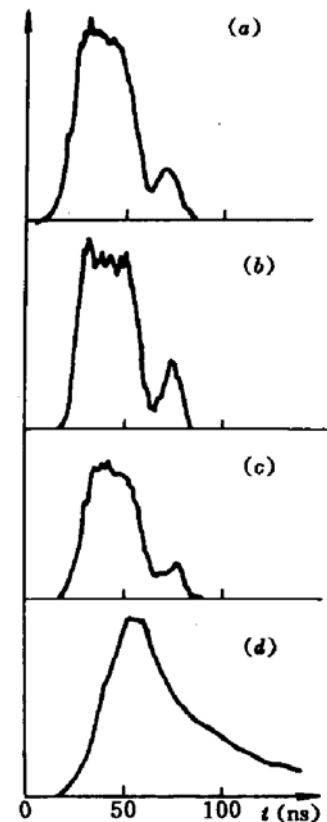


Fig. 6 Time spectra

(a) $\lambda_e = \lambda_L = 578.7 \text{ nm}$; (b) $\lambda_e = 330.2 \text{ nm}$, $\lambda_L = 578.7 \text{ nm}$; (c) $\lambda_e = 364.3 \text{ nm}$, $\lambda_L = 578.7 \text{ nm}$; (d) $\lambda_e = 365 \text{ nm}$, $\lambda_L = 568.8 \text{ nm}$

4 结论

本工作提出并论证了一种新的产生分子受激辐射的机制。在 Na-Na₂ 混合系统中,首先由原子的 3S → 4D 双光子共振激发,产生了波长位于 330.2 nm 的强四波混频光,该混频光又共振激发 Na₂ 到 C¹Π_g 态,从而产生了对应于 C¹Π_g → X¹Σ_g⁺ 态跃迁的数十条紫外受激辐射线。文中对该机制作了分析,并对所得到的受激辐射线作了标识。

参 考 文 献

- 1 Z. G. Wang, Y. C. Wang *et al.*. *Opt. Commun.*, 1984, **48**(6) : 398
- 2 S. Shahdin, M. A. Gondal *et al.*. *Chem. Phys. Lett.*, 1991, **180**(1,2) : 68
- 3 Z. G. Wang, L. S. Ma *et al.*. *Opt. Commun.*, 1986, **58**(5) : 315
- 4 L. S. Ma, Y. L. Pan, L. E. Ding *et al.*. *Chem. Phys. Lett.*, 1991, **187**(1,2) : 116
- 5 P. Kusch, M. M. Hessel. *J. Chem. Phys.*, 1978, **68**(6) : 2591
- 6 G. Y. Yan, B. W. Sherling *et al.*. *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, **B6**(11) : 1975
- 7 J. Schlejen, W. Muller *et al.*. *J. Phys.*, 1987, **B20**(11) : 2691
- 8 Z. G. Wang, L. J. Qin *et al.*. *Opt. Commun.*, 1984, **51**(3) : 155

UV Stimulated Emission Generated by the Resonant Excitation of the Strong FWM Signal in the Atoms

G. Y. Zhou L. J. Qin X. X. Huang Z. G. Wang
(Department of Physics, East China Normal University, Joint Laboratory
for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics
Academia Sinica and East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract Via two-photon resonant excitation of sodium atom (3S → 4D) in Na-Na₂ mixture by the laser at 578.7nm, more than forty stimulated emission lines in the UV 320~370nm region were obtained. Passing labeling and analysing, it has been demonstrated that the UV stimulated emission lines are come from C¹Π_g to X¹Σ_g⁺ in Na₂, which was excited by the FWM wave in Na as the consequent pumping source of the assemble.

Key words Na₂, FWM signal, resonance excitation, UV stimulated emission