

# 基于相干布居囚禁现象的高对比度钟跃迁信号

王 鑫<sup>1,2,3</sup> 赵文字<sup>1,2,3</sup> 薛文祥<sup>1,3</sup> 鱼志健<sup>1,2,3</sup> 杜志静<sup>1,3</sup> 田 晓<sup>1,2,3</sup> 张首刚<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100039

<sup>3</sup>中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

**摘要** 研究了基于相干布居囚禁(CPT)现象的平行线偏振相干激光所激发的<sup>87</sup>Rb原子,并获得了对比度较高的CPT共振信号。实验结果表明,平行线偏光激发方案是一种很有前途的能替代传统双色圆偏振光激发原子的实施方案。该方案结构简单,功耗小,有较好的用于高稳定度小型化CPT原子钟的前景。

**关键词** 物理光学; 高对比度原子钟; 相干布居囚禁; 线偏振光; 圆偏振光

中图分类号 O431.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s102002

## High Contrast Atomic Clock Signal Based on Coherent Population Trapping

Wang Xin<sup>1,2,3</sup> Zhao Wenyu<sup>1,2,3</sup> Xue Wenxiang<sup>1,3</sup> Yu Zhijian<sup>1,2,3</sup>

Du Zhijing<sup>1,3</sup> Tian Xiao<sup>1,2,3</sup> Zhang Shougang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>National Time Service Centre, Chinese Academy of Science, Xi'an, Shaanxi 710600, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Science, Xi'an, Shaanxi 710600, China

**Abstract** An experimental investigation of the coherent population trapping (CPT) resonance excited on the D1 line of <sup>87</sup>Rb atoms by bichromatic parallel linearly polarized laser light is presented. The experimental results show that a lin || lin transition scheme is a promising alternative to the conventional circular-circular transition scheme for an atomic clock. Compared with the circular light transition scheme, linear light accounts for high-contrast transmission resonances, which makes this excitation scheme promising for CPT atomic clock.

**Key words** physical optics; high contrast atomic clock, coherent population trapping, linearly polarized light; circularly polarized light

**OCIS codes** 020.3690; 020.1335; 030.1670; 270.1670

## 1 引 言

当两相干光场与原子基态两超精细能级相互作用,并激发至同一个激发态能级跃迁频率共振时,有些原子会被抽运到两基态能级的相干叠加态上,从而不吸收光子,产生相干布居囚禁(CPT)现象。CPT现象的提出与实现,为相干光场与原子相互作用的研究开辟了一个新的领域。基于CPT现象及CPT理论的新型原子钟<sup>[1-5]</sup>、高精密度磁力计<sup>[6-7]</sup>、原子激光冷却<sup>[7]</sup>等成为近年来研究的热点。其中,CPT原子钟因其高精度、体积小、功耗低的特点在通信、时间同步、导航定位、实验研究<sup>[8-10]</sup>等领域备受关注。

短期频率稳定度是描述CPT原子钟性能的一个重要指标。通常使用Allan方差 $\sigma_y(\tau)$ 来表征原子钟的频率稳定度: $\delta_y(\tau) \propto \frac{\Delta f}{f_0} \frac{1}{S_{NR}} \tau^{-1/2}$ ,其中, $S_{NR}$ 表示信噪比, $\Delta f$ 表示共振信号线宽, $f_0$ 表示共振信号频率。作为信噪比的度量标准,信号对比度被定义为CPT共振超过背景信号电平的幅度。因此,CPT原子钟信号线宽

收稿日期: 2015-01-19; 收到修改稿日期: 2015-03-01

作者简介: 王 鑫(1982—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事量子频标方面的研究。E-mail: wangxin@ntsc.ac.cn

导师简介: 张首刚(1966—),男,博士,研究员,主要从事量子频标方面的研究。E-mail: Szhang@ntsc.ac.cn

和对比度直接决定了原子钟的短期稳定度。

通常 CPT 原子钟采用圆偏振相干双色光,其 $\pm 1$  级边带与碱金属原子相互作用,并将原子制备到 CPT 态,从而获得 CPT 共振谱线,作为原子钟的鉴频信号<sup>[6]</sup>。然而由于圆偏振光与原子相互作用,光抽运使大量原子积聚于基态超精细子能级。以右旋圆偏振光作用<sup>87</sup>Rb 原子 D1 线为例,极化暗态是指原子布居囚禁到  $|F = 2, m_F = 2\rangle$ , 无法参与 CPT 态制备,因而导致 CPT 原子钟信号谱线的对比度不够高,影响 CPT 原子钟的短期稳定度。

一般可以通过提高激光场强度来获得高对比度的 CPT 共振信号,但与此同时,共振信号谱线线宽由于功率展宽效应而变宽<sup>[11]</sup>,所以在减小谱线线宽的同时提高谱线对比度成为 CPT 研制过程中的一个难题。目前,为了获得较高对比度的共振信号,相关领域在提高原子利用率并消除极化暗态方面的研究已经开展了大量的工作,如 push-pull 光抽运<sup>[12]</sup>、四波混频 CPT<sup>[13]</sup>、 $\sigma^+ - \sigma^-$  构型<sup>[14]</sup>、正交线偏光激发 CPT<sup>[15]</sup> 以及平行线偏光激发 CPT<sup>[16]</sup> 等方案研究。其中,平行线偏光激发 CPT 方案消除了传统圆偏振光方案中由于光抽运作用形成的极化暗态,增加了参与工作的原子数量,有效地提高了 CPT 共振信号的对比度。

本文详细介绍了基于平行线偏光激发 CPT 共振的 CPT 原子钟研究进展,并与在传统圆偏振光激发下获得铷原子 CPT 信号进行了比较。实验上研究了通过电光调制器(EOM)产生相干双色光,并实现了平行线偏光激发 CPT 共振,并对实验结果进行了分析。

## 2 实验方案

图 1 为  $\Lambda$  型 CPT 原子能级图,其中图 1(a)为平行线偏相干光场在磁场作用下激发 Rb 原子 D1 线,其中磁场平行于光场方向,其钟跃迁由两个 CPT 共振跃迁构成,如实线部分  $|F=1, m_F = \pm 1\rangle \rightarrow |F=2, m_F = \pm 1\rangle$ , 虽然暗态由一级磁敏感的塞曼能级构成,但在较小磁场下,两对跃迁的塞曼位移相反,相互抵消,与单个塞曼能级相比,一级磁敏感位移只有 0.4%, 可以作为钟跃迁。在该方案中,如果选择激发态能级为  $F'=2$ , 则参与 CPT 共振的两个基态会激发到  $|F'=2, m_F = \pm 2\rangle$  构成了 W 构型,破坏 CPT 态,使得 CPT 信号减弱甚至消失。另外,图中虚线部分的两个 CPT 共振因干涉相消而不具备制备 CPT 态条件;图 1(b)为传统圆偏振光激发 CPT 共振构型。

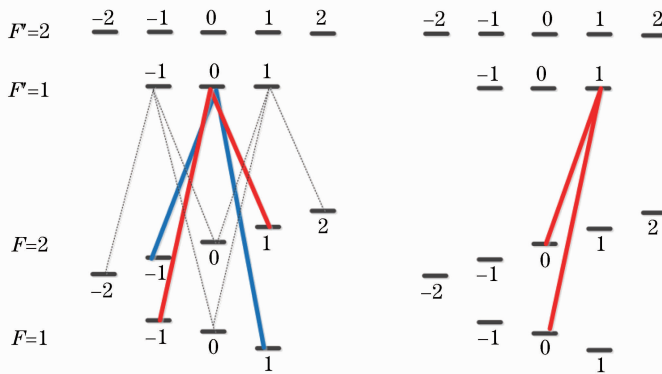


图 1 <sup>87</sup>Rb 原子能级跃迁构型。(a) 平行线偏光激发 Rb 原子 CPT 共振; (b) 传统圆偏振光激发 Rb CPT 共振

Fig. 1 Energy level diagrams of <sup>87</sup>Rb showing transition schemes. (a) Transition scheme; (b) circular-circular transition scheme

实验装置如图 2 所示。光学部分采用波长为 795 nm 激光器,通过 Rb 原子饱和吸收谱,将激光器频率调谐到  $5^2S_{1/2}$  向  $5^2P_{1/2}$  的超精细跃迁谱线上;使用 EOM 实现激光调相,以获得频差为 6.8 GHz,且强度相同的两束相干激光用于激励物理原子系统。

充有缓冲气体的<sup>87</sup>Rb 石英泡放置于两层磁屏蔽筒内,以隔绝地磁场及杂散磁场对实验的影响;螺线管产生平行于激光场的磁场,为系统提供量子化轴,并使原子基态各能级产生如图 1 所示的塞曼分裂;另外,系统使用阻抗线圈加热。

激光光束依次通过 EOM、1/2 波片及偏振分束器(PBS),以获得相干激光及完全线偏振光;进入物理系

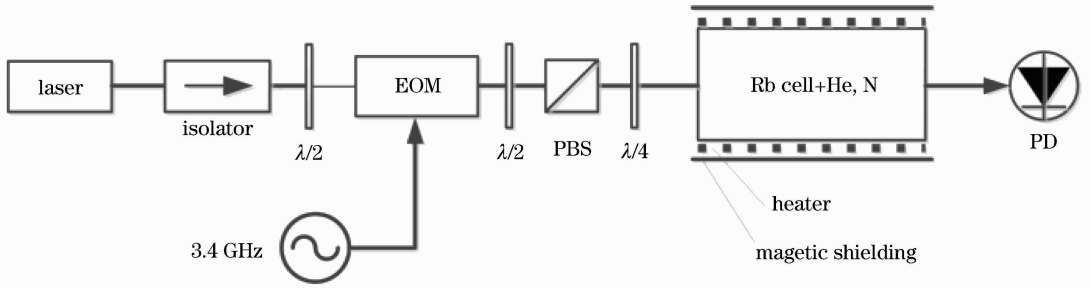


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

统之前放置一个四分之一波片,用来调节相干光的偏振度,实现线偏光与圆偏光的切换;同时,为了获得 CPT 共振信号,EOM 调制频率具有 1 MHz 频率扫描范围;光电信号通过硅光电二极管探测获得。

图 3 为利用 EOM 调制激光频率后,探测到的<sup>87</sup>Rb 原子吸收光谱。入射光光强约为 1.2 MW,微波输出功率 17 dBm,微波频率调谐到基态超精细能级跃迁频率的一半 3.147 GHz。可以看到调制产生的第一阶边带和高阶边带的吸收线。实验利用图中的 $\pm 1$ 级边带获得制备 CPT 态的相干光,同时发现,通过改变调制 EOM 的信号功率可以调节输出激光两个一级边带的强度,从而减小 CPT 信号的线宽,并减小光频移。

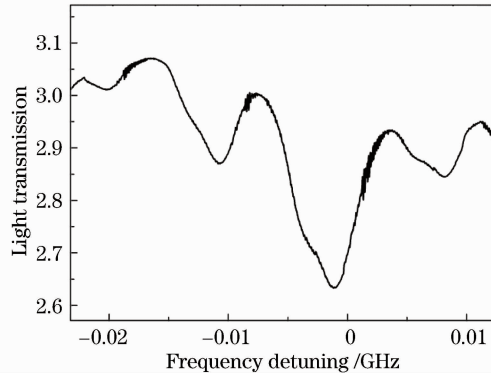


图 3 3.4 GHz 调制后铷原子 D1 线吸收谱线

Fig. 3 Absorption profile of Rb D1 line after being modulated at 3.4 GHz

### 3 实验结果

实验中,平行线偏振相干双色光与<sup>87</sup>Rb 原子相互作用,扫描 EOM 频率,观测到如图 4(a)的 CPT 共振信号。此时,原子泡温度为 50 °C,外加磁场电流为 5 mA,获得的 CPT 信号对比度约为 11%。同时,对微波调制功率与平行线偏光激发 CPT 共振信号对比度的关系进行了研究,如图 4(b)。

另外,在相同实验条件下,对两种不同激发方法(平行线偏光激发和传统圆偏振光激发)获得的 CPT 共振信号进行了比较研究,如图 5。通过实验结果可以很清楚地看到,在平行线偏光激发的情况下,共振信号的幅度大于在圆偏振光激励的情况,它们的信号的对比分别为 8%和 1.34%。同时,平行线偏光激发的两个  $\Lambda$  型共振相对于中心频率有一个对称的频移;图 5(b)是通过改变 EOM 扫描频率,并减小磁场观测到 CPT 共振信号。此时,可以看到平行线偏光激发 CPT 吸收谱的线宽大于圆偏振光激发 CPT 吸收谱,这是由于平行线偏光激发 CPT 采用了能级随磁场作线性移动的  $m=1$  子能态。相对与信号对比度的提高,线宽的增加较小,不会影响最终 CPT 原子钟输出频率的改善。

### 4 结 论

研究了基于平行线偏光激发方案的<sup>87</sup>Rb CPT 原子钟,并与传统激发方案进行了对比。实验中获得了对比度高于 10%的 CPT 共振信号,结果表明,平行线偏光激发 Rb 原子的方案可消除传统方案中存在的极化

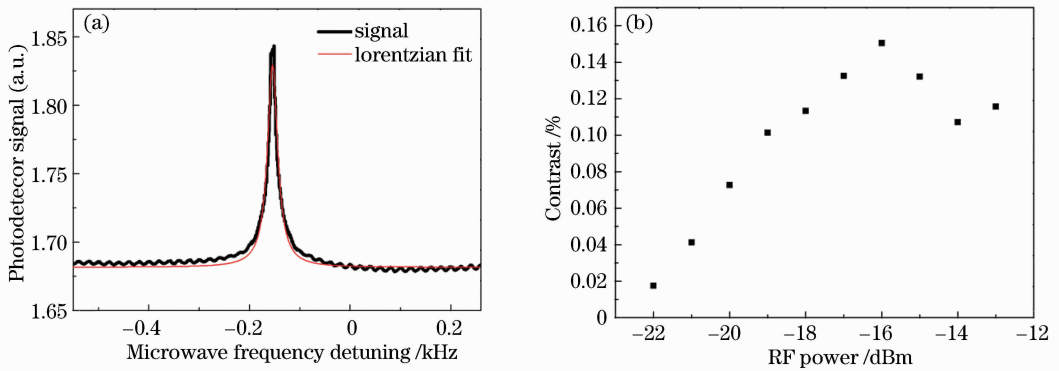


图 4 (a) lin//lin 激发 Rb 原子的 CPT 共振信号; (b) CPT 共振信号对比度与微波功率的关系

Fig. 4 (a) CPT resonance absorption contrast in case of lin/lin; (b) CPT resonance contrast as function of the RF power

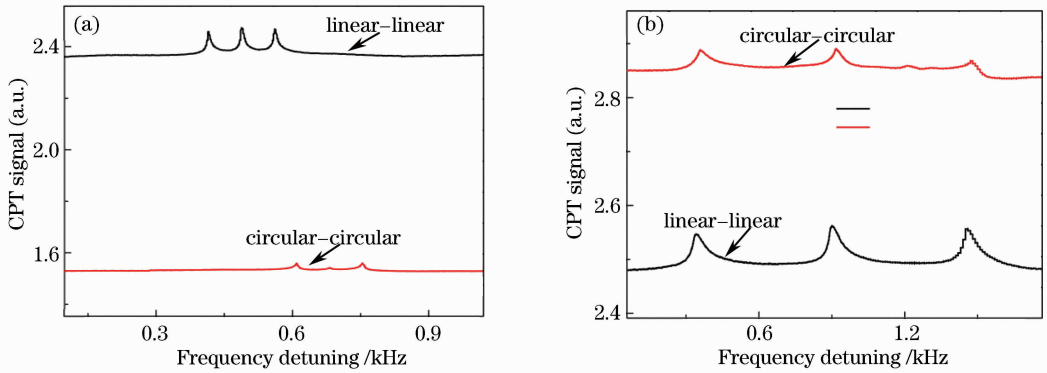


图 5 平行线偏光以及圆偏振光分别激发的 CPT 共振信号,激光功率为 0.45 mW.

(a) 微波扫描频率 400 kHz; (b) 微波扫描频率 50 kHz

Fig. 5 CPT resonance absorption contrast in case of lin || lin (black) and circular-circular (red) excitation schemes with a total laser power of 0.45 mW. (a) Microwave scanning frequency 400 kHz; (b) microwave scanning frequency 50 kHz

暗态,提高原子利用率,获得的 CPT 共振谱线对比度明显优于传统圆偏振光激发方案,改善 CPT 原子钟的短期稳定度;且该实验方案所需器件较少,同时 Rb 原子工作温度相对较低,可减小 CPT 原子钟功耗,有利于 CPT 原子钟小型化以及微型化的实现。

### 参 考 文 献

- Zhang Yan, Zhang Yi, Yin Yi, *et al.*. Optimization of light frequency shift characteristic for coherent population trapping atomic clock[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0415001.  
张 艳,张 奕,尹 毅,等. 相干布居囚禁原子钟光频移性能优化[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0415001.
- G Alzetta, A Gozzini, L Moi, *et al.*. An experimental method for the observation of r. f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapors[J]. Nuovo Cimento Soc Ital Fis B, 1976, 36(1): 5-20.
- Fan Qi, Guo Wenge, Zhang Shougang, *et al.*. Atomic frequency standards using coherent population trapping[J]. Journal of Time and Frequency, 2006, 29(2): 107-115.  
范 琦,郭文阁,张首刚,等. 相干布居囚禁现象用于原子频标[J]. 时间频率报, 2006, 29(2): 107-115.
- E Arimondo. Coherent Population Trapping in Laser Spectroscopy[M]. Amsterdam: Elsevier, 1996.
- Cai Weiqian. Brief survey of atomic clocks based on coherent population trapping[J], Laser & Optoelectronics Progress 2006, 43(5): 9-13.  
蔡惟泉. 相干布居囚禁原子钟的发展概况[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 9-13.
- Lü Liqiang, Du Runchang, Liu Chaoyang, *et al.*. Laser frequency stabilization of coherent population trapping atomic frequency standard realized with digital servo[J], Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1411-1415.  
吕利强,杜润昌,刘朝阳,等. 数字伺服实现相干布居囚禁原子频标的激光稳频[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1411-1415.
- Zhang Peng, Dai Teli, Liang Yiping, *et al.*. Optimization of pump pulses in a vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402001.  
张 鹏,戴特力,梁一平,等. 垂直外腔面发射激光器抽运脉冲的优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402001.

- 8 Wen Xin, Liu Zhi, Wang Jieying, *et al.*. The measurement of simulative weak magnetic field with a cesium magnetometer based on coherent population trapping[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2013, 19(4): 312–316.  
温 馨, 刘 智, 王杰英, 等. 相干布居俘获铯原子磁强计对模拟弱磁场的测量[J]. *量子光学学报*, 2013, 19(4): 312–316.
- 9 J Vig. Military applications of high accuracy frequency standards and clocks[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 1993, 40(5): 522–527.
- 10 M Rosenbluh, V Shah, S Knappe, *et al.*. Differentially detected coherent population trapping resonances excited by orthogonally polarized laser fields[J]. *Opt Express*, 2006, 14(15): 6588–6594.
- 11 V Shah, S Knappe, P D D Schwindt, V Gerginov, *et al.*. Compact phase delay technique for increasing the amplitude of coherent population trapping resonances in open lambda systems[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(15): 2335–2337.
- 12 Y Y Jau, E Miron, A B Post, *et al.*. Push-pull optical pumping of pure superposition states[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(16): 160802.
- 13 V Shah, S Knappe, L Hollberg, *et al.*. High-contrast coherent population trapping resonances using four-wave mixing in Rb87[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(10): 1244–1246.
- 14 S V Kargapolsev, J Kitching, L Hollberg, *et al.*. High-contrast dark resonance in  $\sigma^+ - \sigma^-$  optical field[J]. *Laser Phys Lett*, 2004, 1(10): 495–499.
- 15 G Kazakov, B Matisov, I Mazets, *et al.*. Pseudoresonance mechanism of all-optical frequency-standard operation[J]. *Phys Rev A*, 2007, 72(6): 063408.
- 16 T Zanon, S Guerandel, E de Clercq, *et al.*. High contrast ramsey fringes with coherent-population trapping pulses in a double lambda atomic system[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(12): 193002.
- 17 A V Taichenachev, V I Yudin, V L Velichansky, *et al.*. On the unique possibility of significantly increasing the contrast of dark resonances on the D1 line of  $^{87}\text{Rb}$ [J]. *JETP Lett*, 2005, 82(7): 398–403.
- 18 Yang Jing, Liu Guobin, Gu Sihong. Experimentally studying the scheme on exciting coherent population trapping resonances with lin//lin configuration[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(4): 043202.  
杨 晶, 刘国宾, 顾思洪. 平行线偏光激发 CPT 共振方案实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(4): 043202.

栏目编辑: 刘丰瑞