

平行线偏光激发 CPT 共振方案实验研究*

杨晶 刘国宾 顾思洪†

(中国科学院原子频标重点实验室, 武汉 430071)

(2011 年 4 月 11 日收到; 2011 年 5 月 23 日收到修改稿)

目前的相干布居囚禁 (CPT) 原子钟和 CPT 磁场计中普遍采用圆偏振光方案 ($\sigma^+-\sigma^+$) 实现 CPT 共振, 该方案对原子的利用率较低. 为了提高原子的利用率, 本文实验研究了通过平行线偏振相干双色光与 ^{87}Rb 原子作用实现 CPT 共振的方案 (lin//lin). 与 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案相比较, lin//lin 方案消除了极化暗态, 获得更多工作原子. 在相同的实验条件下, 开展对比实验研究获得了信噪比为 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案 2 倍, 微分线型信号的中心斜率为 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案 1.65 倍的 CPT 共振信号. 研究表明该方案是实现低功耗原子钟、磁场计等设备的理想候选.

关键词: 相干布居囚禁, 原子钟, 微波, 激光

PACS: 32.30.Bv, 32.70.Jz, 42.50.Gy

1 引言

利用双色相干光场与原子相干耦合实现相干布居囚禁 (coherent population trapping, CPT) 共振, 所获得的窄线宽 CPT 共振信号可以应用于实现原子钟、磁场计等设备 [1]. 应用 CPT 共振实现的原子钟、磁场计等设备具有体积小、功耗低的特点, 在一些特殊应用中具有优势, 因此对于它的应用研究吸引了许多人的兴趣. 大多数对于 CPT 共振现象的研究都是基于碱金属原子的, 其中很大部分利用铷原子开展 [2-7], 我们研究组选用 ^{87}Rb 原子研制出了 CPT 原子钟, 并开展了磁场计的研究工

作 [8-11].

目前在 CPT 原子钟、CPT 磁场计中实现 CPT 共振大都采用双色圆偏振光通过图 1 中实线所示的 Λ 构型 $\sigma^+-\sigma^+$ CPT 态制备方案. 该方案有一个缺点: 光抽运使大量原子积聚于基态超精细子能级态 $|F_g = 2, m = 2\rangle$, 形成极化暗态而不能参与 CPT 态制备. 为了消除极化暗态, 提高原子利用率, 已经有人开展了 push-pull 光抽运 [3]、 $\sigma^+-\sigma^-$ 构型 [12]、垂直线偏振 [13]、四波混频 [5], 平行线偏振 (lin//lin) [14] 等方案研究. 本文介绍我们在 lin//lin 方案开展研究所获得的进展.

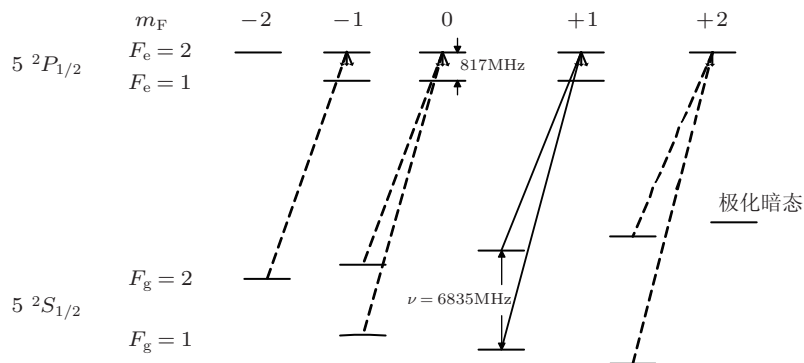


图 1 圆偏振光激发 CPT 共振. 基态 $|F_g = 1, m = 0\rangle$, $|F_g = 2, m = 0\rangle$ 与激发态 $|F_e = 2, m = 1\rangle$ 构成的 Λ 形 CPT 态制备结构 (实线).

* 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款 (批准号: 10927403) 资助的课题.

† E-mail: shgu@wipm.ac.cn

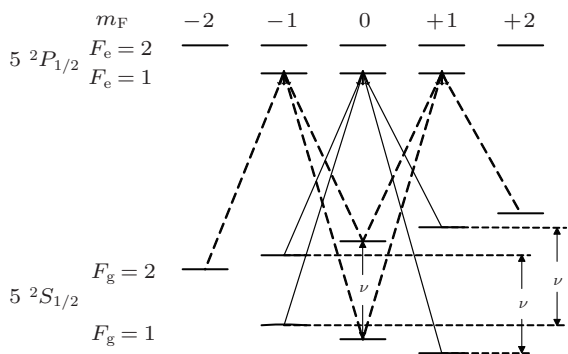


图2 平行线偏振光激发 CPT 共振. 基态 $\{|F_g = 1, m = -1\rangle, |F_g = 2, m = 1\rangle\}$, $\{|F_g = 1, m = 1\rangle, |F_g = 2, m = -1\rangle\}$ 与共同的激发态 $|F_e = 1, m = 0\rangle$ 构成的两个 Λ 形 CPT 态制备结构 (实线); $\{|F_g = 2, m = -2\rangle, |F_g = 1, m = 0\rangle$ 和 $|F_e = 1, m = -1\rangle\}$, $\{|F_g = 1, m = 0\rangle, |F_g = 2, m = 2\rangle$ 和 $|F_e = 1, m = 1\rangle\}$ 构成的两个 Λ 形由于失谐而不制备 CPT 态; 基态两 $m = 0$ 态与激发态 $|F_e = 1, m = 1\rangle$, $|F_e = 1, m = -1\rangle$ 构成的两个 Λ 形和两个 V 形由于干涉相消不制备 CPT 态

lin/lin 方案 CPT 态制备的途径如图 2 所示, 双色平行线偏振光场与 ^{87}Rb 原子基态和激发态 $5^2P_{1/2}$ 的 $F = 1$ 超精细子能态共振. 在实验中设置了稳恒磁场, 原子基态各超精细 m 子能级发生如图所示 Zeeman 移动. 线偏振光在磁场中等效于左右旋圆偏振光的叠加, 与原子的各种耦合见图 2. 该方案利用双色相干激光与 ^{87}Rb 原子的两对基态超精细子能级 $\{|F_g = 1, m = -1\rangle, |F_g = 2, m = 1\rangle\}$, $\{|F_g = 1, m = 1\rangle, |F_g = 2, m = -1\rangle\}$ 与共同的激发态 $|F_e = 1, m = 0\rangle$ 共振构成两个 Λ 形 CPT 共振 (图中实线所示) 结构制备 CPT 态. 由于 Zeeman 移动, 在上述共振条件下另外两个 Λ 形 CPT 共振 $\{|F_g = 2, m = -2\rangle, |F_g = 1, m = 0\rangle$ 和 $|F_e = 1, m = -1\rangle\}$, $\{|F_g = 1, m = 0\rangle, |F_g = 2, m = 2\rangle$ 和 $|F_e = 1, m = 1\rangle\}$ 因失谐而不具备制备 CPT 态条件. 另外, 图中基态两 $m = 0$ 态与上能级构成的两个 Λ 形 CPT 共振结构因为干涉相消而不能制备 CPT 态^[15], 与上能级构成的两个 V 形因为干涉

相消而不会制备出 CPT 态.

2 实验研究

实验采用了与我们已开展的 CPT 原子钟和 CPT 磁场计研究基本相同的条件^[8-11], 实验设置框图见图 3. 工作原子 ^{87}Rb 、缓冲气体 N_2 和 CH_4 密封于长度 40 mm 直径 25 mm 的样品泡中. 样品泡外部设置有螺线管线圈, 螺线管线圈为样品泡在沿光的传播方向上提供了 $B = 5.4 \mu\text{T}$ 磁场, 为系统提供量子化轴并使原子基态各子能级产生如图 2 所示 Zeeman 移动. 磁屏蔽桶屏蔽环境磁场对系统的干扰. 激光光源由垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 提供, 其输出光线宽约为 100 MHz. 为了获得实验所需的相干双色光, 采用频率为 $\nu/2 \approx 3.417 \text{ GHz}$ 的微波通过 BiasT 叠加在输入 VCSEL 的直流电流上, 在此电流驱动下 VCSEL 输出调频多色光, 本实验利用其中的 ± 1 级边带作为制备 CPT 态的相干双色光. VCSEL 和样品泡由一套我们研制的温控系统分别控温于各自的工作温度.

VCSEL 的输出光依次经过透镜、衰减片、 $\lambda/4$ 波片后与 ^{87}Rb 原子作用, 然后被光电探测器探测获得光电信号. 激光光强通过改变衰减片控制, 设置 $\lambda/4$ 波片是为了通过改变波片主轴与激光偏振方向夹角实现线偏光与圆偏光之间的切换, 对 lin/lin 和 $\sigma^+ - \sigma^+$ 方案开展对比实验研究. 激光频率通过原子吸收谱线稳频稳定在 ^{87}Rb 原子 $D1$ 线 $5^2S_{1/2}$ 向 $5^2P_{1/2, (F=1)}$ 的跃迁频率上. 为了相敏检测 CPT 共振信号, 我们对 VCSEL 的输入微波作了 136 Hz 频率调制, 利用锁相放大器实现相敏解调. 图 4 是在激光频率稳频的条件下, 连续改变微波频率, 同步记录经锁相放大器输出的微分线型 CPT 共振信号.

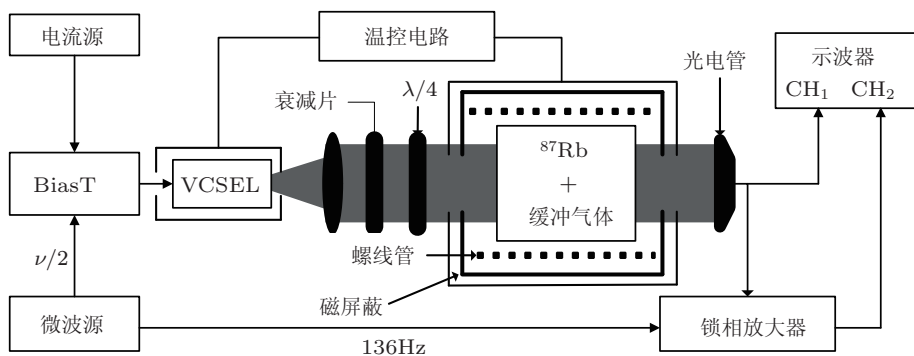


图3 实验设置框图. 激光光源为垂直腔面发射激光器, 样品泡内充有 ^{87}Rb 原子和缓冲气体 N_2, CH_4

3 讨论

在完全相同的实验条件下, 由图 4 所记录的两方案噪声幅度基本相同, 但是 lin/lin 方案的信号幅度约为 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案的两倍, 这应归功于 lin/lin 方案消除了极化暗态, 使得更多原子参与 CPT 态制备. 然而, 由图 4 可见, $\Delta\nu_L$ 较 $\Delta\nu_C$ 有所增加. 在图 4 曲线所采用的实验参数下, 所获得的实验结果是 lin/lin 方案线宽 $\Delta\nu_L \approx 772$ Hz, 较 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案的 $\Delta\nu_C \approx 616$ Hz 增加约 25%. 线宽增加的原因是 lin/lin 方案 CPT 态制备采用了能级随磁场作线性移动的 $|m| = 1$ 子能态, 且两个 Λ 形共振相对于中心频率有一个对称的频移 [14,16]. 虽然线宽有所增加, 但由于信号幅度增加, 由图 4 可见 lin/lin 方案所得微分信号的中心斜率为 0.78 mV/Hz, 为 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案斜率 0.47 mV/Hz 的 1.65 倍, 信号质量得到明显改善. 如果将此实验结果应用于本组所研究的磁场计 [11], 其探测灵敏度将达到到原值的 1.65 倍. 对于原子钟应用, 因为原子钟输出频率不稳定性 (原子频标专业习惯称: 频率稳定度) [17] σ_y 与鉴频信号线宽 $\Delta\nu$ 和 SNR 的关系是 $\sigma_y \propto \Delta\nu/(\nu \times \text{SNR})$, 根据图 4 实验结果采用 lin/lin 方案具有使 σ_y 下降到 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案频率不稳定性度的 63% 潜力, 可以使原子钟输出频率质量获得大幅度改善.

虽然有以上优势, 但 lin/lin 方案应用范围也有一些限制, 特别是随着原子的温度升高, 改善 CPT 信号质量的效果会变差. 因为该方案要求激光与 $5^2P_{1/2, F=1}$ 超精细子能态耦合, 当 Doppler 运动造成 $5^2P_{1/2, F=2}$ 超精细子能态原子参与激光-原子相互作用时, 就会造成基态能级 $|F_g = 1, m = -1\rangle$, $|F_g = 2, m = -1\rangle$ 和 $|F_g = 1, m = 1\rangle$, $|F_g = 2, m = 1\rangle$ 与激发态 $|F_e = 2, m = -2\rangle$ 和 $|F_e = 2, m = 2\rangle$ 形成 W 或 M 形结构, 使 CPT 共振信号减弱 [16,18]. 最近, Novikova 小组已经实现了基于 lin/lin 方案的实验室 CPT 原子钟实验系统的初步锁定, 获得 $2 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ ($\tau \leq 20$ s) 的短期频率稳定度, 与目前的 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案 CPT 原子钟最佳结果相当 [19]. 该工作没有获得具有明显优势的实验结果, 除了因初步实验各方面还未充分优化之外, 实验中样品泡的温度较高 (47.5 °C, 高于我们实验的 39 °C), 造成的 CPT 信号改善不显著应是频率稳定度性能未获得明显改善的重要原因.

当原子蒸气泡体积减小, 为了保证一定的信号强度, 往往采取提高泡温, 增加原子密度的方法保

证参与工作原子的数量. 微型 CPT 原子钟的原子蒸气池的体积 $< 1 \text{ mm}^3$, 其工作温度超过 85 °C [20,21], 因此 lin/lin 不是微型 CPT 原子钟理想候选方案, 其应用前景应是低功耗小型 CPT 原子钟. 同样, 因为原子样品泡的最小尺寸约在 1 cm^3 水平, 对于磁场测量将局限应用于探测 cm 尺度强度分布基本均匀的磁场. 因此, lin/lin 方案也不是高空间分辨率的微型磁场计探头的理想候选方案.

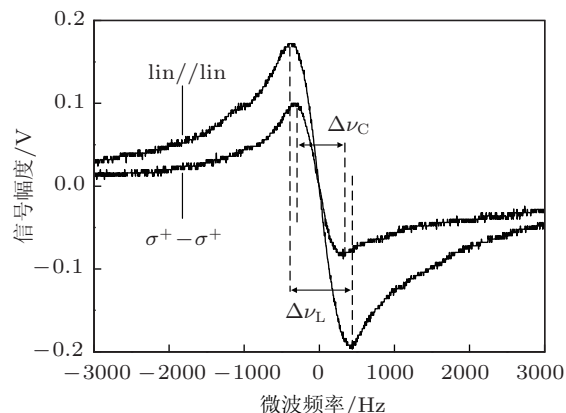


图 4 锁相放大器解调出的微分信号. $\Delta\nu_L$, $\Delta\nu_C$ 分别对应于 lin/lin 和 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案的信号线宽, 激光总功率为 140 μW , 样品泡温度 39 °C, 磁场 $B = 5.4 \mu\text{T}$

本实验采用了微波调制 VCSEL 实现相干双色光方案, 这是实现小型、低功耗原子钟、磁场计的理想方案. 虽然此方案 VCSEL 输出光中只有 ± 1 级边带是制备 CPT 态的有用光成份, 其他部分都被光电管探测转换成本底光噪声, 使得 CPT 信号幅度仅为总信号幅度的 2%—6%, 但是通过调制、相敏解调锁相放大技术能够有效地从本底中提取出 CPT 信号. 根据本实验研究结果, 对照本组用原方案已经实现的原子钟, 提高了原子的利用率, lin/lin 方案明显降低了功耗. 在其他环节采用与本组原来实现的 CPT 原子钟相同技术的前提下, 可以实现功耗 2 W, 体积 150 cm^3 水平的低功耗、小型原子钟.

本工作采用 ^{87}Rb 原子能够方便地开展 lin/lin 与 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案对照实验研究, 而且 ^{87}Rb 原子更适合研究温度对 lin/lin 方案的影响, 但是实际应用中采用 Cs 原子在较多情况下会获得更佳效果. 因为: 1) 在相同温度条件下, Cs 原子蒸气的原子密度高于 ^{87}Rb 原子, 参与工作的原子更多; 2) Cs 原子第一激发态超精细能级裂距 1.17 GHz, 大于 ^{87}Rb 的 817 MHz, 受 Doppler 热运动的影响较小; 3) Cs 原子质量比 ^{87}Rb 原子大, Doppler 热运动分布更窄. 基于以上原因, 将 Cs 原子应用于 lin/lin 方案会减小 Doppler 运动对于 CPT 信号信噪比的负面影响,

获得更佳效果.

4 结论

我们的实验研究结果表明 lin//lin 方案消除了 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案中存在的极化暗态, 提高了原子利用效率, 因此在较低的温度时就有较多原子参与 CPT 态制备, 获得较强 CPT 共振信号. 与其他

消除极化暗态方案相比较, 此方案所需要的资源最少, 实现的技术和所需器件与目前应用最广泛的 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案基本一致, 它是最成熟, 最适合实际应用的消除极化暗态的 CPT 共振方案. 因为更多原子参与工作, 在较低的工作温度就能获得满足要求的信号, 使得 lin//lin 比 $\sigma^+-\sigma^+$ 方案的功耗更低, 因此它是低功耗原子钟、磁场计等设备的一种理想候选方案.

-
- [1] Vanier J 2005 *Appl. Phys. B* **81** 421
- [2] Deng J L, Hu Z F, He H J, Wang Y Z 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1745
- [3] Jau Y Y, Miron E, Post A B, Kuzma N N, Happer W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 160802
- [4] Liu G B, Du R C, Liu C Y, Gu S H 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 472
- [5] Shah V, Knappe S, Hollberg L, Kitching J 2007 *Opt. Lett.* **32** 1244
- [6] Merimaa M, Lindvall T, Tittonen I, Ikonen E 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 273
- [7] Liu L, Guo T, Deng K, Liu X Y, Chen X Z, Wang Z 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1883
- [8] Du R C, Chen J H, Liu C Y, Gu S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6117 (in Chinese) [杜润昌, 陈杰华, 刘朝阳, 顾思洪 2009 物理学报 **58** 6117]
- [9] Du R C, Liu G B, Chen J H, Wang J, Liu C Y, Gu S H 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 1697 (in Chinese) [杜润昌, 刘国宾, 陈杰华, 王瑾, 刘朝阳, 顾思洪 2008 光谱学与光谱分析 **28** 1697]
- [10] Chen J H, Du R C, Zhao J C, Li Y Y, Ma H, Liu C Y, Gu S H 2010 *Acta Metr. Sin.* **31** 417 (in Chinese) [陈杰华, 杜润昌, 赵劼成, 黎英云, 马洪, 刘朝阳, 顾思洪 2010 计量学报 **31** 417]
- [11] Liu G B, Gu S H 2010 *J. Phys. B* **43** 035004
- [12] Kargapoltsev S V, Kitching J, Hollberg L, Taichenachev A V, Velichansky V L, Yudin V I 2004 *Laser Phys. Lett.* **1** 495
- [13] Zanon T, Guerandel S, de Clercq E, Holleville D, Dimarcq N, Clairon A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 193002
- [14] Taichenachev A V, Yudin V I, Velichansky V L, Zibrov S A 2005 *JETP Lett.* **82** 398
- [15] Levi F, Godone A, Vanier J, Micalizio S, Modugno G 2000 *Eur. Phys. J. D* **12** 53
- [16] Watabe K, Ikegami T, Takamizawa A, Yanagimachi S, Ohshima S, Knappe S 2009 *Appl. Opt.* **48** 1098
- [17] Wang Y Q, Wang Q J, Fu J S, Dong T Q 1986 (Beijing: Sciences Press) p236 (in Chinese) [王义道, 王庆吉, 傅济时, 董太乾 1986 量子频标原理 (北京: 科学出版社) 第 236 页]
- [18] Agap'ev B D, Gornyi M B, Matisov B G, Rozhdestvensky Y V 1993 *Phys. Usp.* **36** 763
- [19] Mikhailov E E, Travis Horrom, Nathan Belcher, Irina Novikova 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 417
- [20] Knappe S, Schwindt P D D, Shah V, Hollberg L, Kitching J, Liew L, Moreland J 2005 *Optics Express* **13** 1249
- [21] Lutwak R 2009 *IEEE Int. Frequency Control Symp. and EFTF Conf.* 573

Experimentally studying the scheme on exciting coherent population trapping resonances with lin//lin configuration*

Yang Jing Liu Guo-Bin Gu Si-Hong[†]

(Key Laboratory of Atomic Frequency Standards (KLAFS), Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

(Received 11 April 2011; revised manuscript received 23 May 2011)

Abstract

Coherent population trapping (CPT) atomic clocks are prevailingly realized by exciting CPT resonance with circularly polarized bichromatic coherent light ($\sigma^+-\sigma^+$ scheme), while atom utilization efficiency is relatively low in the scheme. For improving efficiency, we experimentally study the scheme of realizing CPT resonance through the interaction between atoms and parallel linearly polarized bichromatic coherent light field (lin//lin scheme). In the same experimental conditions the experimental results show that the signal-noise ratio of the CPT resonance signal is twice, and the differential slope is 1.65 time higher than those of $\sigma^+-\sigma^+$ scheme. The experimental results reveal that the scheme is an ideal candidate for low power consuming atomic clock and magnetometer.

Keywords: coherent population trapping, atomic clock, microwave, laser

PACS: 32.30.Bv, 32.70.Jz, 42.50.Gy

* Project supported by the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.10927403).

[†] E-mail: shgu@wipm.ac.cn