

文章编号: 1007-6654(2013)04-0312-05

相干布居俘获铯原子磁强计对模拟弱磁场的测量

温馨, 刘智, 王杰英, 刁文婷, 何军, 王军民[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室; 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 相干布居俘获(CPT)磁强计是基于原子系综中相干布居俘获相干叠加暗态使用全光学的方法对磁场进行测量, 具有较高的精度。实验中使用注入锁定的方法得到频率差严格等于铯原子基态超精细分裂间距的两束大频差位相锁定的双色激光, 观察到了铯原子气室中的 CPT 透射信号。给铯泡加入沿激光传播方向的纵向磁场, 可观察到变宽或分裂的 CPT 信号, 通过对分裂间距的测量便可得到待测磁场值。对于中等强度的磁场, 可通过透射峰的裂距直接得到待测磁场值; 弱磁场区域则可通过电流与磁场的对应关系得到。目前, 实验中可测量 nT 量级的稳定磁场。

关键词: 相干布居俘获; 原子磁强计; 弱磁场测量; 铯原子

中图分类号: O431

文献标识码: A

doi: 10.3788/ASQO20131904.0312

0 引言

高精度的原子磁强计作为一种新的探测仪器在弱磁场的测量领域发挥着重要的作用。自其问世以来, 已经在医学、军事、地球物理、工业检测等方面得到了很好的应用。原子磁强计在测量精度不断提高的同时, 已开始逐渐向小型化、低功耗、便携化的趋势发展。不同原子磁强计由于其工作原理的差异也表现出各自的特点。相干布居俘获(Coherent Population Trapping, 简称 CPT)磁强计是利用全光学的方法对弱磁场进行测量。通过将位相相干的双色激光所形成的光场与原子的三能级系统相互作用, 利用光学共振的方法可以

实现磁场的测量。Scully 等曾预言, CPT 磁强计测量磁场的极限分辨能力可达 $0.01fT$ ^[1]。在实验上, 国内外的多个小组已在不同精度条件下分别实现了对稳定磁场和变化磁场的测量, 并对 CPT 磁强计的小型化做出了尝试^[2-4]。

1 实验原理与实验装置

相干布居俘获磁强计是利用原子的三能级系统与两相干光场相互作用的 CPT 效应。原子的两超精细分裂基态与某一共同的激发态构成一套三能级系统。两束频率差等于原子基态超精细分裂能级差且位相严格相干的激光对原子进行作

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(项目批准号: 61227902, 11274213, 61205215); 国家重大科学研究计划(编号: 2012CB921601); 国家自然科学基金创新群体项目(项目批准号: 61121064); 山西省回国留学人员科研经费(2012-015); 山西省太原市科技明星专项(12024707)的部分。其中温馨为参加科研训练的山西大学物理与电子工程学院物理基地本科生, 受到国家自然科学基金大学生人才培养基金项目(J1103210)的部分资助。

作者简介: 温馨(1990—), 女, 山西太原人, 物理学基地本科生, 已推免硕士研究生, 研究领域: 量子光学。E-mail: wenxin0023@163.com

[†]通讯作者: 王军民, E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

用,原子将会布居在基态两超精细分裂能级的相干叠加暗态上,其透射信号为一个尖锐的透射峰。

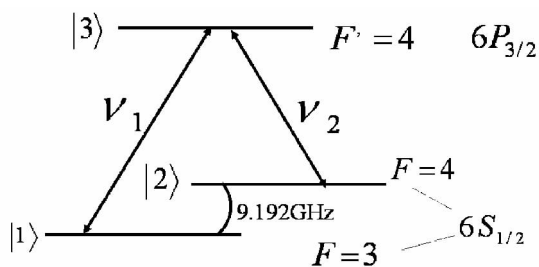


图1 Cs原子型三能级系统
Fig. 1 Λ shaped three-level system of Cs atoms

当有微弱外磁场扰动时,原子磁矩与磁场的作用会产生附加能量。

$$\Delta E = m_F g_F \mu_B B \quad (1)$$

这将使原子能级产生分裂,即塞曼效应。对于实验中选择的铯原子基态 $6S_{1/2} (F_g = 3, F_g = 4)$ 和激发态 $6P_{3/2} (F_e = 4)$ 所组成的系统,经磁场作用后,原子各能级发生塞曼分裂。使用两束相同偏振的圆偏光形成的光场与其作用,将形成7套“ Λ 型”三能级系统,对应的CPT信号为加宽及分裂的透射峰。

实验中使用注入锁定的方法产生两束位相相干光来构成光场^[5]。主激光器为光栅扩展腔半导体激光器(Extended-Cavity Diode Laser, ECDL),使用偏振光谱及反馈回路对其进行锁频,将其锁定在Cs原子基态 $6S_{1/2} (F_g = 3)$ 到激发态

$6P_{3/2} (F_e = 4)$ 的跃迁线上。被动激光器通过 Bias-Tee 在其射频调制端口加一个 9.2 GHz 的射频调制,产生正负一级边带。将主激光器分一部分光注入被动激光器的正一级边带,在一定范围内被动激光器与主激光器位相跟随,此时,被动激光器的载波正好处于Cs原子基态 $6S_{1/2} (F_g = 4)$ 到激发态 $6P_{3/2} (F_e = 4)$ 的超精细跃迁线上。这样就产生了两束位相相干,频率差严格等于Cs原子基态超精细分裂能级间隔的光。通过 $\frac{\lambda}{4}$ 片,将线偏振光变为圆偏振,再经过望远镜系统进行扩束,照射磁屏蔽筒中的Cs泡,观察其透射信号。

为较好的消除地磁及实验室其他杂散磁场的影响,实验中使用由具有高磁导率的坡莫合金制成的4层磁屏蔽筒,其标称的剩余磁场约为1nT。磁场由紫铜密绕的螺线管提供,其中心区域可看作是均匀磁场。

2 实验结果与分析

通过给螺线管加电流,螺线管内部中心区域将产生均匀的轴向磁场,其沿光线的传播方向,称为纵向磁场。改变电流的大小即改变了相应的磁场值。

在中等强度磁场作用下,由于其与原子磁矩的相互作用,原子的超精细能级进一步分裂,出现塞曼效应。实验中使用的两束位相相干的激光具有相同的光强,且同为偏振为 σ^- 的圆偏光。

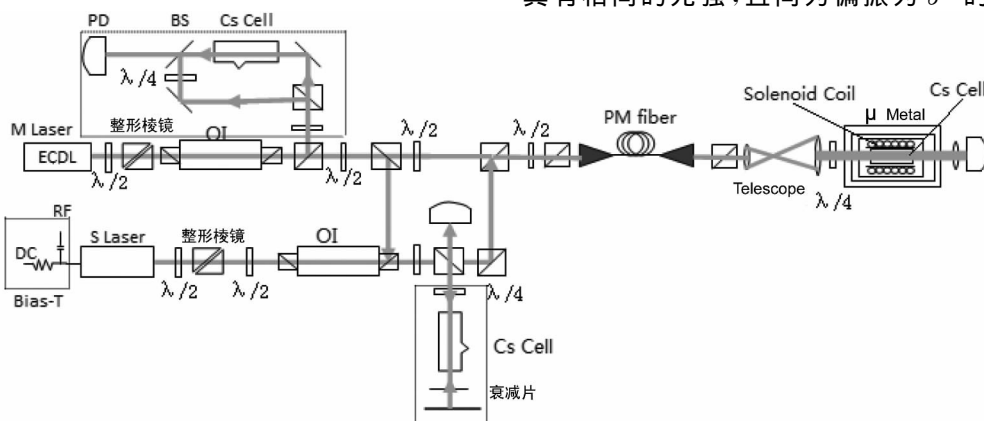


图2 CPT Cs原子磁强计实验装置图
Fig. 2 Experimental setup of CPT Cs atom magnetometer

我们在之前的 CPT 实验中曾验证了两束相干光光强对 CPT 信号的影响^[6],当两束激光光强相等时,可以得到最好的 CPT 信号。这同时也是使用注入锁定方法获得大频差、位相相干的双色激光场的优点,两台激光器可分别调节两束激光的光强。

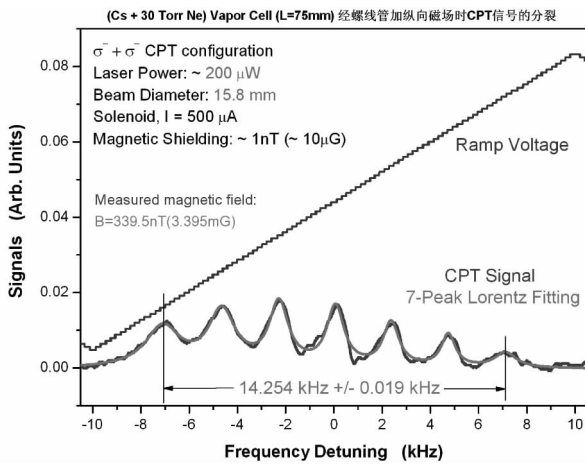


图 3 中等强度轴向磁场中的 CPT 分裂信号

Fig. 3 CPT splitting signal in medium axial magnetic field

将实验数据导入 Origin 中,为减小系统误差,使用 7 峰 Lorentz 拟合,从拟合结果可以准确读出各个透射峰的位置,从而得到分裂间距。

磁场值可由(1)式计算推得。

$$B = \frac{h \Delta\nu}{m_F g_F \mu_B} = \frac{\Delta\nu}{m_F \gamma} \quad (2)$$

其中 $\gamma = \frac{g_F \mu_B}{h} = 3.5 \text{ Hz/nT}$,称为旋磁比。

由于磁场与分裂间距的线性关系,只要测得 CPT 透射峰的分裂间距,即可得到相应的磁场值。

当螺线管内磁场较弱时,无法观察到分裂的 7 个透射峰,其透射信号为单个加宽的 CPT 透射峰。典型的 CPT 信号如下图所示。

当所加的磁场较弱时,由磁场所引起的塞曼分裂的间距也相应减小,各个峰虽然相互错开,但无法严格区分,所观察到的加宽的透射峰应为 7 峰彼此重合所构成的包络。使用单峰 Lorentz 拟合,可以得到线宽值。

在这一区域,无法通过分裂间距得到待测磁

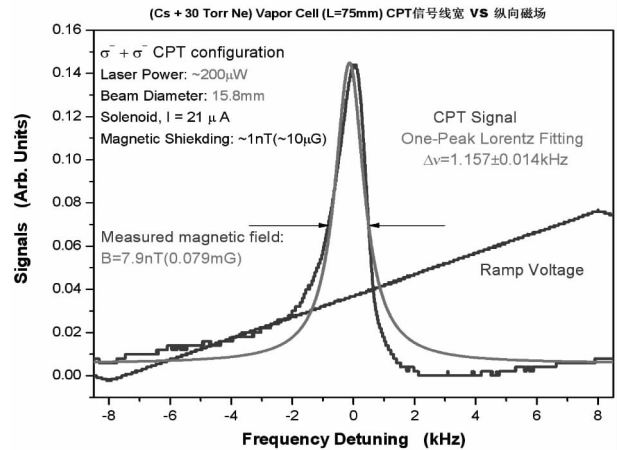


图 4 轴向弱磁场中的 CPT 信号

Fig. 4 CPT signal in weak axial magnetic field

场值。由于螺线管内部磁场与所加电流成正比,可通过分裂区域的电流——磁场对应关系扩展到整个测量范围,得到相应的线宽与磁场的关系。

下图即为整个磁场区域内线宽及分裂间距与磁场的对应关系,即实现了对螺线管轴向弱磁场的模拟测量。

$$B(\text{nT}) = 44.86 \times \nu(\text{kHz}) - 43.97 \quad (3)$$

$$B(\text{nT}) = 23.82 \times \Delta\nu(\text{kHz}) \quad (4)$$

3 磁强计特性的评估

对于真实磁场,其方向无法确定。在实际测量中,往往需要矢量磁强计。矢量磁强计含三对相互垂直的传感器,将各自的测量结果进行矢量叠加即可同时得到磁场的大小和方向。

由于实验条件的限制,我们只对加纵向磁场的情况进行了模拟,从理论上对加横向磁场的情况进行了分析。在稳态条件和粒子数守恒的条件下,求解密度矩阵方程组。对于之前所选择的跃迁,当加上垂直光线传播方向的横向磁场时,将会产生 8 个透射峰。由此可以推测,当磁场与探测光方向有一定夹角时,将会看到 15 个透射峰。Wynands 小组在实验上观察到了以上现象^[7],使这一理论得到了验证。

不同磁场方向得到不同数量透射峰的结论也为我们测量磁场提供了一种新的思路。可以

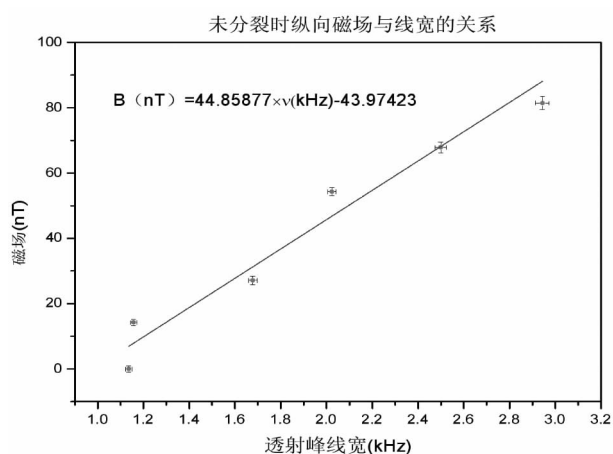


图5 磁场较弱时,单峰的CPT线宽与磁场的关系
Fig. 5 In weak magnetic field, relationship between linewidth of single-peak CPT signal and magnetic field

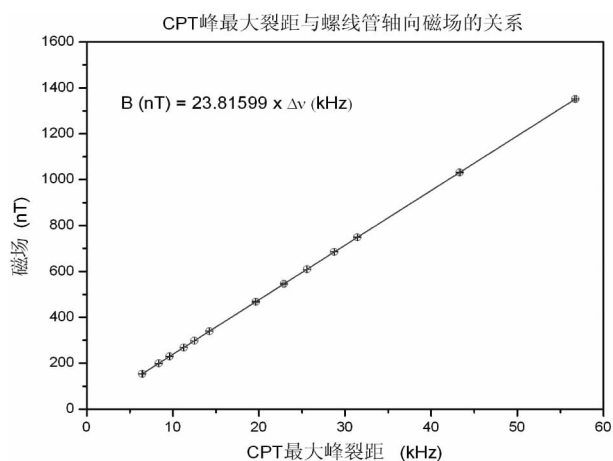


图6 中等强度磁场中CPT峰最大裂距与磁场的关系
Fig. 6 In medium magnetic field, relationship between maximum splitting of CPT peaks and magnetic field

通过转动平台,使探测光与铯原子蒸汽室共同相对于待测样品转动一定角度。当观察到的透射峰为7个时,即可认为此时样品处的磁场为纵向磁场。通过标定平台转过的角度来得到待测磁场的方向。

磁强计的精度由其测量的准确度、分辨率及灵敏度决定^[8]。对于CPT磁强计,其测磁的主要误差来源于地磁和周围杂散磁场的影响。另一方面,在弱磁场区域,由于透射峰未发生分裂,线宽为确定磁场值的主要依据,与分裂间距略有不同。因此,光强、温度以及铯泡内缓冲气体的分

压都会对测量的准确度造成影响。通过使用充有缓冲气体的铯泡可以有效地压窄CPT线宽,增大信号幅值^[9],从而提高了信噪比,减小了实验误差。

磁强计的分辨率是对稳定磁场的最小区分程度的评估。另一方面则是指其空间分辨率,一般可通过减小铯泡体积来提高。灵敏度主要反映对磁场变化的响应,是对磁场短时间的快速变化的量度。目前,实验中灵敏度最高的CPT磁强计为Kitching小组的芯片级磁强计,其探测灵敏度约为 $50 \text{ pT}/\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$ ^[10]。

我们的实验中目前还无法对迅速变化的磁场有足够的响应,实验测得的磁场为稳定磁场。在当前的实验条件下,可测得nT量级的弱磁场。由于磁屏蔽筒内剩余磁场的影响,目前所测得的最小磁场约为6.9 nT。

4 总结与展望

利用原子在光场中的相干布居俘获效应,在实验上实现了对弱磁场的测量。使用光学注入锁定的方法,产生两束位相相干,频率差等于铯原子基态超精细分裂能级差的激光,观察到了与光作用后的透射信号。通过给铯泡加一沿光线传播方向的磁场,观察到了在纵向磁场中由塞曼效应引起的线宽加宽及分裂的透射信号,得到了线宽和分裂间距与磁场的对应关系。

进一步的实验设想是通过改变铯泡形状及减小体积来提高空间分辨率。同时,在铯泡两端面镀膜,使光束在泡内多次反射来增加与激光作用的原子数。Romalis小组已经在实验上对这一方案进行了尝试^[11]。另外,通过较好的磁场补偿系统及更高的原子数密度,可以达到原子的SERF态,即可在一定程度上更大幅度的提高测磁的灵敏度,以实现生物磁场的测量。如果使用小体积的垂直腔面发射激光器(VCSEL),对其电流进行直接调制,产生的正负一级边带即具有恒定的位相差,可作为CPT双色激光场的光源,使CPT磁强计的小型化成为可能。

参考文献:

- [1] SCULLY M O, FLEISCHHAUER M. High-sensitivity Magnetometer Based on Index-enhanced Media [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**: 1360-1363.
- [2] NAGEL A, GRAF L, NAUMOV A, *et al.* Experimental Realization of Coherent Dark-state Magnetometers [J]. *Europhys Lett*, 1998, **44**: 31-36.
- [3] PRADHAN S, MISHRA S, DAS A K. A Non-scanning Atomic Magnetometer Based on Coherent Population Trapping, arXiv: 1303. 5589. [J].
- [4] LIU G B, GU S H. Experimental Study of the CPT Magnetometer Worked on Atomic Energy Level Modulation [J]. *J Phys B*, 2010, **43**: 035004.
- [5] DIAO W T, HE J, LIU Z, *et al.* Alternative Laser System for Cesium Magneto-optical Trap Via Optical Injection Locking to Sideband of a 9-GHz Current-modulated Diode Laser [J]. *Opt Express*, 2012, **20**: 7480-7487.
- [6] 刘智, 刁文婷, 王杰英 等. 铯原子气室中相干布居俘获的参数依赖关系研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**: 233201.
- [7] WYNANDS R, NAGEL A, BRANDT S, *et al.* Selection Rules and Line Strengths of Zeeman-split Dark Resonances [J]. *Phys Rev A*, 1998, **58**: 196-203.
- [8] 张昌达. 量子磁力仪研究和开发近况 [J]. *物探与化探*, 2005, **29**: 283-287.
- [9] LIU Z, WANG J Y, DIAO W T, *et al.* Characterizing Passive Coherent Population Trapping Resonance in a Cesium Vapor Cell Filled with Neon Buffer Gas [J]. *Chin Phys B*, 2013, **22**: 043201.
- [10] SCHWINDT P D D, KNAPPE S, SHAH V, *et al.* Chip-scale Atomic Magnetometer [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**: 6409-6411.
- [11] SHENG D, LI S, DURAL N, *et al.* Subfemtotesla Scalar Atomic Magnetometry Using Multipass Cells [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **110**: 160802.

The Measurement of Simulative Weak Magnetic Field with a Cesium Magnetometer Based on Coherent Population Trapping

WEN Xin, LIU Zhi, WANG Jie-ying, DIAO Wen-ting, HE Jun, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Tai Yuan 030006, China)

Abstract: Coherent population trapping (CPT) magnetometer is based on coherent population trapping coherent dark states, using an all-optical method to measure the magnetic field with high accuracy. In our experiment, we used the method of injection locking to get the two color lasers with locked phase and large frequency difference, which equald to the hyperfine splitting of the cesium atoms' ground states, and observed the CPT transmission signals. We added the longitudinal magnetic field which was along the laser propagation direction, and observed the widen CPT transmission peak and the splitting signals. For the magnetic field of medium intensity, we got the magnetic field value by measuring the splitting spacing, and for the weak region, the value could be obtained by the relation of current and magnetic field. In our experiment, we could measure the static field with several nT .

Key words: Coherent population trapping; atomic magnetometer; weak magnetic field measurement; cesium atoms