

钠蒸气参量四波混频紫外辐射的产生

方 允^{1*} 孙寅官^{1,2} 李晓文² 汪凯戈¹ 尤秉信¹

(¹北京师范大学物理系 ²北京师范大学分析测试中心 北京 100875)

提要 记录并分析了钠原子蒸气形成近 4D 能级双光子共振参量四波混频产生的 330 nm 信号, 描述了信号强度随实验条件变化的规律, 确定了最强辐射条件。

关键词 双光子共振, 参量四波混频, 相位匹配, 饱和

1 引 言

适当波长的强脉冲激光单光束泵浦低压钠原子饱和蒸气形成近 4D 能级双光子共振, 将发生参量四波混频(PFWM)、受激超拉曼散射(SHRS)等几种非线性光学过程。由于双光子相干相消效应, 4D 能级的双光子吸收受到抑制, 形成无粒子数转移输出, 可应用于进行频率变换作为与入射激光共轴的相干光源。

近年来, 对钠原子双光子共振的几种非线性光学过程在谱线结构、频移、饱和点、能量转换效率等方面取得了一些实验数据^[1~4], 理论上着力于相干相消、竞争与抑制的机制研究^[5,6]。但各文献的谱线信噪比都较差。本文在这方面作了补充, 分析了由参量四波混频产生的 330 nm 信号 ω_{UV} 的规律(图 1), 发现饱和曲线出现凹陷, 饱和点的激光功率密度与钠原子数密度乘积为 $10^{23} \text{ W cm}^{-5}$, 并且强信号所需相位匹配氩气压强比有关数据^[4]约大五倍。

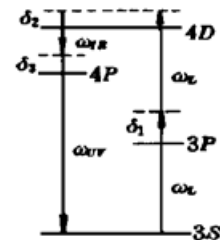


图 1 钠原子 PFWM 过程 $2\omega_U = \omega_{UV} + \omega_{UV}$ 能级图

Fig. 1 Level scheme for PFWM process $2\omega_U = \omega_{UV} + \omega_{UV}$ in sodium vapor

2 实验条件

实验装置如图 2 所示。约 5 g 固体金属钠样品置于特制的直线型不锈钢同心热管可隔离的内管及外管中部。在 10^{-4} Pa 真空度时内外管均充入氩气, 以对负色散的钠原子蒸气进行相位匹配。热管中部用电加热带加热并可调节加热功率, 两端水冷, 钠原子饱和蒸气与氩气均匀混合, 被限制在热管中部沿管轴向约 20 cm 范围。外管工作于热管模式, 维持温度稳定, 内管用于测量。YAG580 系列 O 开关脉冲激光器泵浦 TDL50 染料激光作光源, 输出波长峰值为 579

* 工作单位: 广东韶关大学物理系, 512005。

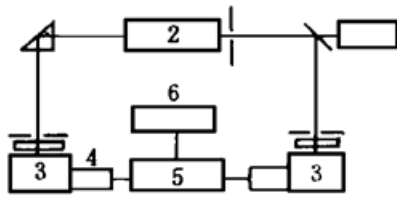


图 2 实验装置

1: 激光器; 2: 热管; 3: 单色仪; 4: 光电倍增管; 5: 取样积分器; 6: 打印机

Fig. 2 Experimental setup

1: laser; 2: heat-pipe; 3: monochromator; 4: photomultiplier;

5: Boxcar; 6: printer

nm, 线宽为 0.2 cm^{-1} , 脉宽为 10 ns , 频率为 10 Hz 。光栅单色仪分辨率为 0.1 nm 。光电倍增管型号为 C31034, 取样积分器为 4400 型。光信号未聚焦, 电信号未预放大。

3 实验结果与分析

由于动量守恒, 参量过程只能产生与入射激光同方向的前向共轴或旁轴辐射, 不可能存在与激光反方向的后向辐射, 这是实验上判断是否是参量信号的依据。

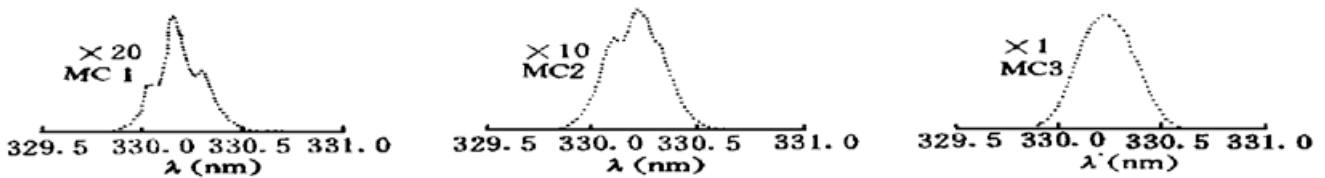


图 3 前向光谱

温度: 470°C , 泵浦强度: $1.4 \times 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$, 泵浦失谐 δ_2 : MC1, -0.03 nm ; MC2, -0.02 nm ; MC3, 0.005 nm

Fig. 3 Spectrum of the forward

temperature: 470°C , pump intensity: $1.4 \times 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$,

pump detuning δ_2 : MC1, -0.03 nm ; MC2, -0.02 nm ; MC3, 0.005 nm

在 470°C , 激光功率密度 $I_L = 1.4 \times 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$, 氩气压强 $P_{\text{Ar}} = 1.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ 条件下记录到的 330 nm 区前向辐射如图 3 所示。谱线 MC1, $\delta_2 = -0.03 \text{ nm}$; MC2, $\delta_2 = -0.02 \text{ nm}$; MC3, $\delta_2 = 0.005 \text{ nm}$ 。同一波长区没有后向辐射的痕迹。由此推断, 图 3 谱线是一纯 PFWM 信号 ω_{V} , 而且它完全抑制了同一频率区的 $4P-3S$ 非参量过程。由于相互作用区内钠原子饱和蒸气与氩气的混合不能保证绝对均匀, 各处的相位匹配点不完全一致, 造成谱线展宽, 比不上原子能级跃迁谱线尖锐, 但仍能清楚看出该谱线存在微结构, 并且随实验条件变化。

3.1 信号强度随激光功率密度 I_L 的变化

在 470°C , $\delta_2 = 0.02 \text{ nm}$, $P_{\text{Ar}} = 1.5 \times 10^3 \text{ Pa}$, 单色仪缝宽为 $50 \mu\text{m}$ 的条件下, 输出信号随 I_L 的变化规律如图 4, V_0 为取样积分器记录的电压。可知, PFWM 阈值很低 ($< 10^6 \text{ Wcm}^{-2}$), 在弱泵浦下输出强度随 I_L 的变化率远大于强泵浦情况, 这两者之间有一代表达到最大范围双光子相干相消的饱和临界点 I_c 。当 $\delta_2 \approx 0$, SHRS 很弱而近似认为仅发生 PFWM 过程时, I_c 两边均近似为直线^[4,5]。但当激光波长失谐较大, 可能同时存在 SHRS 过程, 将由于 SHRS 随 I_L 的增大逐渐加强而对 PFWM 的有效 I_L 不能得到增大导致 ω_{V} 的输出曲线出现凹陷, 如图 4A B。同时测量 819 nm 区, A 点正好对应 $3D-3P_{3/2}$ 819.7 nm 信号跨过阈值开始线性增大, 这反映了参量与非参量过程之间相互竞争优势的变化。从温度可得钠原子的数密度 $N = 2.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, B 点的 $NI_L = 1.95 \times 10^{23} \text{ Wcm}^{-5}$ 。

3.2 信号强度随钠原子饱和蒸气压的变化

图 5 是 ω_{V} 信号强度随钠原子饱和蒸气压的变化曲线, $I_L = 1.1 \times 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$, $\delta_2 = 0.01$

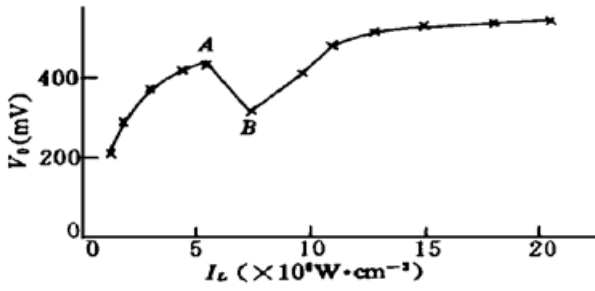


图 4 ω_{UV} 信号电压随激光功率密度的变化

$t = 470^\circ\text{C}, \delta_2 = 0.02 \text{ nm}$

Fig. 4 Pump intensity dependence of the ω_{UV}

$t = 470^\circ\text{C}, \delta_2 = 0.02 \text{ nm}$

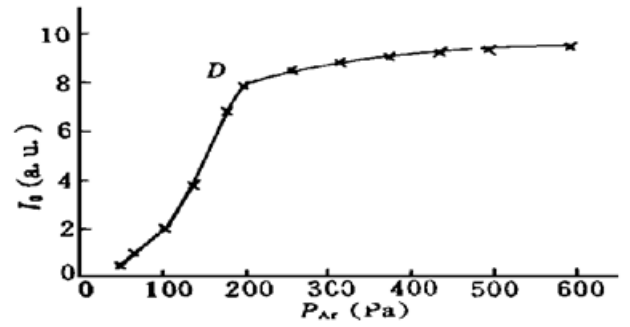


图 5 ω_{UV} 信号随钠原子饱和蒸气压的变化

$I_L = 1.1 \times 10^7 \text{ W cm}^{-2}, \delta_2 = 0.01 \text{ nm}$

Fig. 5 Sodium pressure dependence of the ω_{UV}

$I_L = 1.1 \times 10^7 \text{ W cm}^{-2}, \delta_2 = 0.01 \text{ nm}$

nm。当入射激光功率密度及饱和蒸气柱长不变, E_{UV} 场将随数密度增大, 直到双光子相干相消饱和, 这时继续提高数密度, 也不能增大输出。只有加强激励或增大蒸气柱长度, 才能提高输出。但由于激光线宽或失谐的影响, 可能同时存在的非参量过程对 $4P$, 同时也对 $3P$ 布居, 在大约 4 ns 时间内参量过程将由于原有的相位匹配条件被破坏而停止输出。所以蒸气柱的有效长度不超过 1.2 m。图 5 中 D 点的钠原子饱和蒸气压 $P_{Na} = 200 \text{ Pa}$, 得数密度 $N = 1.98 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。所以, $NI_L = 2.18 \times 10^{23} \text{ W cm}^{-5}$, 与图 4 中的 B 点接近。 D 点是达到双光子相干相消饱和的临界数密度。

3.3 信号强度随泵浦波长失谐 δ_2 的变化

调谐激光器的输出波长, 使 ω_{UV} 信号从仪器监测到的阈值开始由弱—强—弱变化的波长满调谐宽度远大于其它谱线, 大约为 0.1~ 0.2 nm, 随氙气匹配量改变和随 N, I_L 的增大而增大, 信号以共振点为最强, 强度变化曲线与共振点基本对称。

实验还多次记录了激发谱, 都发现距共振波长约 0.015 nm 处有一小凹陷, 这是在近共振处开始产生 SHRS 所引起。

3.4 信号强度随相位匹配条件的变化

实验改变氙气匹配量, 以探求相位匹配条件的影 响。温度为 470°C , 相应的钠原子饱和蒸气压为 $2.66 \times 10^2 \text{ Pa}$ 时, 信号强度随氙气压强的变化如图 6。 V_0 为每一匹配量的最强信号电压, 单色仪缝宽 $50 \mu\text{m}$ 。可见, 信号以 $P_{Ar} = 1.5 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时为最强。该匹配量比文献[4]的氙气压强(266 Pa)约大五倍。所以本实验的信噪比较高。若实验时不充以氙气, 其它条件不变, 则信号电压只有 40 mV。这也说明, PFWM 在较纯的钠蒸气中也能产生, 如文献[3]所述。但同时观察 $3D-3P$ 的 819 nm 区, 前后向信号都呈两峰, 前向不存在两峰之间的参量六波混频(PSWM)信号。可见 PFWM 对氙气匹配量的允许范围比 PSWM 宽。

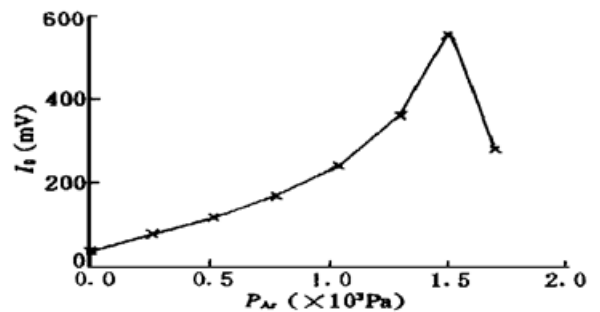


图 6 ω_{UV} 信号电压随氙气压强的变化

$t = 470^\circ\text{C}, I_L = 0.88 \times 10^7 \text{ W cm}^{-2}$

Fig. 6 Argon pressure dependence of the ω_{UV}

$t = 470^\circ\text{C}, I_L = 0.88 \times 10^7 \text{ W cm}^{-2}$

4 结 语

钠原子饱和蒸气在合适的条件下于精确共振、近共振都能产生单向性的无粒子数转移相干辐射。信号强度不仅随钠原子数密度、泵浦功率密度的增大而增大,随泵浦波长失谐的增大而减小,而且与相位匹配条件也有很大关系。合适的相位匹配能获得最强和最大调谐范围的输出。总之,不失谐,不失配,达临界点的 NI_L 是产生 ω_{UV} 辐射的最佳条件。如果忽略介质对不同波长的不同吸收,则 ω_{UV} 的规律也适用于 ω_R 。抑制非参量过程,提高饱和点的 NI_L 值,是提高参量信号能量转换效率的有效途径。

参 考 文 献

- 1 J. Krasinski, D. J. Gauthier, M. S. Malcuit *et al.*. Two-photon conical emissions. *Opt. Commun.*, 1985, **54**: 241
- 2 M. A. Moore, W. R. Garrett, M. G. Payne. Suppression of electronic hyper-Raman emission by four-wave mixing interference. *Opt. Commun.*, 1988, **68**(4): 310
- 3 M. A. Moore, W. R. Garrett, M. G. Payne. Generation of axially phase-matched parametric four-wave and six-wave mixing in pure sodium vapor. *Phys. Rev. A*, 1989, **39**(7): 3692
- 4 R. K. Wunderlich, W. R. Garrett, R. C. Hart *et al.*. Nonlinear optical processes near the sodium 4D two-photon resonance. *Phys. Rev.*, 1990, **A41**(11): 6345
- 5 W. R. Garrett, M. A. Moore, R. C. Hart *et al.*. Suppression effects in stimulated hyper-Raman emissions and parametric four-wave mixing in sodium vapor. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(9): 6687
- 6 W. R. Garrett. Forward gain suppression of optically pumped stimulated emissions due to self-induced wave-mixing interference during a pump pulse. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(26): 4059

Generation of Ultraviolet Radiation with Parametric Four-wave Mixing in Sodium Vapor

Fang Yun¹ Sun Yinguan^{1,2} Li Xiaowen² Wang Kaige¹ You Bingxin¹

(¹Department of Physics, Beijing Normal University

²Analytical and Testing Center, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract The 330 nm PFWM coherent radiation near the 4D two-photon resonance were recorded and analysed in sodium vapor. The variation of the intensity is described and the optimum condition is found.

Key words two-photon resonance, parametric four wave mixing, phase matched, saturation