

# 钠蒸气中基于 Na-Na 碰撞能量转移的光泵级联辐射\*

王 祖 贻

(华东师范大学物理系, 200062)

**提要:** 本文报道了钠蒸气中基于 Na-Na 近共振碰撞能量转移而产生的光泵受激辐射。当双光子共振激发  $4d$  能级时, 可探测到起始于  $4f$  能级的受激辐射; 而当进行  $4f$  能级的偶极禁戒双光子共振激发时, 则可产生起始于  $4f$  能级的受激辐射及其跟随的级联受激辐射。文中对有关过程进行了讨论。

**关键词:** 碰撞能量转移, 双光子共振激发, 受激辐射

## Optically pumped cascade radiation based on Na-Na collision energy transfer in Na vapor

Wang Zugeng

(Department of Physics, East China Normal University, Shanghai)

**Abstract:** Stimulated radiation based on Na-Na near-resonance collision energy transfer has been observed in the sodium vapor. The stimulated emissions from  $4f$  or  $4d$  level of atomic sodium are generated via two-photon resonant excitation of  $4d$  level or dipole-forbidden two-photon resonant excitation of  $4f$  level respectively and the related processes are discussed.

**Key words:** collision energy transfer, two-photon resonant excitation, stimulated radiation

在一些激光过程中, 碰撞能量转移起了重要的作用。众所周知,  $\text{He}^*-\text{Ne}$  碰撞能量转移在  $\text{He}-\text{Ne}$  激光过程中起了关键的作用。对于碱金属蒸气, 通过分子-原子碰撞能量转移过程, 由双光子激发已产生了许多连续或脉冲输出的激光<sup>[1~4]</sup>。由  $\text{K}-\text{Rb}$  碰撞而产生超辐射的研究结果也已有报导<sup>[5, 6]</sup>。

本文报导了通过 Na-Na 碰撞能量转移产生钠受激辐射的研究结果。当钠原子的  $4d$  能级由双光子共振激发而获得布居时, 可探测到对应于  $4f-3d$  跃迁的受激辐射。而当泵浦激光调谐到  $3s-4f$  双光子共振时, 虽然这是一个偶极禁戒双光子跃迁, 但仍然可产生对应于  $4d-4p$  跃迁的受激辐射及随后的串级受激辐射。

### 一、实验装置

本实验中, 用于激发钠蒸气样品的泵浦源是脉冲染料激光器(Lambda Physics FL 2002),

收稿日期: 1989年2月20日。

\* 国家自然科学基金资助课题。

它是由一台 XeCl 准分子激光器(Lambda Physics EMG 105 型)来泵浦的。染料激光器在所使用的 578 nm 区的输出能量约为 10 mJ, 脉冲宽度为 15 ns, 输出谱线宽度约为  $0.1 \text{ cm}^{-1}$ 。

钠蒸气产生于一个装有两个布儒斯特窗的、50 cm 长的热管中。热管加热区长为 22 cm。典型的工作温度约为  $450^\circ\text{C}$ 。按实验需要, 热管中可充以不同气压的缓冲气体氦, 甚至不充缓冲气体。

用一焦距为 50 cm 的透镜将泵浦光束聚焦到热管的中心。输出信号可在热管的前向或后向探测到。经测量, 信号的发散角约为 4 mrad(比该装置中的泵浦光束的发散角略小), 从而可断定测量到的有关辐射属于受激辐射, 而不是由混频过程产生的相干辐射。在前向探测时, 使用适当的滤光片组以滤去剩余的泵浦光束, 再用适当的光纤将辐射信号引入单色仪, 经 PbS 探测器接收和 Box-car 积分器处理后, 由记录器记录或示波器显示。

## 二、结果和讨论

让我们来考察如图 1 所示的钠原子部分能级图。钠原子的 4d 能级和 4f 能级之间的能量差仅为  $40 \text{ cm}^{-1}$ [7], 该值要比  $KT$  小几倍, 这为近共振能量转移提供了一个合适的条件。

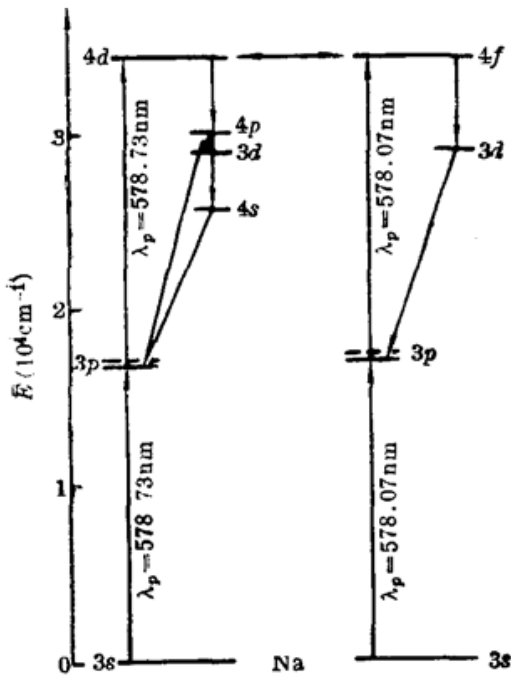


图 1 钠原子的部分能级简图

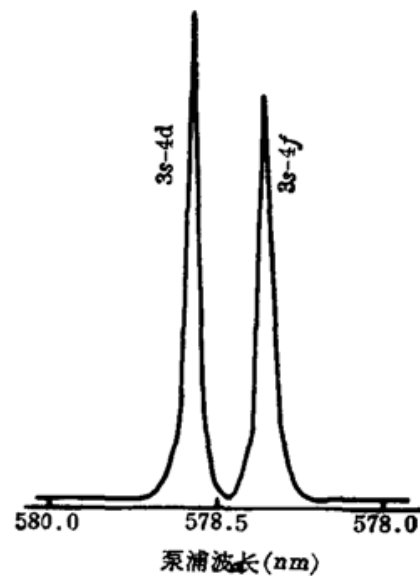


图 2 产生  $1.85 \mu\text{m}$  ( $4f-3d$ ) 受激辐射的激发光谱

当泵浦激光调谐到 578.73 nm, 也即实现 3s-4d 双光子共振激发时, 除了探测到对应于 4d-4p、4p-4s、4s-3p 和 3d-3p 等受激辐射和串级受激辐射信号之外, 对应于 4f-3d 跃迁的、位于  $1.85 \mu\text{m}$  的受激辐射也被测量到。如果调谐泵浦激光到 578.07 nm, 也即偶极禁戒双光子共振激发 4f 能级, 则同样可探测到  $1.85 \mu\text{m}$  信号。图 2 示出在 578 nm 区内产生  $1.85 \mu\text{m}$  受激辐射的激发光谱。可以明显地看到, 当泵浦光调谐到 578.73 nm 和 578.07 nm 时, 出现了两个强度大致相同的峰。而在两峰之间, 并无  $1.85 \mu\text{m}$  信号产生。上述实验事实表明, 通过偶极禁戒双光子共振泵浦, 可使 4f 能级获得相当的布居; 而由 3s-4d 双光子共振泵浦从而使 d 能级获得布居后, 4f 能级也能取得布居。

图 3 为产生对应于 4d-4p 跃迁的、波长为  $2.34 \mu\text{m}$  受激辐射的激发光谱。当然, 在 3s-4d

双光子共振激发的情况下,可以探测到较强的对应于  $4d-4p$  跃迁的受激辐射。但值得注意的是,在  $3s-4f$  偶极禁戒双光子共振激发时,也可测量到对应于  $4d-4p$  跃迁的受激辐射,虽然辐射强度要比  $3s-4d$  共振激发时约弱 50 倍(如图 3 所示)。在上述两峰的中间部位,  $2.34 \mu\text{m}$  受激辐射并不存在。通过  $3s-4f$  共振激发,不但可记录到  $4d-4p$  受激辐射,还可记录到对应于  $4p-4s$ 、 $4s-3p$  和  $3d-3p$  等串级跃迁的受激辐射,如图 4 所示。

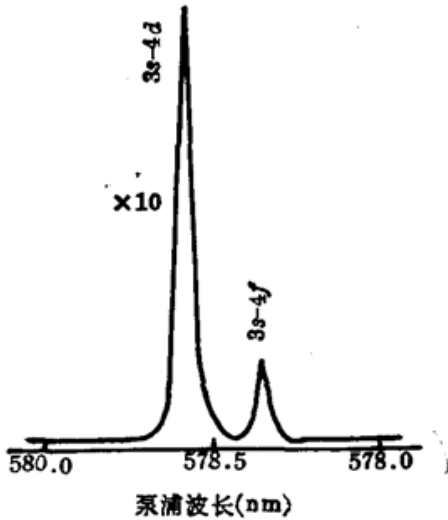


图 3 产生  $2.34 \mu\text{m}$  ( $4d-4p$ ) 受激辐射的激发光谱

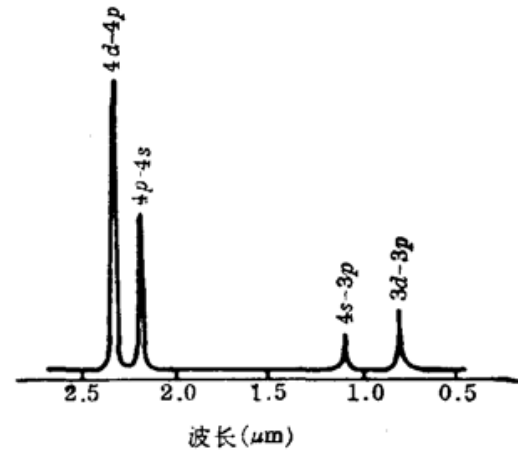
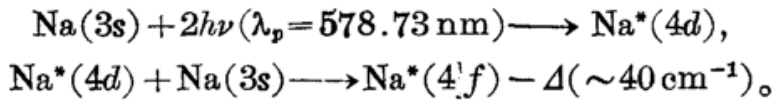
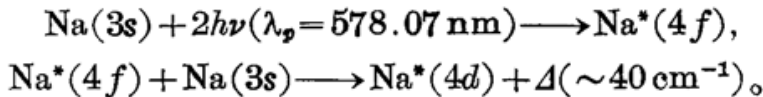


图 4  $3s-4f$  偶极禁戒双光子共振激发时,所记录得的起始于  $4d$  能级的受激辐射及其串级受激辐射

由上述两方面的实验结果,可以认为:双光子共振激发  $4d$  能级时,  $4f$  能级的布居是由近共振碰撞能量转移而获得,即



同样,双光子共振激发  $4f$  能级时,也是由一近共振碰撞能量转移过程而使  $4d$  能级获得布居,即



为了进一步确认这种近共振碰撞能量转移过程,我们将泵浦激光调谐到  $3s-5s$  双光子共振 ( $\lambda_p = 602.23 \text{ nm}$ ),这时并不能探测到  $4d-4p$  和  $4f-3d$  跃迁的信号。另一方面,在实现  $3s-4d$  或  $3s-4f$  双光子共振激发时,对应于诸如  $5p-3d$ 、 $5p-4s$  等跃迁的信号也不能被探测到。这些实验事实充分地证明,除了近共振碰撞转移过程之外,其它的过程(例如能量积聚过程、电离钠原子的再复合过程等)均不能使  $4d$  或  $4f$  能级获得足可以探测到受激辐射信号的布居量。

图 5 是在实验中测得的、在  $3s-4d$  双光子共振时  $1.85 \mu\text{m}$  信号强度与 He 缓冲气压的依赖关系。可见,即使没有缓冲气体,信号依然存在(强度约为最佳缓冲气压时的四分之一)。随着缓冲气压的上升,由于碰撞加剧,信号强度也增强,而后趋向饱和。即使在数百 Torr 的缓冲气压下,信号也并不呈现下降趋势,这意味着较高缓冲气压对碰撞能量转移的贡献与它对布居的消激发作用大致相平衡。

图 6 示出了  $1.85 \mu\text{m}$  信号强度对蒸气温度的依赖关系。显见,在大于  $500^\circ\text{C}$  的较高蒸气温度下,信号急剧下降。众所周知,随着样品温度的升高,钠分子对钠原子的浓度比例上升,而泵浦光波长位于钠分子的  $X^1\Sigma_g^+ - B^1\Pi_u$  吸收带区,于是,较高浓度的钠分子对泵浦光的强烈吸收,导致了受该泵浦光双光子激发而抵达高位态的钠原子粒子数的急剧下降,也即导致所述信

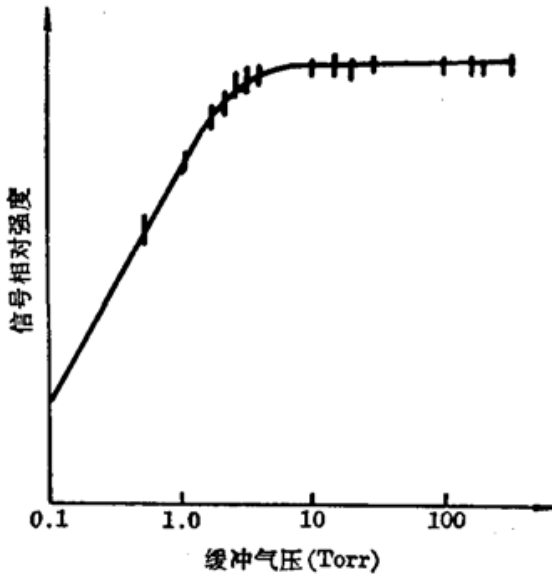


图5  $1.85\ \mu\text{m}(4f-3d)$ 信号强度与 He 缓冲气压的关系。 $\lambda_p=578.73\text{nm}(3s-4d)$  双光子跃迁)

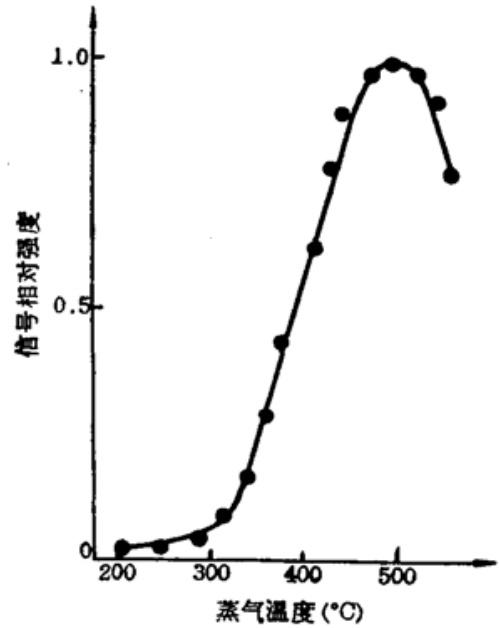


图6  $1.85\ \mu\text{m}$  信号与蒸气温度的关系 ( $\lambda_p=578.73\ \text{nm}$ )

号的急剧下降。

由于在  $578.73\ \text{nm}$  和  $578.07\ \text{nm}$  波长处的激光输出能量几乎是相同的,于是从图 2 和图 3 所显示的实验数据,可粗略地建立下列关系式:

$$A_{3s-4f} \approx A_{3s-4d} \cdot R_{4d-4f},$$

$$A_{3s-4d} \approx 50 A_{3s-4f} \cdot R_{4f-4d}.$$

这里,  $A_{3s-4f}$  和  $A_{3s-4d}$  分别代表  $3s-4f$  和  $3s-4d$  的跃迁几率,  $R_{4d-4f}$  和  $R_{4f-4d}$  分别表示从  $4d$  到  $4f$  能级和从  $4f$  到  $4d$  能级的碰撞转移系数。如果认为  $R_{4d-4f}$  与  $R_{4f-4d}$  约略相等,则从中可估计出  $A_{3s-4f}$  与  $A_{3s-4d}$  之间的数量关系。值得指出的是,本实验中所测得的有关数值关系,与作者在关于钠分子受激扩散带实验中所记录的数据有较好的符合<sup>[8]</sup>。

实验测量工作在西德 Hannover 大学量子光学研究所进行,在此致以谢意。

### 参 考 文 献

- 1 王祖赓,秦莉娟 *et al.*, *Opt. Commun.*, **51**(1), 155(1984)
- 2 Krökel D, Hube M *et al.*, *Appl. Phys.*, **B37**, 137(1985)
- 3 王祖赓,秦莉娟 *et al.*, *Appl. Phys.*, **B41**, 125(1986)
- 4 王祖赓,唐小玲 *et al.*, 中国科学, A 辑, (1), **44**(1987)
- 5 Cheron B, Lemery H., *Opt. Commun.*, **42**(2), 109(1982)
- 6 Cheron B., Mosaddak., *Opt. Commun.*, **54**(1), 7(1985)
- 7 Moore C. E., Atomic Energy Levels, Nat. Stand. Ref. Data Ser., Nat. Bur. Stand, **35**, (1971)
- 8 王祖赓,马龙生 *et al.*, *Opt. Commun.*, **58**(5), 315(1986)