

最优化参数控制提高超冷铯分子 振转光谱的信噪比*

张一驰 武寄洲 马杰[†] 赵延霆 汪丽蓉 肖连团 贾锁堂

(山西大学物理电子工程学院,量子光学与光量子器件国家重点实验室,太原 030006)

(2009 年 11 月 17 日收到;2009 年 12 月 16 日收到修改稿)

超冷原子光缔合光谱对于研究长程分子势能结构、分子常数和分子相关动力学过程具有重要意义. 光缔合光谱的信噪比作为衡量探测技术的重要指标之一,直接影响光谱的分辨能力和探测灵敏度. 利用调制荧光光谱技术获得了超冷长程铯分子超精细振转光谱. 通过研究解调参数,即积分时间和灵敏度,发现解调参数对光谱信号的信噪比有重要影响,且依赖关系呈非线性. 结合相关实验系统,实现了对光谱信噪比的最优化控制,为进一步研究超冷铯分子长程态振转能级结构奠定了重要的实验基础.

关键词: 锁相探测, 超冷铯分子, 磁光阱, 信噪比

PACC: 3380P, 3400, 3500

1. 引 言

研究超冷分子的产生、操纵和相互作用已经成为原子分子光物理领域的一个重要方向. 超冷分子的研究将开辟分子超高分辨光谱、超冷分子碰撞、超冷分子化学和量子信息等新的研究领域^[1-4]. 由于分子能级复杂,难以实现闭合的二能级冷却系统. 因此无法像冷却原子那样直接冷却分子. 目前可以获得温度小于 1mK 的超冷分子的方案有两种: 1) 是 Feshbach 共振; 2) 是超冷原子光缔合. 由于 Feshbach 共振对冷原子温度要求严格(约 1 μ K), 且形成的分子为弱束缚分子易被破坏, 因此超冷原子光缔合是目前公认的形成稳定超冷分子的最佳方案^[8-10].

自 1987 年 Thorsheim 等人首次提出了超冷原子光缔合形成超冷分子的实验方案以来^[11], 经过 20 年来的发展, 光缔合形成超冷分子已经在碱金属、碱土金属^[12], 氦^[13] 和氢^[14] 等众多系统中实现. 光

缔合光谱技术逐渐成为研究长程分子强有力的工具^[15]. 光缔合是指两个碰撞的冷原子共振吸收一个光子, 从而形成一个激发态分子. 由于所形成的分子核间距较大, 因此常被称作“长程态分子”. 对光缔合产生长程态分子的光谱研究, 不仅可以使我们获得长程分子的能级布居、长程势能曲线及分子常数, 而且有助于了解长程相互作用以及近离解区域的动力学^[16].

目前通常有两种光谱技术可以测量长程分子激发态光谱, 其一是离子谱技术, 其二是俘获损耗光谱技术^[17]. 离子谱技术具有探测灵敏度高, 零背景的优势, 缺点在于只能探测易于形成基态分子的长程激发态, 而且操作复杂. 俘获损耗光谱是指在光缔合过程中, 随着光缔合光频率相对于原子共振频率的失谐, 探测器中收集到的荧光也随之变化. 其优点在于可以探测所有的分子态. 但是目前使用的俘获损耗光谱由于是直接测量荧光, 而在实验中由于原子荧光强度小, 所处光场复杂, 受到杂散光和探测器自身噪声等方面因素的影响, 无法获得信

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10934004), 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB921600, 2008CB317103), 国家高技术
研究发展计划(批准号:2009AA01Z319), 国家自然科学基金(批准号:60978018, 60978001, 60808009), 山西省自然科学基金(批准号:
2008011004, 2009011059-2), 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-06-0259), 教育部新教师基金(批准号:200801081021)
资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: mj@sxu.edu.cn

噪比很好的荧光光谱^[18-20]. 目前在国内关于光谱方面的研究中还没有人提出相关的获得高灵敏、高分辨率光谱的方法, 而高灵敏、高分辨率光谱对于研究超冷分子具有重要意义, 因此我们做了关于提高光谱灵敏度和分辨率方面的研究. 本文提出一种利用锁相技术对俘获光的频率进行调制, 利用 Lock-in 技术解调冷原子的荧光, 并通过改变锁相放大器的解调参量灵敏度 S 和时间常量 T , 得到了高信噪比、高分辨率的超冷铯分子振转光谱^[21,22].

2. 实验装置

实验装置如图 1(a) 所示, 俘获光和再抽运光均用可调谐外腔式半导体激光器 (TOPTICA DL100) 作为光源, 其典型工作电流约为 200 mA, 最大输出功率 160 mW, 典型线宽 (积分时间 5 μ s) 为 0.5—1 MHz. 俘获光的频率锁定在铯原子 $6S_{1/2} (F=4) \rightarrow 6P_{3/2} (F'=5)$ 超精细跃迁线上, 再抽运光的频率锁定在铯原子 $6S_{1/2} (F=3) \rightarrow 6P_{3/2} (F'=4)$ 超精细跃迁线上. 光缔合激光由一台可大范围连续调谐的钛宝石激光器系统 (Coherent MBR110) 提供, 最大可输出功率为 700 mW, 线宽小于 100 kHz. 磁光阱的石英真空气室的背景真空度为 1×10^{-7} Pa, 磁场由一对反亥姆霍兹线圈提供, 轴向磁场梯度约为 1.5 mT/cm. 在实验中, 我们获得稳定的冷原子样品

的密度约为 $10^{11}/\text{cm}^3$, 温度约为 100 μ K.

光缔合过程是指两个碰撞的超冷铯原子共振吸收一个光子, 形成一个处于某一振转能级的激发态超冷铯分子. 此激发态的铯分子的寿命为 30 ns, 随后自发辐射通常有两个跃迁通道: 一是向下跃迁到基态从而形成一个稳定的基态超冷铯分子, 二是自发辐射一个光子后重新成为两个具有较大动能的自由铯原子, 并从阱中逃逸. 这两个跃迁通道均会导致磁光阱中俘获的原子数减少, 通过观察冷原子荧光的变化即可获得超冷分子振转光谱. 实验中利用透镜将钛宝石激光器输出的光缔合光聚焦在冷原子云区, 调节光斑位置使得光缔合光将冷原子云全部覆盖, 其腰斑直径为 1.2 mm. 光缔合激光频率调谐在 $11661.955 \text{ cm}^{-1}$ 附近, 对应于铯分子长程激发态 O_g^- 态振动量子数 $v=4$ 的能级, 频率扫描速度为 5 MHz/s. 使用波长计 (High Finesse -Angstrom WS/7R) 记录光缔合激光的频率, 精确度为 0.002 cm^{-1} . 直接测量的光缔合光谱信号通常信噪比较小 (约为 1), 其主要原因是由于探测器自身的热噪声、周期性杂散光产生的背景噪声的干扰. 为了获得高信噪比的光缔合振转光谱, 需要对荧光信号进行调制和解调.

超冷铯分子光缔合光谱的调制原理如图 1(b) 所示, 通过信号发生器产生的正弦信号加载到俘获光激光器的电流调制端口, 实现对俘获光频率正弦

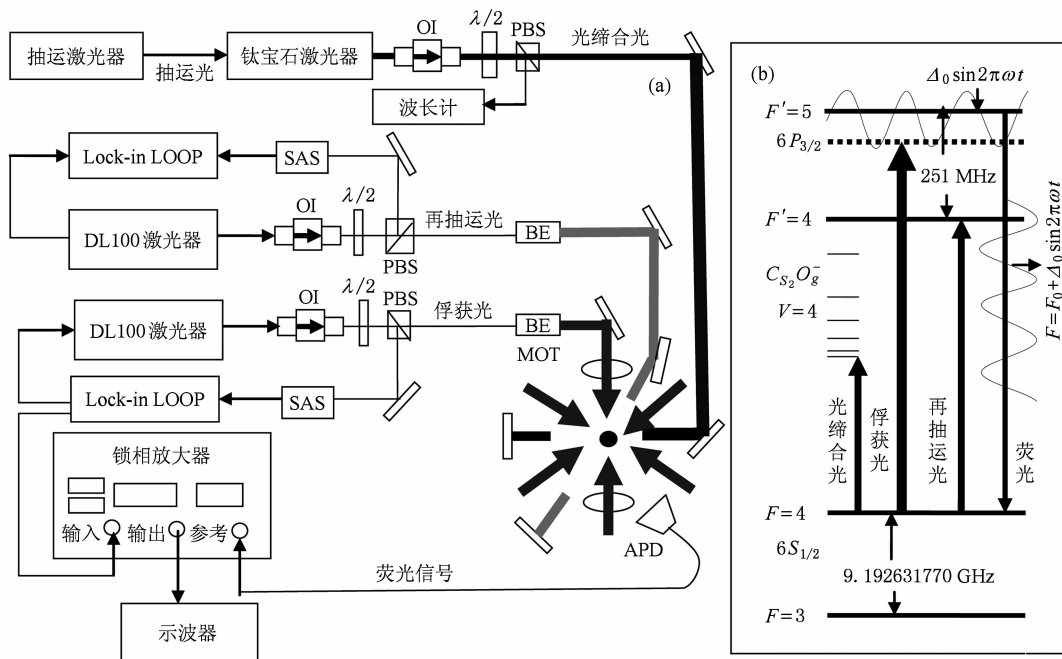


图 1 (a) 实验装置 (Lock-in loop 为锁定模块, SAS 为饱和吸收光谱, OI 为光隔离器, $\lambda/2$ 为半波片, PBS 为分束棱镜, BE 为扩束, APD 雪崩光电探测器, MOT 为磁光阱); (b) 调制原理

调制, 调制频率约为 2.3 KHz, 调制幅度 2 MHz. 被调制后俘获光频率可以表示为 $f = f_0 + \Delta_0 \sin 2\pi\omega t$.

其中, f_0 为俘获光的中心频率, $\Delta_0 \sin 2\pi\omega t$ 为调制信号的频率, Δ_0 (约 1 MHz) 为频率调制深度. 磁光阱中被俘获原子数目与俘获光强度、失谐量、再抽运光的强度及磁场强度等因素有关. 实验中频率调制信号引起俘获光失谐量发生变化, 导致了冷原子数目以相同频率被调制, 荧光频率被调制. 被调制后的荧光频率为 $F = F_0 + \Delta_0 \sin 2\pi\omega t$. 实验中使用雪崩光电探测器 (Hamamatsu Si APD, S3884) 探测荧光, 此探测器具有低温制冷且温度、工作电压可控、预放大等功能, 在 900 nm 波段效率可达到 85% 以上, 暗电流小于 50 nA. 荧光信号被雪崩光电探测器以脉冲信号的形式输入锁相放大器 (Stanford SR830). 通常情况下探测器自身的热噪声、周期性杂散光产生的背景噪声的频谱在低频段, 通过 Lock-in 技术解调可以抑制低频段的噪声, 从而提高超冷

铯分子的光缔合振转光谱的信噪比. 锁相放大器解调后的输出信号由示波器 (Tektronix TDS1012) 进行观察, 即可得到高信噪比的超冷铯分子振转光谱.

3. 实验结果及分析

图 2 为在磁光阱中冷原子荧光的噪声功率谱, 插图为低频部分. 如图所示, 谱线的噪声随着频率的增大而降低, 这主要是由 $1/f$ 噪声所引起的. 由此可知, 选择高的调制频率对俘获光的频率进行调制可以降低光谱的噪声. 同时, 考虑到随着频率的增大 (5 kHz), 调制深度将减小, 为了获得最好的效果, 且避免市电频率 (50—60 Hz) 的整数倍处电子干扰, 选择 2.3 kHz 作为俘获光的调制频率. 图 2 中 3 个尖峰分别代表信号的 1f, 2f 和 3f 谐波信号, 可以清楚看到 1f 信号幅度最大, 因此在解调时选择 1f 频率锁相解调.

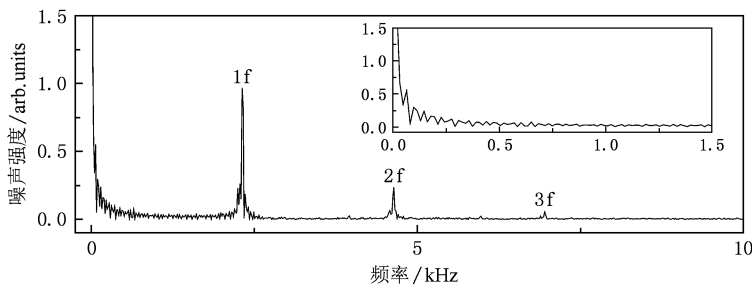


图 2 磁光阱中冷原子荧光的噪声功率谱. 插图为低频 (< 1.5 kHz) 部分

为了获得超冷铯分子光缔合振转光谱, 首先利用激光冷却和俘获技术在磁光阱中得到超冷铯原子样品. 将光缔合光作用在超冷铯原子上, 使光缔合光和超冷铯原子团充分作用实现碰撞冷原子对的光缔合. 当冷原子在长程区域内光缔合为激发态的超冷分子时, 磁光阱中由于超冷分子的形成导致原子数目减少, 冷原子的荧光会相应地减弱, 故可以通过监测磁光阱中冷原子荧光强度随光缔合光频率的变化关系, 获取超冷分子激发态的光缔合振转光谱. 通过对俘获光的频率进行调制, 实现荧光信号的调制. 利用锁相放大器对荧光信号进行解调, 改变锁相放大器的灵敏度 S 和时间常量 T 可以得到高信噪比的超冷铯分子光缔合振转光谱.

图 3(a) 和图 4(a) 为光缔合激光在中心频率为 11661.955 处扫描, 获得了铯分子长程激发态 O_g^- 态振量子数 $v = 4$ 、转动量子数 $J = 0—5$ 的光缔合振转光谱. 这些振转光谱的强度出现了相似的变化

趋势, 从 $J = 0$ 开始逐渐变大, 到 $J = 2$ 后开始逐渐变小, 直至 $J = 5$. 这是由对应于从初始的原子基态到长程分子激发态的振转能级末态的光缔合的 Franck-London 跃迁因子发生了变化导致的^[3]. 超冷铯分子振转光谱的线宽约 50 MHz. 光谱的线宽由自然线宽、碰撞展宽、多普勒效应展宽、渡跃时间展宽等因素造成. 其中, 冷原子温度很低使得多普勒效应展宽和渡跃时间展宽很小 (约 1 MHz), 石英真空室中的压强很低 (约 1×10^{-7} Pa) 使得碰撞展宽也很小. 可知, 对光谱线宽起主要作用的是自然线宽.

图 3(a) 为保持锁相放大器时间常量 $T = 300$ ms 不变的情况下, 改变灵敏度 S 分别为 50, 100, 200, 500 mV 和 1 V 时所获得的一组超冷铯分子光缔合振转光谱. 超冷铯分子光缔合振转光谱与锁相放大器灵敏度 S 的关系可以表示为, $V_{out} = (V_{sig}/S - V_{of}) \times 10Ex$. 其中, V_{out} 为锁相放大器解调后输出的超冷分子光缔合振转光谱的荧光信号; V_{sig} 为探测器

实际探测到的冷分子振转谱线的荧光信号; S 为锁相放大器的解调灵敏度; Ex 为锁相放大器的放大倍数; V_{of} 为锁相放大器的偏置电压. 当选取锁相放大器的偏置电压为 0 时, 表达式变成 $V_{out} = V_{sig} \times 10Ex/S$. 从中可以看出, 当 V_{sig} 一定时, 灵敏度 S 的值越大, 解调后得到的超冷铯分子振转光谱的荧光信号 V_{out} 越小. 由此可知, 减小灵敏度可以提高调制后的冷分子振转谱线的荧光信号 V_{out} , 但减小灵敏度也会使得噪声信号变大. 信噪比表示为 $SNR = V_{out}/N$, N 为噪声信号. 从以上的分析可知, 不能一味地减小锁相放大器的灵敏度来提高光谱的信噪比. 所以, 为了获得最佳的灵敏度参数, 我们逐一测量不同灵敏度下超冷铯分子光缔合光谱的信噪比, 如图 2(b) 所示, 其中的误差由测量误差引起. 发现当锁相放大器的灵敏度 S 为 200 mV 时超冷铯分子振转光谱的信噪比最大为 16.8. 因此为了得到高分辨率的超冷铯分子振转光谱, 选择 $S = 200$ mV 作为锁相放大器的最佳灵敏度.

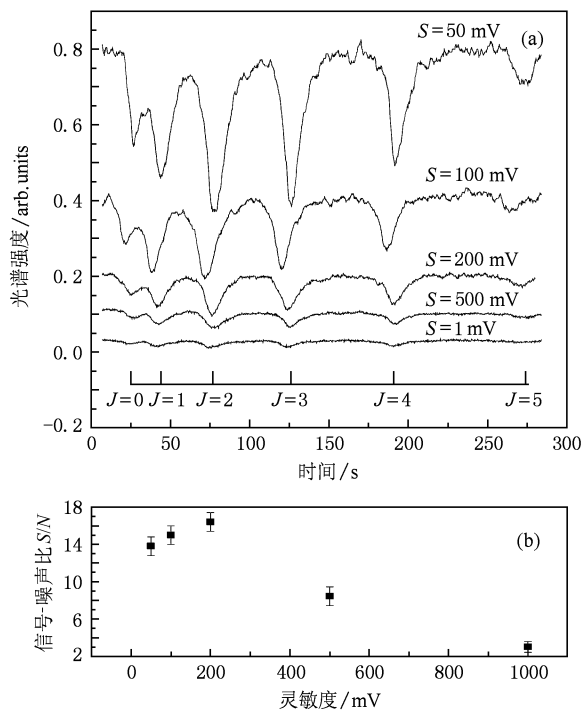


图 3 (a) 保持锁相放大器的时间常量 T 为 300 ms 不变, 不同灵敏度 S 取值的超冷铯分子振转光谱; (b) 保持时间常量 T 为 300 ms 不变, 不同灵敏度 S 时的超冷铯分子振转光谱的信噪比

图 4(a) 是保持锁相放大器保持灵敏度 S 为 200 mV 不变的情况下, 改变时间常量 T 为 3 s, 1 s, 300, 100, 30, 3, 1 ms 时的所获得的超冷铯分子光缔合振转光谱. 经过锁相放大器的调制后超冷铯分子

振转光谱的噪声来源主要为锁相放大器自身的噪声 Input noise 和 Johnson noise. 总的噪声为 $P_N^2 = P_I^2 + P_J^2$, P_I 和 P_J 为 Input noise 和 Johnson noise 的功率, 且 P_I 和 P_J 正比于等效噪声宽度 (Equivalent Noise frequency Range Width ENRW). ENRW 又与锁相放大器的时间常量 $1/T$ 成正比. 由此得出正比于 $1/T$, 即 SNR 正比于 $1/T$. 信号达到最大的时间为锁相放大器的等待时间 T_0 , $T_0 = 5T$. 所以随着时间常量 T 越大, 冷原子荧光谱达到最大值的时间越长, 荧光信号的信噪比越好. 但是, 荧光达到最大值的时间会影响荧光谱的分辨率. 从图 4(a) 中可以看出, 光谱分辨率随荧光谱达到最大值的时间变长而变小. 我们逐一测量了不同时间常量 T 时超冷铯分子振转光谱的信噪比, 如图 4(b) 其中的误差由测量误差引起. 可知当 T 为 3 s 时超冷铯分子振转光谱的信噪比最好, 但此时振转光谱的分辨率太低, 当转动量子数 $J=0$ 时谱线强度太小, 变得几乎不可分辨. 为了兼顾振转光谱的信噪比和分辨率, 实验中选择 T 为 300 ms 为最佳时间常量, 此时光缔合光谱信噪比为 16.6.

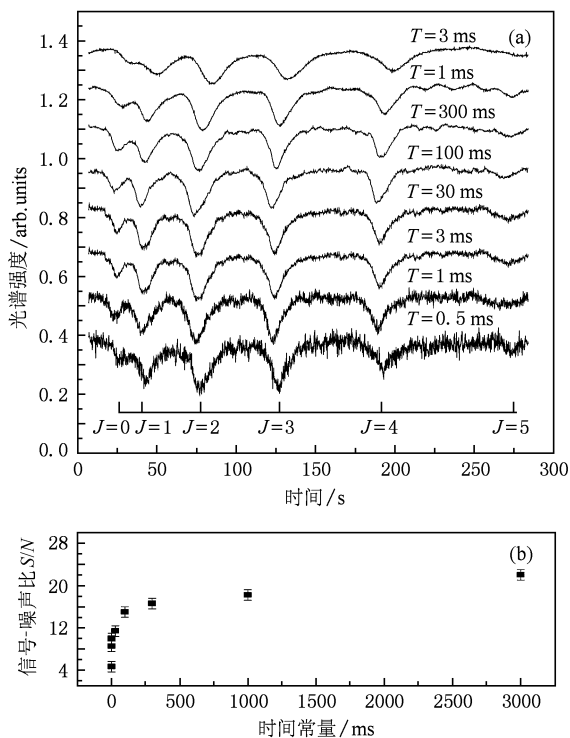


图 4 (a) 保持锁相放大器的灵敏度 S 为 200 mV 不变, 不同时间常量 T 取值的超冷铯分子振转光谱; (b) 保持锁相放大器的灵敏度 S 为 200 mV 不变, 不同时间常量 T 取值的超冷铯分子振转光谱的信噪比

本实验中通过改变锁相放大器的参数:灵敏度 S 和时间常量 T , 获得了在最优化参数 200 mV, 300 ms 时信噪比为 16.8 的超冷铯分子光缔合振转光谱, 其信噪比是直接测量得到的光缔合振转光谱信噪比的 17 倍, 很好地满足了我们在研究高分辨光谱时的要求. 但由于实验中使用的锁相放大器的灵敏度参数 T 和时间常量 S 只存在几种固定的挡位, 无法实现连续参量的变化, 因此得到的最佳参量有局限性. 我们相信如果能实现连续可调, 超冷铯分子的光缔合光谱的信噪比会进一步提高.

4. 结 论

在实验中由于背景杂散光, 探测器自身噪声等

方面因素的影响, 降低了超冷铯分子振转光谱的信噪比. 为了得到高信噪比、高分辨率的超冷铯分子振转光谱, 我们采取了对铯冷原子的俘获光频率进行调制的方法. 将雪崩光电二级管收集到的荧光信号注入到锁相放大器, 利用 Lock-in 技术滤去了探测器本身的热噪声和背景杂散光等产生的低频噪声, 极大地提高了振转光谱的信噪比. 通过分别改变锁相放大器的解调参量: 灵敏度 S 和时间常量 T , 得到了在解调参量为 $T = 300$ ms, $S = 200$ mV 时超冷铯分子振转光谱的信噪比最好, 信噪比为 16.8 的实验结果. 利用这种技术获得了对光谱信噪比的最优化控制, 对于下一步进行的利用受激拉曼光缔合技术形成超冷基态铯分子, 并研究其光谱具有重要意义.

-
- [1] Gan I H, Li Y M, Chan X Z 1996 *Chin Phys. Lett.* **13** 821
- [2] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [3] Prodan I D, Pichler M, Junker M, Hulet R G, Bohn J L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 080402
- [4] Bohn J L, Julienne P S 1996 *Phys. Rev. A* **54** 4637
- [5] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [6] Monroe C, Swann W, Robinson H, Wieman C 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 1571
- [7] Bohn J L, Julienne P S 1999 *Phys. Rev. A* **60** 414
- [8] Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S T 2009 *Journal of Spectroscopy* **255** 106
- [9] Wang L R, Ma J, Ji W B, Wang G P, Xiao L T, Jia S T 2007 *Laser Physics* **17** 1171
- [10] Kraft S D, Mudrich M, Staudt M U, Lange J, Dulieu O, Wester R, Weidemuller M 2005 *Phys. Rev. A* **71** 013417
- [11] Thorsheim H R, Weiner J, Julienne P S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2420
- [12] Zinner G, Binnewiss T, Reihle F, Tiemann E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2292
- [13] Herschbach N, Tol P J J, Vassen W, Hogerworst W, Woestenek G, Thomsen J W, Straten P V D, Niehaus A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1874
- [14] Mosk A P, Reynolds M W, Hijman T W, Waleaven J T M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 307
- [15] Picher M, Chen H, Stwalley 2004 *J. Chem. Phys.* **121** 6779
- [16] Plillet P, Crubellier A, Bleton A, Dulieu O, Nosbaum P, Mourach I, Masnou S F 1997 *J. Phys. B* **30** 2801
- [17] Stwally W C, Uang Y, Picher G 1978 *Phys. Rev. Lett.* **41** 1164
- [18] Wang L R, Ma J, Zhang L J, Xiao L T, Jia S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6373 (in Chinese) [汪丽蓉、马杰、张临杰、肖连团、贾锁堂 2007 物理学报 **56** 6373]
- [19] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [20] Jiang K J, Li K, Wang J, Zhan M S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 125 (in Chinese) [江开军、李可、王谨、詹明生 2006 物理学报 **55** 125]
- [21] Jones K M, Tiesinga E, Lett P D, Julienne P S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 483
- [22] Geng T, Yan S B, Wang Y H, Yang H J, Zhang T C, Wang J M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5104 (in Chinese) [耿涛、闫树斌、王彦华、杨海菁、张天才、王军民 2005 物理学报 **54** 5104]

Research on improve the SNR of ultracold cesium molecule rovibronic spectrum via best optimization parameter control *

Zhang Yi-Chi Wu Ji-Zhou Ma Jie[†] Zhao Yan-Ting Wang Li-Rong Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 17 November 2009; revised manuscript received 16 December 2009)

Abstract

Ultracold atom photoassociation spectroscopy is significant for studying the long-range molecular potential energy structure. The signal-noise ratio of ultracold Cesium Molecule photoassociation Rovibronic Spectrum is one of the indicators as a measure of detection technology which directly affect the distinguishing ability and detection sensitivity of the spectra. We obtain an long-range ultracold cesium molecular hyperfine rovibration spectra by modulating the fluorescence spectroscopy. We find that demodulation parameters have a significant impact to the signal-noise ratio of spectra by studying the demodulation parameters such as integration time and sensitivity, which show nonlinear relation with the ratio. We achieve the optimal control of the signal-noise ratio for spectrum according to our experiment, which laid an important foundation for further studying the long-range state rovibration level of ultracold cesium molecule.

Keywords: phase-lock detection, ultracold cesium molecule, MOT, signal-noise ratio

PACC: 3380P, 3400, 3500

* Project supported by the Key Program National Nature Science Foundation of China (Grant No. 10934004), the state key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2006CB921600, 2008CB317103), the National High Technology Research Development Program of China (Grant No. 22009AA01Z319), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978018, 60978001, 60808009), the National Natural Science Foundation of Shanxi Province (Grant Nos. 2008011004, 2009011059-2), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-06-0259), the New Teacher Foundation of National (Grant No. 200801081021).

[†] Corresponding author. E-mail : mj@sxu.edu.cn