

双光子共振激发 Rb 原子高激发态 的瞬态相干效应

惠令凯 何克祥 刘颂豪

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

崔俊文 立群 潘成明 张拯

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文采用微微秒同步泵浦可调谐染料激光器,研究了 Rb 原子高激发态 $15d$ 的双光子共振激发和增强效应,获得了 $1.065 \mu \rightarrow 4210 \text{ \AA}$ 的频率上转换;给出自位相匹配与 4210 \AA 相干辐射输出的关系。本文重点研究了高激发态的瞬态相干效应,得到了高激发态瞬态相干的失相过程;实验指明,双光子共振激发获得最大极化的时间是 120 ps ,直到 350 ps ,在探测光作用下仍可诱导出 4212 \AA 相干辐射光。

一、前 言

原子系统的四波过程已获得了广泛的研究^[1~6]。尚未解决的和因为难度大较少进行研究的主要课题是近共振理论、高激发态与自离化态和高激发态的瞬态相干效应。Matsuoka 等^[6]首次研究了 Ca 蒸汽中的基态 $4s^2^1S_0$ 与最低单态 $4s3d^1D_2$ 的瞬态相干,并测量了失相时间。Royt^[7]采用双光子共振增强的 CARS 技术,测量了 Sr 中的失相时间。Matsuoka 等曾指出由于原子的超精细分裂引起相干态调制和较低能级的强共振发射使相干态发生畸变,认为激发态为最低的单态才是有希望的。原子系统的失相时间研究是很困难的,实验研究迄今报导很少。高激发态的研究工作就更加复杂,特别是高激发态的双态尤其麻烦。此外,由于高激发态的双光子吸收几率很低,必须使用强光超短可调谐光脉冲,这就使实验技术和装置复杂化了。所以至今未见报导。

二、失相过程

实验研究了 Rb 原子基态与高激发态的瞬态相干效应。Rb 原子的能级如图 1 所示。通过双光子共振激发,基态 $5s^2S$ 与高激发态 $15d^2D$ 产生相干的线性迭加态。在无外场作用时,这个相干态在特征弛豫时间内保持其相干性,并且有些类似于 Dicke^[8]提出的超辐射态。假如我们考虑基态和双光子激发的能级振幅如同三维矢量作进动^[9],那么,这个相干态又很类似于二能级原子的宏观偶极矩的自由进动状态。在双光子激发到双光子极化的持

续时间内, 即 R 矢量旋转到 $\pi/2$ 前, 相干态连续贮存能量, Feynman等^[9]作了较详细的讨论。

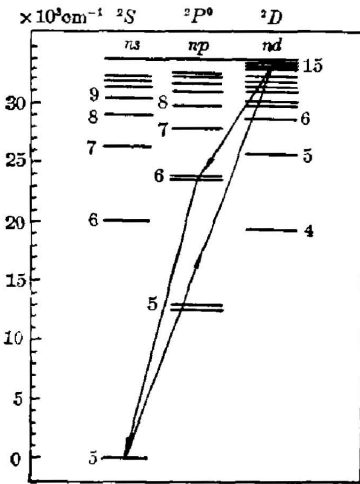


图 1 Rb 原子部分能级图
Fig. 1 Partial energy levels of Rb atom

共振双光子激发感应的相干态, 由于热运动产生非均匀衰减是原子系统相干态产生失相的重要原因。失相时间的测量是通过探测脉冲实现的。设有另一个脉冲作用于相干态, 在提取相干态中的能量时, 发现泵浦光束和探测光束同时进入样品, 相干辐射光并非最大, 而在探测光束相对于泵浦光束有一定的延迟时, 输出光才达到最大, 并在几百微微秒延迟时间内(其数量级远大于泵浦光束和探测光束脉宽)还有光输出。从输出光强度随探测光束与泵浦光束之间延迟时间的变化关系, 可知瞬态相干过程以及了解和测定失相时间。

在实验过程中也观察到量子拍频现象, 这个现象与 Nakatsuka 等^[10]所得到的结果相类似。本文的重点是研究基态和高激发态的瞬态相干效应; 其次观察了双光子共振激发和共振双光子增强效应, 获得了频率上转换, 给出了相干辐射输出与炉温(即 Rb 密度)变化的关系。

三、实验装置

实验装置如图 2 所示。对该装置主要有下面几个要求: (1) 染料激光器作为强的超短脉冲泵浦激光光源, 其波长必须同 Rb 的 $15d-6p$ 能级近共振, 以提供样品的探测光束。(2) 染料可调谐激光器, 在 6042 \AA 附近可调且要足够强($\sim \text{MW}$), 以提供双光子共振激发光束。(3) 探测光和双光子共振激发的空间和时间要同步、易校准, 并具有时间延迟装置。(4) Rb 蒸汽热管温度要可变, 稳定控制精度在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。(5) 要具有识别和检测弱光信号装置。

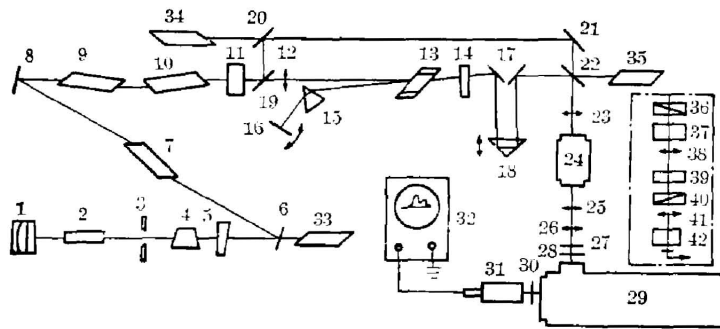


图 2 瞬态相干效应实验装置
Fig. 2 Experimental arrangement of the transient coherent effect

为了实现上述要求, 振荡器的工作物质(见图 2)采用 Nd:YAG2, 它的波长 $\sim 1.065 \mu$, 振荡器具有主-被动锁模, 脉宽为 50 ps , 单横模输出, 限模小孔 $\phi 2.3$ 。振荡器发射出由近

20 个脉冲组成的脉冲列, 脉冲间隔 10 ns, 通过 7、9、10 三级放大器, 脉冲列的总能量为 350 mJ。通过 KDP 实现二倍频, 经过双色片 19, 使 5330 Å 的光透过, 1.065 μ 的光束全反射。全反射的 1.065 μ 光束由全反射板 20、21 反射, 经双色板 22, 再由透镜 23 ($f=150$ mm) 聚焦在热管 24 的中心, 作为探测光束。透过双色板的 5330 Å 的绿光由透镜 12 ($f=150$ mm) 会聚到 RhB 染料盒 13 上。腔板 14, 重火石玻璃棱镜 15 和可以调节方位角的后腔板 16 组成色散腔, 同 RhB 染料盒一起组成染料激光器, 该激光器同主-被动 Nd:YAG 锁模振荡器腔长严格一致, 当调节腔板 16 的方位角时, 获得可调谐的超短脉冲输出^[11]。调整精度为 1 Å, 脉宽稍大于 50 ps, 在 6042 Å 附近输出功率为 0.5 MW。输出的可调谐激光经由宽带全反射板 17 和棱镜 18 组成的光学延迟线, 再由双色板 22 全反射并与探测光束共线地进入装有 Rb 蒸汽的热管中心, 在热管焦点处光斑为 $\phi 0.6$ mm。光学延迟线延迟光程大约 400 ps。金属蒸汽 Rb 在泵浦光和探测光作用下产生 4210 Å 的相干辐射光。这个辐射与泵浦光和探测光共线地进入 2 米光栅摄谱仪 29。为了减少进入摄谱仪的背景(特别是泵浦光), 在它们进入摄谱仪之前, 采用 6042 Å 全反射滤光片(它在 4210 Å 附近的透过率为 90%)和中性滤光片 28, 它主要对 6042 Å 和 1.06 μ 吸收或透过率很小, 而在 4210 Å 附近透过 55%。在进入光谱仪之前, 把泵浦光和探测光衰减到足够小是非常重要的。2 米光栅摄谱仪在这里只起到单色仪的作用。光电倍增管 31 对准摄谱仪的 4212 Å, 倍增管前放置一个 8 mm 的狭缝, 在狭缝后加一块宽带(5200~6500 Å)全反射板, 该板在 4212 Å 附近透过 90%。31 是 56 AVP 光电倍增管, 波长响应峰值在 4200 Å, 最小探测到 5 个光子, 上升时间 1.9 ± 0.2 ns。显示用 7904 示波器。

36~41 光学元件组成共线光闸, 借以校对泵浦光和探测光之间的时间延迟关系。其中 36 是起偏棱镜, 37 是起旋光作用的水晶片, 39 是光 Kerr 液体(CS_2 或硝基苯), 40 是检偏棱镜, 38 和 41 是透镜 ($f=150$ mm), 42 是快响应(100 ps)光电二极管。33~35 是用来调整和准直光路的 He-Ne 管。

四、实验结果

实验首先观察了 Rb 蒸汽的高激发态 $15d$ 的双光子共振激发增强效应, 并且获得了波长 1.065 μ 向 4210 Å 的转换(或称频率上转换)。已知 $5s-15d$ 能级之间的波数为 33102.39 cm^{-1} , 与它对应的波长为 $\sim 6042 \text{ Å}/2$ 。实验表明泵浦光波长刚好与 $5s-15d$ 能级产生双光子共振时, 才有 4210 Å 的相干辐射输出。通过 2 米光栅摄谱仪可以对泵浦光进行校准。已知产生共振激发的波长是 6042 Å。当泵浦光波长偏离共振时, 即使探测系统提高两个数量级, 仍然看不到有 4210 Å 的辐射输出, 这就证明共振增强效应是很显著的。

在泵浦波长为 6042 Å, 探测光束相对于泵浦光束延迟约为 120 ps 时, 测得 4210 Å 相干辐射大小随热管炉温(或 Rb 原子密度)改变的变化关系如图 3 所示。图 3 中的曲线指出, 差频 $2\omega_1 - \omega_2 = \omega_4$ 四波过程虽然不如和频过程对位相匹配要求那样严格, 但是, 改变蒸汽的温度或管内压力(即原子密度), 以便获得自位相匹配是很重要的。实验表明炉温取在 $320 \pm 5^\circ \text{C}$ 为宜, 此时对应的压力 ~ 2 torr, 原子密度为 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 。

本文重点研究了瞬态相干效应。图 4 中的曲线 I 表示探测光束与泵浦光束的相对时间

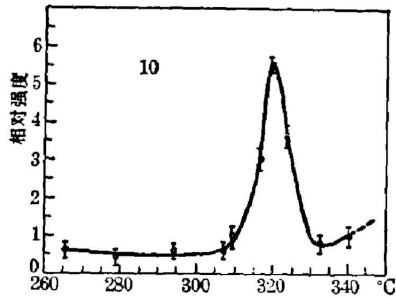


图3 4213 Å 光强度随炉温变化的关系

Fig. 3 Intensity at 4213 Å vs temperature of Rb

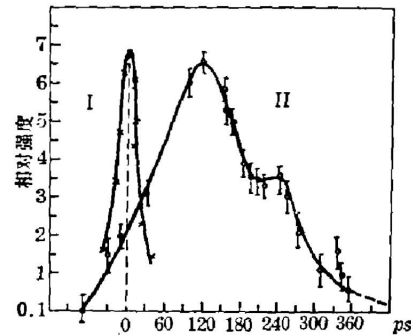


图4 瞬态相干和失相过程

曲线 I: 表示由共线光闸检测探测光束与泵浦光束之间的延迟关系;
曲线 II: 表示输出光同探测光与泵浦光之间的时间延迟的关系曲线

Fig. 4 Transient coherent and dephasing process

延迟关系。该曲线是通过共线光闸测量的,光闸在实验装置中放在热管炉的位置上,用以标定光延迟线的零点,即曲线 I 的峰值所对应的位置。图 4 中的横座标表示探测光速相对于泵浦光束进入共线光闸(或进入热管炉)的延迟时间。曲线 II 给出了频率上转换的相干辐射光随探测光和泵浦光之间的延迟时间的关系。此时热管炉温度控制在 320°C 附近,重复的改变光延迟时间,测得的光辐射大小以纵座标表示。实验可反复进行,重复性好,测量误差在曲线上作了表示。曲线 II 表明,当探测光束和泵浦光束同时进入样品时虽有相干辐射光输出,但不是最大,直到探测光与泵浦光相对延迟 120 ps 时,相干辐射输出最大。这一实验结果表明双光子共振激发过程中,双光子极化持续时间为 120 ps,对应于 R 矢量旋转刚好通过 $\pi/2$ 行径;若再增加探测光与泵浦光之间的延迟时间,相干辐射输出逐渐减小,直到 350 ps(或更长的延迟时间)还会有输出。曲线 II 记录了这样一个过程。

五、结 语

原子系统的高激发态双光子共振激发的吸收几率是非常低的,实验表明相干辐射输出光比泵浦光强度低大约 10^{-7} 数量级,为了提高转换效率,主要是压缩泵浦光线宽和提高泵浦光强。

浙江大学王振华同志,上海科技大学朱雯波同志参加了部分研究工作。作者对谭维翰同志给予的指导,周志尧和周善玉在制备纯 Rb 中给予的帮助,深表感谢。

参 考 文 献

- [1] R. B. Miles, S. E. Harris *IEEE J. Q. E.*, 1973, **QE-9**, No. 4 (Apr), 470.
- [2] V. S. Solomatin *et al.*; *Soviet J. Q. E.*, 1979, **9**, No. 6 (Jun), 778.
- [3] V. G. Arkhipkin, A. K. Popov *et al.*; *Soviet Tech. Phys. Lett.*, 1978, **4**, No. 2 (Feb), 75.
- [4] F. S. Tomkins, K. T. Lu; *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1979, **24**, No. 3 (Mar), 443.

- [5] J. C. Diels, A. T. Georges; *Phys. Rev. (A)*, 1979, **19**, No. 4 (Apr), 1589.
- [6] M. Matsuoka, H. Nakatsuka *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1975, **12**, No. 3 (Sep), 1062.
- [7] T. R. Royt; *IEEE J. Q. E.*, 1977, **QE-13**, No. 9 (Sep), 56D.
- [8] R. H. Dicke; *Phys. Rev.*, 1954, **93**, No. 1 (Jan), 99.
- [9] R. P. Feynman, F. L. Vernon *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1957, **28**, No. 1 (Jan), 49.
- [10] H. Nakatsuka *et al.*; *J. Phys. Soc. Japan*, 1981, **50**, No. 5 (May), 1624.
- [11] 崔俊文等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 5 (Sep), 441.

Transient coherent effect of two-photo resonant excitation of a high excitation state of Rb atoms

HUI LINGKAI HE KEXING AND LIU SONGHAO

(*Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica*)

CUI JUNWEN LI QUN PAN CHENGMING AND ZHONG ZHENG

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

(Received 1 March 1982)

Abstract

We have studied the two-photon resonant excitation and enhancement effect of a high excitation state $15d$ in Rb atom by using a synchronously pumped tunable mode-locked dye laser and obtained the frequency up-conversion at $1.065 \mu\text{m} \rightarrow 4210 \text{ \AA}$. The relationship between self-phase matching and output of UV coherent radiation output is given. This paper emphasizes the study of the transient coherent effect and dephasing process of this state. It has been shown experimentally that the maximum polarized time by two-photon resonant excitation is 120 ps and UV coherent radiation could be induced under the action of probing signal until 350 ps. However up to now no report has been declared about the study of transient coherent dephasing in higher excitation states of atom systems.

All experimental set-ups, results, principle explanation are given.