

两种激光器主从锁频产生 $\text{lin} \perp \text{lin}$ 准双色光

屈苏平 张 奕 陈杰华 顾思洪

中国科学院武汉物理与数学研究所原子频标重点实验室, 湖北 武汉 430071

摘要 正交线偏振($\text{lin} \perp \text{lin}$)相干双色光作为光源可以用于实现性能较好的相干布居囚禁(CPT)原子钟。研究了用外腔式激光器(ECDL)出射光对受到微波调制的纵腔面发射激光器(VCSEL)产生的多色激光+1级边带注入锁频,用主从锁频激光系统实现 $\text{lin} \perp \text{lin}$ 准双色光束方案,进而研究了所获光束的特性以及与原子作用实现 CPT 共振的效果,获得一些有意义的结果。研究结果对于 CPT 原子钟研究有参考价值。

关键词 光谱学; 相干布居囚禁; 光注入锁定; 原子钟

中图分类号 O431.2; TH714.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602005

Lin \perp Lin Quasi-bichromatic Laser Produced by Master-Slave Injection Locking System Consisted of Two Types of Lasers

Qu Suping Zhang Yi Chen Jiehua Gu Sihong

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

Abstract Using the bichromatic laser whose two frequency components are linearly polarized with the polarization directions orthogonal to each other ($\text{lin} \perp \text{lin}$), a better performance coherent population trapping (CPT) based atomic clock can be realized. A laser system is realized, which is a master-slave injection locking configuration with an external-cavity diode laser (ECDL) as the master and a microwave modulated vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) as the slave by injection locking the +1st sideband of the output multichromatic laser, and the quasi-bichromatic laser beam is obtained. The behaviors of the obtained beam and the effects of applying it to generate CPT resonance with atoms are experimentally studied, and some meaningful results provide helpful reference to CPT atomic clock related studies.

Key words spectroscopy; coherence population trapping; optical injection locking; atomic clock

OCIS codes 140.3520; 020.1335, 020.1670; 030.1670

1 引 言

双色光场与三能级原子作用所实现的相干布居囚禁(CPT)共振可以获得窄线宽谱线^[1-2],利用窄线宽的CPT谱线可以实现原子钟和原子磁强计等仪器,因此CPT现象及其应用得到了广泛关注和研究^[3-6]。目前应用最多的CPT原子钟方案是采用纵腔面发射激光器(VCSEL)作为光源,用受微波调制的VCSEL输出的调频多色光束中的 ± 1 级边带作为所需的双色光,激光以圆偏振的状态与原子作用,探测与原子作用后的激光束获得所需信号,激光频率采用原子对多色光的多普勒(Doppler)展宽吸收谱线作为鉴频信号实现稳频^[7-10]。用这一方案实现的原子钟具有功耗低、体积小、成本低等优点,但也存在一些缺陷,如圆偏振光产生极化暗态原子从而降低了原子的利用率, ± 1 级边带之外的其他边带作为光本底噪声被探测从而降低了信噪比^[11],Doppler展宽吸收谱线作为激光频率稳频信号造成激光频率变化较大等,这些缺陷降低了原子钟的频率稳定度性能。

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(11304362, 11204351)

作者简介: 屈苏平(1988—),女,博士研究生,主要从事CPT铷原子钟研究。E-mail: qusuping945@126.com

导师简介: 顾思洪(1955—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事原子钟方面的研究。

E-mail: shgu@wipm.ac.cn(通信联系人)

针对以上缺点,平行线偏振(lin//lin)^[12]、推挽光抽运(push-pull)^[13]、四波混频(FWM)^[14]和正交线偏振(lin⊥lin)^[15]等各种不同的方案已被提出和研究,这些方案通过各自途径不同程度地对以上缺陷实施改进。Lin⊥lin方案与lin//lin方案^[12]相比不要求与第一激发态精细结构能级的下能级态实施CPT共振,对于微小型CPT原子钟更易于实施激光频率稳频;与push-pull方案^[13]相比无需通过延长光程实现偏振光分量的位相延迟,与FWM方案^[14]相比不需要用滤光泡消除杂散光,因此有利于实现体积更小的原子钟物理系统。本课题组在lin⊥lin方案研究上取得了一些进展,验证了芯片准双色光源方案^[16-18],相关技术已获得发明专利^[19-20]。本课题组之前所开发的技术^[19-20]虽然在消除极化暗态原子和信号的光本底噪声方面有较好效果,但因沿用Doppler展宽谱线实施稳频,因此激光频率变化范围仍然偏大。为了评估激光频率变化范围对CPT信号质量的影响,本文采用多普勒自由(Doppler-free)谱线实施稳频开展了相关实验研究,并与Doppler展宽谱线稳频的效果进行比较。

2 实验设置

实验沿用本课题组之前研究的主从激光注入锁频方案^[17],但是将实验设置中的主激光器VCSEL改为外腔式激光器(ECDL)(Toptica, DL100),将通过原子对激光的Doppler展宽吸收谱线对主激光器实施稳频改为饱和吸收设置(SAS)产生的Doppler-free谱线对主激光器实施稳频。从激光器仍用VCSEL,直流(DC)电源(Keithley model 6220)输出的DC与微波源(Agilent N5183A)提供的微波通过偏置器(Bias-Tee)耦合驱动VCSEL,在受微波调制的电流驱动下VCSEL输出调频多色光,实验装置如图1所示。实验用⁸⁵Rb作为工作原子,调制方案采用全波调制,即用与⁸⁵Rb基态两超精细能级共振、频率约为3.0 GHz的微波调制电流。实验中始终采用浅幅调制,使从激光器的输出光的±1级边带与基频幅度之比大致如图1插图所示。

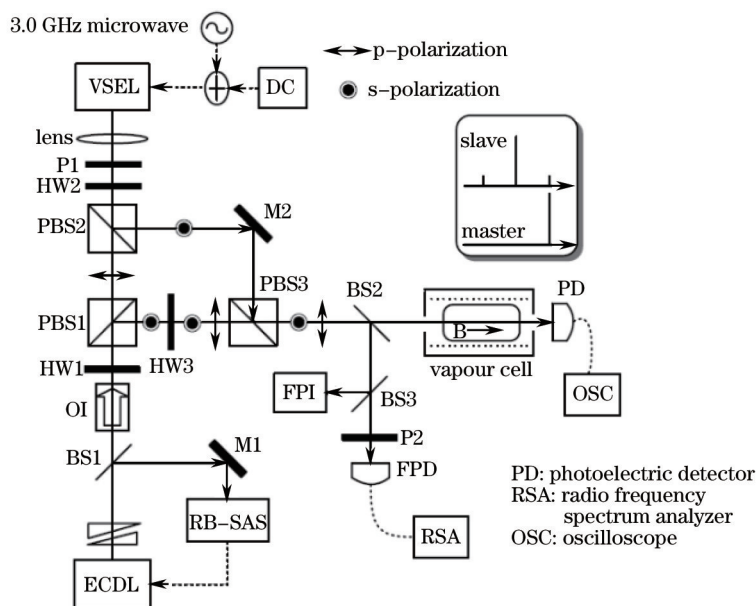


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

ECDL输出线偏振椭圆形光斑激光束,激光宽度约为1 MHz。光束经整形棱镜转换为圆斑,经光束分束器(BS1)反射约20%光强输入SAS,SAS输出⁸⁵Rb的D1线 $5S_{1/2}, F=2$ 至 $5P_{1/2}, F'=(2, 3)$ 能级跃迁的Doppler-free交叉谱线所获得的稳频信号,将ECDL输出激光频率稳定在2 MHz范围内。BS1的透射光束经光隔离器(OI)(Thorlabs IOT-5-780-VLP)、1/2波片(HW1)入射偏振分束棱镜(PBS1),经PBS1的透射、反射光束强度通过调整HW1角度分配。PBS1的透射光束经PBS2、HW2后,由偏振片(P1)(Thorlabs LPVIS050)选出,并与VCSEL输出光相同的p偏振分量作为种子光注入VCSEL。本实验取种子光的频率与从激光器输出光的+1级(或-1级)边带频率相吻合时对从激光器实现注入锁频。PBS1的反射部分经HW3旋转偏振方向后入射PBS3,PBS3透射光束用于开展实验。

从 PBS2 透射的主激光器输出光束经 HW2, 其偏振方向发生改变, 一部分光经过 P1 作为种子光进入从激光器, 但是 HW2 也使得从激光器输出的 s 偏振光束的偏振方向发生旋转, 造成经 PBS2 反射输出的光束的强度与输入光相比有一定程度的减弱。由 PBS2 反射而输出的光束经反射镜 M2、PBS3 反射, 与经 PBS3 的透射主激光器输出光束会聚构成 lin⊥lin 光束。因为从激光器输出的是浅幅调制的调频光, 如图 1 插图所示从激光器输出光的主要光能集中在基频, 而主激光器输出幅度与从激光器的基频幅度接近的单色光, 其光频则与 +1 级(或 -1 级)边带频率相同, 这样合成的光束的光能绝大部分集中在合成光束的两个频率成分, 因此所构成的是 lin⊥lin 准双色光束。

采用扫描法布里-珀罗干涉仪(FPI)监测各频率成分, 通过 HW3 调整双色光中主激光器输出光的强度, 使其两个主要频率成分的 FPI 干涉峰的幅度大致相等。对于所获得的 lin⊥lin 准双色光束, 实验中通过选偏器 P2 从两偏振光成分中选出相同偏振分量输入 EOT 公司的高速光电二极管(FPD)(ET-4000), 通过拍频信号研究光束的相干特性; 还研究了 lin⊥lin 准双色光束与原子蒸气泡中的原子作用, 针对原子钟应用开展了 CPT 共振研究。CPT 共振实验所用圆柱形原子泡直径 $\Phi=25$ mm, 长 $L=8$ mm, 泡内充天然 Rb 和压强为 3.7 kPa 的缓冲气体 N₂, 泡置于螺线管内, 螺线管为原子提供约 3.5 μ T 磁场, 螺线管外坡莫合金磁屏蔽减少外界电磁场的干扰, 工作时对原子泡实行单独控温, 实验在泡温控于 65 $^{\circ}$ C 条件下进行。

3 实验结果与讨论

根据 FPI 所观测的 ± 1 级边带与 0 级边带光幅度之比(载波比)调整输入微波的功率, 在实验中 DC 保持 1.9 mA, 为了使“准双色”微波功率保持在约 -10 dBm, 由 FPI 监测判断载波比要保持在预定的 95% 左右。注入率 [$10\lg(P_{inj}/P_{slave})$] 是影响锁定效果的重要参数之一^[21], 通过 HW1、HW2 调整注入率, 对注入率与对应的注入锁定范围作了系统实验。图 2 是当主激光器输出光频率与从激光器输出光的 +1 级边带频率相同, 对从激光器实现注入锁频时, 改变从激光器输出光的频率而观测到的从激光器输出光保持被锁频的范围, 实验结果说明在以 -14 dB 为中心的约 2 dB 范围内, 通过注入锁频控制范围超过 800 MHz, 与本课题组之前用线宽相同激光方案^[18]实现的锁频控制范围相当。

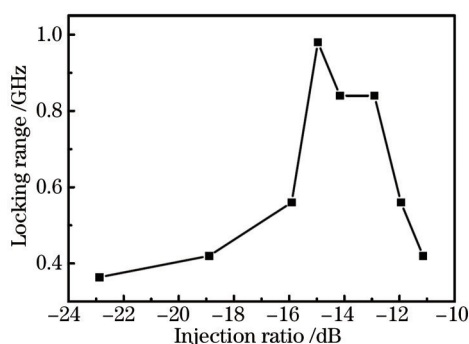


图 2 对 +1 级边带实施注入锁频时测得的注入率对应的锁频范围

Fig.2 Injection locking range versus the injection ratio when the +1-order sideband is injection locked by the master laser

为了掌握所获双色光的相干特性, 在注入率为 -14 dB 条件下, 用 P2 选出 lin⊥lin 光两垂直偏振分量的相同偏振成分输入 FPD, 图 3 给出探测记录光电信号最强拍频效果时的频谱图, 作为对比还给出了同样条件下在 PBS1、PBS2 之间截断光束时所记录光电信号的频谱图, 可见注入锁频时两激光器的输出光之间具有良好的相干性, 两频率之间的拍频信号幅度较两独立激光信号强约 30 dB, 与文献[18]得到的增强效果基本一致。

用所获得的 lin⊥lin 准双色光开展了 CPT 共振效果的研究, 因为采用 Doppler-free 谱线稳频, 激光频率仅在几兆赫兹范围内变化, 从实验记录的 CPT 谱线可见幅度长期保持基本不变。然而, 当采用的热运动原子对 VCSEL 输出多色光的 Doppler 展宽吸收谱作为鉴频信号实施激光频率稳频, 鉴频信号线宽达 800 MHz, 因此将频率变化范围稳定在 300 MHz 范围就认为是可接受的稳频效果。为了确定两种稳频方案在 CPT 信号上造成的差异, 实验中切断对主激光器的稳频负反馈控制信号输入, 在主激光器输出频率缓慢漂移的过程中借助 FPI 监测激光频率变化量, 同时记录了在不同频率变化量时的 CPT 信号。图 4 给出了激光频率变化约

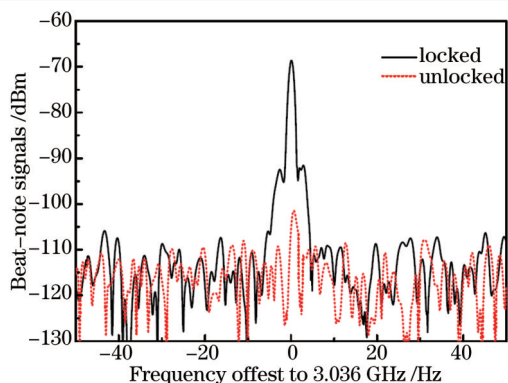


图3 锁频与未锁频条件下拍频信号

Fig.3 Spectra of beat-note signal at 3.036 GHz measured with (solid) or without (dashed) optical injection

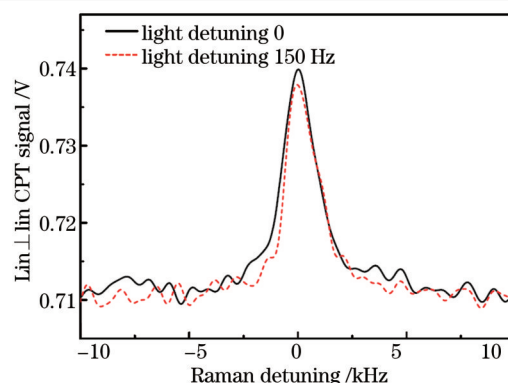


图4 不同光失谐量的CPT谱线对比

Fig.4 Comparison of CPT spectral lines recorded at different light detuning

150 MHz时记录的CPT谱线,作为对比还给出了主激光器处于稳频时记录的谱线,两谱线幅度约7%的差别大致反映出采用Doppler展宽谱线的稳频条件下CPT信号幅度变化的程度,说明通过改善稳频质量可获得强度更稳定的CPT信号。研究lin⊥lin双色光源的主要目的是为CPT原子钟探索高性能光源,以上结果说明更佳稳频效果可以获得性能更稳定的CPT信号,应用于原子钟有利于改善其频率稳定度。

4 结 论

利用lin⊥lin双色光可以获得高性能的CPT原子钟、CPT原子磁场计等CPT相关设备。研究了用ECDL作为主激光器,用Doppler-free谱线对主激光器输出激光实现稳频,用ECDL输出的线宽约为1 MHz的激光对输出线宽为100 MHz的VCSEL实施注入锁频,用两台激光器的输出光构成了lin⊥lin准双色光束的方案,获得了所需两光频成分的光强之和占总光强95%的lin⊥lin准双色激光束。对所获光束的相关特性进行实验研究,研究结果表明:主激光可以在800 MHz的频率变化范围内实现对从激光器稳定地注入锁频,lin⊥lin准双色光的两主要光频成分之间相干性较强,采用对窄线宽激光器稳频可实现频率更稳定的双色相干光,应用于CPT相关设备可提供性能更佳的CPT信号。为CPT相关器件探索更佳光源器件提供了有参考价值的研究结果。

参 考 文 献

- 1 E Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy[J]. Progress in Optics, 1996, 35: 257-354.
- 2 R Wynands, A Nagel. Precision spectroscopy with coherent dark states[J]. Applied Physics B, 1999, 68(11): 1-25
- 3 Shangqing Liang, Guoqing Yang, Yunfei Xu, *et al.*. Simultaneously improving the sensitivity and absolute accuracy of CPT magnetometer[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6837-6843.
- 4 E Breschi, Z D Grujic, P Knowles, *et al.*. A high-sensitivity push-pull magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(2): 023501.
- 5 Yuichiro Yano, Shigeyoshi Goka. High-contrast coherent population trapping based on crossed polarizers method[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 61(12): 1953-1960.
- 6 V I Yudin, A V Taichenachev, D I Sevostianov, *et al.*. Feedback spectroscopy of atomic resonances[J]. Physical Review A, 2013, 87(6): 063806.
- 7 J Kitching, S Knappe, N Vukicevic, *et al.*. A microwave frequency reference based on VCSEL driven dark line resonances in Cs vapor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6): 1313-1317.
- 8 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.
- 9 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Qunli, *et al.*. VCSEL pumped compact wide-temperature Nd: YAG laser and grazing-incidence amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602003.
于真真,侯 霞,周群立,等.垂直腔面发射激光器抽运小型宽温Nd:YAG激光器及掠入射式放大器的研究[J].中国激光,

- 2013, 40(6): 0602003.
- 10 Zhang Yan, Zhang Yi, Yin Yi, *et al.*. Optimization of light frequency shift characteristics 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.
- 11 A Nagel, S Brandt, D Meschede, *et al.*. Light shift of coherent population trapping resonances[J]. Europhysics Letters, 1999, 48(4): 385-389.
- 12 S A Zibrov, V L Velichansky, A S Zibrov, *et al.*. Experimental investigation of the dark pseudoresonance on the D1 line of the 87Rb atom excited by a linearly polarized field[J]. JETP Letters, 2005, 82(8): 477-481.
- 13 Y Y Jau, W Happer. Push-pull laser-atomic oscillator[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(30): 223001.
- 14 V Shah, S Knappe, L Hollberg, *et al.*. High-contrast coherent population trapping resonances using four-wave mixing in ⁸⁷Rb[J]. Optics Letters, 2007, 32 (10): 1244-1246.
- 15 T Zanon, S Guerlandel, E de Clercq, *et al.*. High contrast ramsey fringes with coherent-population-trapping pulses in a double lambda atomic system[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(19): 193002.
- 16 Peter Yun, Bozhong Tan, Wei Deng, *et al.*. High coherent bi-chromatic laser with gigahertz splitting produced by the high diffraction orders of acousto-optic modulator used for coherent population trapping experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12): 123104.
- 17 Peter Yun, Bozhong Tan, Wei Deng, *et al.*. Quasi-bichromatic laser for a lin⊥lin coherent population trapping clock produced by vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(9): 093111.
- 18 Bozhong Tan, Peter Yun, Jing Yang, *et al.*. A chip scale lin⊥lin quasi-bichromatic laser scheme[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102: 161117.
- 19 Tan Bozhong, Yun Enxue, Gu Sihong. The Device of Coherent Bichromatic Light Source and the Preparation Method of Coherent Bichromatic Light: China, ZL201210082124.X[P]. 2014-03-26.
谭伯仲, 云恩学, 顾思洪. 相干双色光源装置及相干双色光的生成方法: 中国, ZL201210533439.1[P]. 2014-03-26.
- 20 Tan Bozhong, Yun Enxue, Gu Sihong. The Device of Coherent Bichromatic Light Source with Dual Modulation and Mutual Injection Locking: China, ZL201210533439.1[P]. 2014-11-05.
谭伯仲, 云恩学, 顾思洪. 双调制互注入的相干双色光源生成装置: 中国, ZL201210533439.1[P]. 2014-11-05.
- 21 Erwin K Lau, HyukKee Sung, Ming C Wu. Frequency response enhancement of optical injection-locked lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(1): 90-99.

栏目编辑: 张 雁