

# 钡原子三重态的碰撞诱导受激辐射

霍芸生 丁爱臻 魏运荣 董景星

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

在 XeCl 激光光泵的 Ba 蒸气中,首次观察到波长为 551.9 nm、606.3 nm 及 611.1 nm 的受激辐射,它们分别对应于 Ba 原子的三重态跃迁:  $6s6d\ ^3D_2-6s6p\ ^3P_1$ 、 $5d6p\ ^3P_2-6s5d\ ^3D_3$  及  $5d6p\ ^3P_1-6s5d\ ^3D_2$ 。对于 Ba 原子的自旋禁戒跃迁  $6s7p\ ^1P_1-6s6d\ ^3D_2$  的可能性进行了探讨。

关键词: 钡原子, 碰撞诱导辐射, 自旋禁戒跃迁。

## 一、引 言

碰撞诱导受激辐射是近年来原子物理的一个很活跃的研究领域<sup>[1,2]</sup>,它为研究在光谱展宽的准静态区域光与原子的相互作用、以及原子碰撞物理,提供了有力的手段。

波长为 308 nm 的 XeCl 准分子激光与钡原子的  $6s^2\ ^1S_0-6s7p\ ^1P_1$  跃迁 (307.2 nm) 接近共振,其失谐量  $\Delta p \sim 80\text{ cm}^{-1}$ ,远大于由原子间的碰撞持续时间 ( $\sim 1\text{ ps}$ ) 所决定的碰撞区域的带宽 ( $\sim 10\text{ cm}^{-1}$ )。在我们以前的实验中,以 He 气体缓冲气体,已经观察到 XeCl 激光光泵钡原子的碰撞诱导受激辐射 (SCF)<sup>[3]</sup>。其辐射波长为 472.6、582.6 及 648.3 nm,它们分别对应于 Ba 原子的单态能级  $6s7p\ ^1P_1$ 、 $5p6d\ ^1F_3$  及  $5d6p\ ^1P_1$  到共同的下能级  $6s5d\ ^1D_2$  亚稳能级之间的跃迁,如图 1 所示。

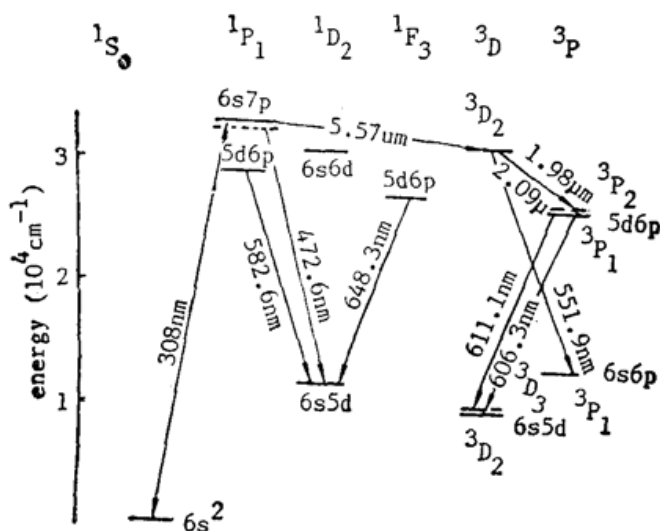


Fig. 1 Partial energy levels of Ba related to the processes of stimulated collision-induced fluorescence

钡原子通过碰撞诱导光泵过程的激发速率随缓冲气体分子密度成比例增大<sup>[1]</sup>, 本文研究了在较高的 He 气压条件下 ( $\sim 1400$  Torr), Ba 原子的碰撞诱导受激辐射。在实验中得到了 Ba 原子的几条新的受激辐射谱线, 其波长在 551.9、606.3 及 611.1 nm 处, 它们分别对应于 Ba 原子的三重态能级之间的跃迁:  $6s6d^3D_2-6s6p^3P_1$ 、 $5d6p^3P_1-6s5d^3D_2$ 、以及  $5d6p^3P_2-6s5d^3D_3$ 。这些受激跃迁可以归因于 Ba 原子的自旋禁戒跃迁  $6s7p^1P_1-6s6d^3D_2$  及其后的串级跃迁。对于 Ba 原子的单态  $6s6p^1P_1$  到三重态  $6s5d^3D_2$  之间的受激跃迁, 近年来已作过很多研究工作<sup>[4~6]</sup>, 但是对于  $6s7p^1P_1$  到  $6s6d^3D_2$  的受激跃迁, 迄今尚未见报道。

## 二、实验装置

实验装置简图示于图 2。实验中所用激光器是本所研制的 SY-200 高重复频率 XeCl 准分子激光器, 其脉冲能量约为 300~400 mJ, 脉宽 35 ns (FWHM), 光束发散角约 4mrad。BS 及 F 均为双色片, 它们对 308 nm 的紫外光有高反射率 ( $>95\%$ ), 而对可见光透射。泵浦激光束经  $f=1$  m 的透镜  $L_1$  聚集于热区长度 1 m 的钡蒸气池中央, 前向  $SCF$  与泵浦光一起从 Ba 蒸气池石英窗口处射出, 经  $f=1$  m 的透镜  $L_2$  准直, 并经过滤光片  $F$  后, 入射到  $WP_1$  一米平面光栅摄谱仪的入射狭缝处。  $WP_1$  的分辨率约为 0.8 nm/mm, 入射的  $SCF$  经光栅色散后成像在摄谱仪的输出窗口处, 用 QD-11 快速强流管分别测量各条谱线强度。后向散射的  $SCF$  经棱镜色散后由光电管  $D_3$  接收。光电管  $D_2$  接收到的泵浦光信号则作为参考信号。

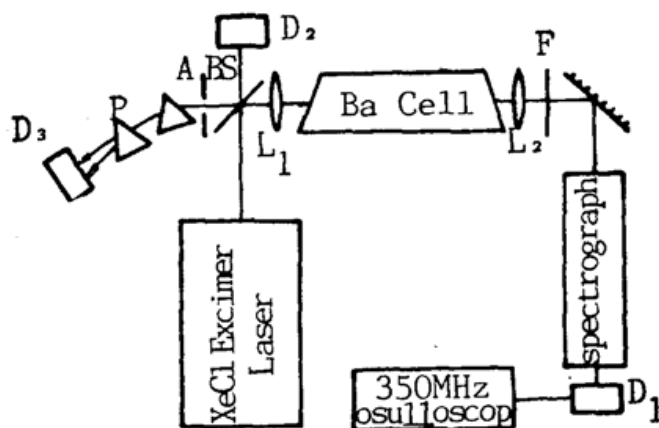


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement

## 三、结果和讨论

### 1. 钡原子三重态碰撞诱导辐射光谱

在缓冲气体 He 的分子数密度为  $6.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 入射的 XeCl 激光脉冲能量为 250 mJ 条件下, 当钡蒸气池加热到  $820^\circ\text{C}$ , 相应的 Ba 原子数密度约为  $5.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时, 从钡池的前后向均可见较强的放大自发辐射。用  $WP_1$  摄谱仪测量前向辐射光谱, 除观察到单态跃迁所产生的 472.6、582.6 及 648.3 nm 辐射外<sup>[3]</sup>, 还观察到与三重态跃迁相对应的波长

为 551.9、606.3 及 611.1 nm 的绿光及红光受激辐射。用摄谱仪所摄得的这三条谱线分别示于图 3(a) 及 (b), 在图 3 中还同时拍摄了 Hg 灯光谱线作为波长标定。在 Ba 原子的这三条谱线处的受激辐射, 尚属首次观察到。其中 551.9 nm 辐射由 Ba 原子的  $6s6d^3D_2-6s6p^3P_1$  跃迁所产生, 而 606.3 及 611.1 nm 辐射则与 Ba 原子的  $5d6p^3P$  到亚稳能级  $6s5d^3D$  跃迁的精细结构相对应<sup>[7]</sup>, 如图 1 所示。

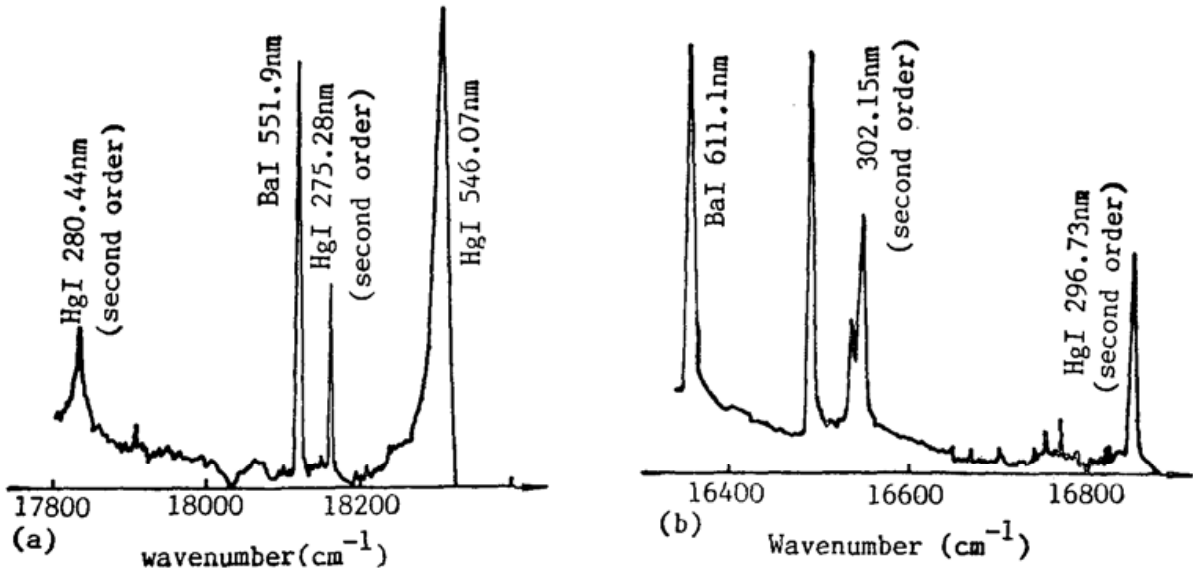


Fig. 3 Microdensitometer traces from spectrograph records, showing barium 551.9 nm (a), 606.3 and 611.1nm (b) spectral lines respectively

## 2. SCF 强度随 He 气压及 Ba 原子数密度的变化

对于 606.3 及 611.1 nm 的总合红光辐射强度随 He 气压变化的测量结果示于图 4。测量中 Ba 蒸气池的温度固定在  $840^{\circ}\text{C}$ , 与此对应的钡原子数密度约为  $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 入射的 XeCl 激光能量为 310 mJ。前向及后向辐射的测量结果均表明辐射强度随缓冲气体 He 气压线性上升。这可归因于在两体碰撞条件下, XeCl 激光通过碰撞诱导过程对  $6s7p^1P_1$  能级的激发速率随缓冲气体粒子数密度成比例增加,  $\gamma_B \propto N_{\text{He}}$ <sup>[4]</sup>。在本文实验的缓冲气体气压变化范围内,  $I_{\text{SCF}} \sim P_{\text{He}}$  尚未出现饱和。

由图 5 所示的实验结果可见, 三重态跃迁的 551.9 nm、611.1 及 606.3 nm 的受激辐射与单态跃迁  $5d6p^1F_3-6s5d^1D_2$  的 648.3 nm 辐射相比, 在较低的 Ba 原子数密度时达到阈值, 并且在 Ba 原子密度  $N_{\text{Ba}}$  约为  $6 \sim 7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时达到峰值。当 Ba 原子密度超过  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 648.3 nm 辐射的强度仍随  $N_{\text{Ba}}$  线性上升, 但是 551.9、606.3 及 611.6 nm 的辐射强度随  $N_{\text{Ba}}$  的进一步增大而下降。本实验中, XeCl 泵浦激光的脉冲能量为 230 mJ, 缓冲气体密度  $N_{\text{He}}$  固定在  $6.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由于三重态跃迁的几种波长的辐射均在大致相同的 Ba 原子数密度处达到峰值, 与此相应地,  $6s6d^3D_2$  能级粒子数亦应在此时达到峰值, 而过高的 Ba 原子密度会导致  $6s6d^3D_2$  粒子数的下降。这可能是由于基态 Ba 原子  $6s^2S_0$  对  $6s6d^3D_2$  能级有较强的碰撞猝灭作用, 但是确切的机理尚有待于进一步研究。

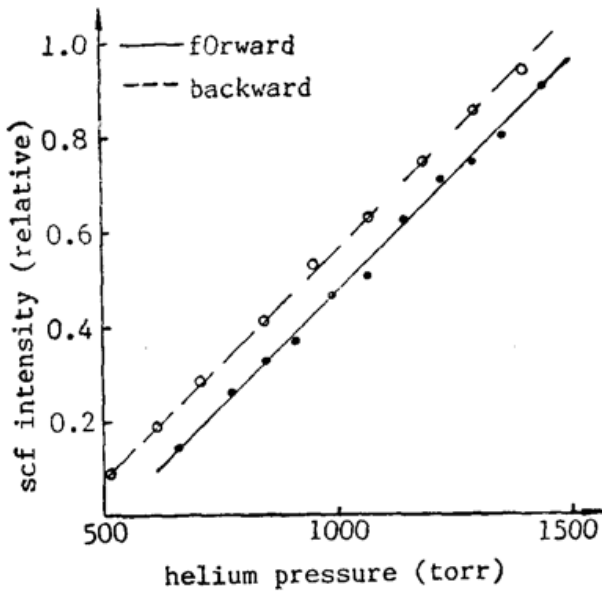


Fig. 4 Variation of SCF intensity at 606.3 and 611.1 nm with helium buffer-gas pressure. The incident XeCl laser energy and barium number density are 310 mJ and  $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  respectively

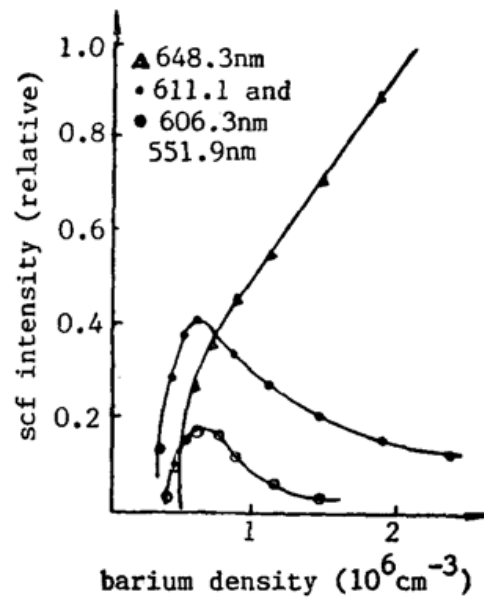


Fig. 5 SCF intensity at 551.9 nm, 648.3 nm, 611.1 and 606.3 nm as a function of barium density. The XeCl laser energy and buffer-gas number density are 230 mJ and  $6.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  respectively

### 3. 611.1 nm 与 606.3 nm SCF 特性比较

波长为 611.1 nm 及 606.3 nm 的辐射对应于电子组态  $5d6p^3P$  到  $6s5d^3D$  跃迁的精细结构。在 Ba 原子数密度为  $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , He 气压为 1370 Torr 条件下, 611.1 nm 及 606.3 nm 辐射强度随泵浦光强度的变化示于图 6。这两条谱线的强度呈现相似的随泵浦光变化的规律。但是与  $5d6p^3P_2-6s5d^3D_3$  跃迁相对应的 611.1 nm 辐射具有较低的阈值,

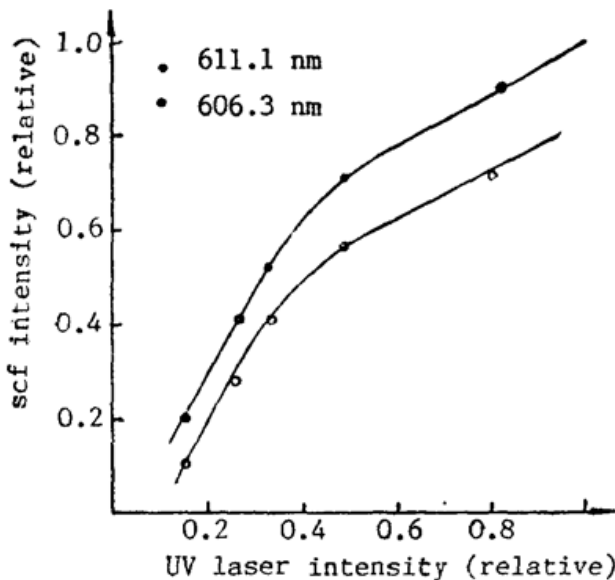


Fig. 6 Variation of SCF intensity at 606.3 nm and 611.1 nm with the incident XeCl laser energy. The barium number density and buffer-gas pressure are  $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and 1370 Torr respectively

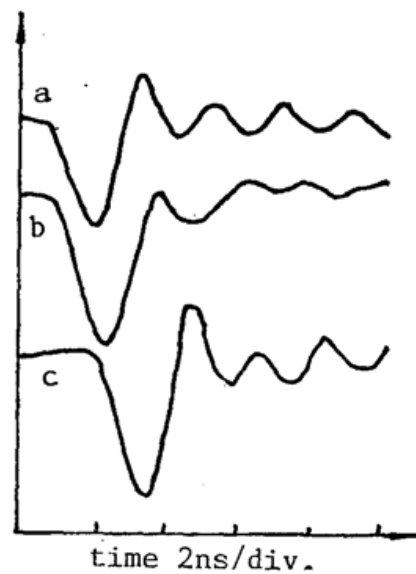


Fig. 7 Simultaneous oscillograms showing pulses of 611.1 nm (a), 606.3 nm (b), and 551.9 nm (c) stimulated emission. The vertical scales are 100, 50, and 10 mV/div. for a, b, and c respectively

而且在相同条件下其强度总是大于  $5d6p^3P_1-6s5d^3D_2$  跃迁的 606.3 nm 辐射。这与  $5d6p^3P_2-6s5d^3D_3$  的自发辐射跃迁几率 ( $5.5 \times 10^7 s^{-1}$ ) 大于  $5d6p^3P_1-6s5d^3D_2$  的跃迁几率 ( $5.1 \times 10^7 s^{-1}$ )<sup>[8]</sup> 相一致。

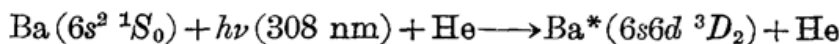
从图 7 所示的 611.1 nm 与 606.3 nm 辐射的脉冲波形图可以看到, 它们都呈脉宽约 3 ns (FWHM) 左右的自终止型脉冲, 这由受激辐射下能级的亚稳态特性所决定。实验中示波器的触发信号由图 2 中所示的  $D_2$  所提供, 因此图 7 还显示了不同谱线辐射之间的相对时间特性。606.3 nm 光脉冲相对于 611.1 nm 辐射之间大约有 1 ns 左右的延迟。在图 7 中还给出了 551.9 nm 的绿光脉冲波形, 其脉宽亦为 3 ns 左右。值得注意的是虽然 551.9 nm 辐射直接由  $6s6d^3D_2-6s6p^3P_1$  的跃迁所产生, 而 606.3 nm 及 611.1 nm 红光辐射上能级粒子数的集聚尚有赖于  $6s6d^3D_2-5d6p^3P_{2,1}$  能级间的跃迁, 但是绿光相对于红光仍有约 2~3 ns 的延迟, 而且绿光的强度总是比红光弱很多, 由此可以推断从  $6s6d^3D_2$  到  $5d6p^3P$  及  $6s6p^3P$  的分支比

$$A(6s6d^3D_2 \rightarrow 5d6p^3P) / A(6s6d^3D_2 \rightarrow 6s6p^3P) > 1$$

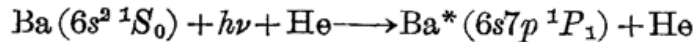
#### 4. $6s6d^3D_2$ 形成机制探讨

如前所述, 551.9 nm 辐射由 Ba 原子的  $6s6d^3D_2-6s6p^3P_1$  跃迁所产生, 而且  $6s6d^3D_2$  到  $5d6p^3P_{2,1}$  的跃迁符合偶极跃迁选择定则, 因此实验中观察到的这几条谱线的辐射起源于由  $6s6d^3D_2$  能级所产生的跃迁。图 4 所示的 606.3 及 611.1 nm 的前向及后向辐射均随缓冲气体气压线性上升, 显示了碰撞诱导受激辐射的特征, 因此  $6s6d^3D_2$  的形成与 Ba 原子对 XeCl 激光的碰撞诱导吸收密切相关。

$6s6d^3D_2$  的能级高度是  $30751 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[7]</sup>, 与 308 nm 的 XeCl 激光 ( $32467 \text{ cm}^{-1}$ ) 的失谐量  $\Delta_D$  约为  $1700 \text{ cm}^{-1}$ , 比  $6s7p^1P_1$  能级与 XeCl 激光的失谐量  $\Delta_P$  ( $80 \text{ cm}^{-1}$ ) 大 20 倍, 且与  $\Delta_D$  对应的能量的失谐已大于实验温度下 ( $\sim 1100 \text{ K}$ ) He 原子的平动能。因此基态 Ba 原子  $6s^2^1S_0$  通过准弹性碰撞



直接产生  $6s6d^3D_2$  能级激发的可能性很小。比较可能的机制是首先通过 Ba 原子对 XeCl 激光的碰撞诱导吸收产生  $6s7p^1P_1$  能级的激发,



而后通过自旋禁戒跃迁产生  $6s6d^3D_2$ 。在此过程中应当产生波长为  $5.57 \mu\text{m}$  的红外辐射, 在 Ba 原子的  $6s6d^3D_2-5d6p^3P_{2,1}$  跃迁中也应有波长  $2 \mu\text{m}$  左右的红外辐射产生。用厚度  $2 \text{ mm}$  的 Si 片代替石英作 Ba 蒸气池的输出窗口, 所测量到的前向红外辐射也随缓冲气体 He 气压的升高而增大。细致的红外波段的光谱研究尚待条件具备时进行。但是在  $6s6d^3D$  能级量子数  $J$  不同的能级中, 实验中仅观察到起始于  $6s6d^3D_2$  的 551.9 nm 辐射。因此若上述机制成立, 则从  $6s7p^1P_1$  到  $6s6d^3D$  的各个  $J$  能级跃迁的分支比应有

$$A(6s7p^1P_1 \rightarrow 6s6d^3D_2) / A(6s7p^1P_1 \rightarrow 6s6d^3D_{1,3}) \gg 1$$

虽然对于 Ba 原子的单态  $6s7p^1P_1$  到三重态  $6s6d^3D_2$  的跃迁尚未见报道。但是近年来对于 Ba 原子中与此相类似的自旋禁戒跃迁  $6s6p^1P_1-6s5d^3D_2$  的  $1.13 \mu\text{m}$  受激辐射已作过大量研究工作<sup>[4~6]</sup>。E. G. Myer 等人给出的结果表明,  $6s6p^1P_1$  到  $6s5d^3D_2$  的跃迁几率比到  $6s5d^3D_1$  的大 2~3 个数量级, 这与所讨论的  $6s7p^1P_1$  到  $6s6d^3D$  跃迁的情况相类似。在放电

自加热型 Ba 蒸气激光器中<sup>[9]</sup>, 随着 Ba 池的逐步加热及 Ba 蒸气压的升高, 单态到三重态跃迁  $6s6p^1P_1-6s5d^3D_2$  产生的  $1.13 \mu\text{m}$  辐射首先达到振荡阈值。但随着 Ba 池温度的进一步提高, 单态之间的跃迁  $6s6p^1P_1-6s5d^1D_2$  的  $1.5 \mu\text{m}$  辐射开始振荡, 并随温度的上升而增强时,  $1.13 \mu\text{m}$  的受激辐射达到峰值, 而后其强度开始下降。这与本文图 5 所示实验结果颇多相似之处。

## 四、结 语

我们在 XeO1 准分子激光近共振光泵 Ba 蒸气中, 首先观察到 Ba 原子三重态跃迁的  $551.9 \text{ nm}$ 、 $606.3 \text{ nm}$  及  $611.1 \text{ nm}$  受激辐射, 它们可归因为起源于 Ba 原子的自旋禁戒跃迁  $6s7p^1P-6s5d^3D_2$  的串级跃迁。本文的实验结果表明, 这两个能级之间的跃迁与已发表的 Ba 原子  $6s7p^1P_1-6s5d^3D_2$  受激跃迁的研究结果有很多相似之处。对于  $6s7p^1P_1-6s6d^3D_2$  的受激跃迁, 特别是红外波段的辐射, 尚有待于深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] J. L. Carlsten *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1977, **15**, No. 3 (Mar), 1029~1045.
- [2] W. J. Alford *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1984, **30**, No. 5 (Nov), 2366~2380.
- [3] 霍芸生等;《光学学报》, 1988, **8**, No. 8 (Aug), 673~678.
- [4] E. G. Myers *et al.*; *Phys. Rev. A*, 1986, **33**, No. 4 (Apr), 2798~2800.
- [5] J. L. Bowen, A. P. Thorne; *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* 1985, **18**, No. 1 (Jan), 35~50.
- [6] L. Jahreiss, M. C. E. Huber; *Phys. Rev. A* 1983, **28**, No. 6 (Dec), 3382~3401.
- [7] C. E. Moore;《Atomic Energy Levels》, 1971, 3, (NSRDS-NBS 35, U. S. Government Printed Office, Washington, D. C.), 131.
- [8] P. Hafner, W. H. E. Schwartz; *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 1978, **11**, No. 17 (Sep), 2975~2999.
- [9] B. G. Bricks *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**, No. 1 (Jan), 38~40.

## Stimulated collision-induced fluorescence of barium triple- $\epsilon$ -states

HUO YUNSHENG, DING AIZHEN, WEI YUNRONG AND DONG JINGXING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 6 April 1990)

### Abstract

The stimulated collision-induced fluorescence (SCF) at wavelengths of 551.9, 606.3, and 611.1 nm was observed from XeCl-laser pumped barium vapor for the first time. They correspond to the following transitions of barium atoms respectively:  $6s6d^3D_2-6s6p^3P_1$ ,  $5d6p^3P_2-6s5d^3D_3$ , and  $5d6p^3P_1-6s5d^3D_2$ . The possibility of existence of the barium spin-forbidden transition  $6s7d^1D-6s6p^3P_2$  was proposed and discussed.

**Key words:** barium atoms = collision-induced fluorescence; spin-forbidden transition.

### LF-11 激光装置通过技术鉴定

1990年7月11~13日,由中国科学院和中国工程物理研究院联合主持,在四川省成都市召开 LF-11 激光装置技术鉴定会。

由中科院上海光机所和中科院核物理与化学研究所共同研制成功的 LF-11 激光装置是继我国中科院上海光机所“神光”装置之后,又一成功运转已逾五年的大功率(输出激光功率  $10^{11}$  W 量级)脉冲激光装置。

LF-11 激光装置虽在总体规模和输出功率上没有“神光”装置大,但就相同口径的规模上相比,其技术难度和某些技术指标都超过“神光”装置及国内其它大功率固体激光装置。

经过五年 5800 余发的实际运行,表明该装置具有先进的综合性能指标、良好的运行可靠性和稳定性,是我国开展强激光技术研究的重要实用设备。

该装置的许多单元器件采用了一系列先进技术,如准连续全主动锁——调 Q 振荡器、多级同步工作的全电型电光开关、多灯均匀泵浦的高增益棒状放大器、全像递空间滤波器系列、高精度恒流充电机、高精度光电自动调焦、高质量非球面打靶透镜和 1/10 波长平面加工工艺、硅光电导开关测量信噪比等等,使该装置的主要技术指标先进,运行稳定可靠,其主要性能指标为:激光波长  $1.06\mu\text{m}$  时,激光能量  $50\text{J}/0.8\text{ns}$ ,脉宽  $0.2\sim 0.8\text{ns}$ ,可聚焦率  $\leq 0.3\text{mrad}$ ,信噪比  $> 10^6$ ,放大自发辐射  $< 0.4\text{mJ}$ ,末级激光角漂移  $\leq \pm 8''$ ,靶室真空度  $10^{-6}\text{Torr}$ ,靶调焦精度  $\leq 10\mu\text{m}$ ,定位精度  $\leq \pm 10\mu\text{m}$ ;激光波长  $0.53\mu\text{m}$  时,激光能量  $20\text{J}/0.9\text{ns}$  ( $\eta_{\text{SHG}} > 50\%$ ),脉宽  $0.2\sim 0.8\text{ns}$ ,可聚焦率  $\sim 0.3\text{mrad}$  (是我国第一套可用实验打靶的高效率倍频系统)。

五年间,利用该装置先后成功地进行了激光惯性约束聚变、X 射线激光和强激光长距离传输中  $\text{N}_2$  的受激转动喇曼散射学实验。有些实验属我国首次,如倍频激光打 Au 平面靶,俄歇效应泵浦  $108.9\text{nm}$  的激光增益实验,利用倍频激光进行类锂铅(或硫)X 光激光的增益实验,以及 SRRS 实验等。

(乙 民供稿)