

基于激光偏振调制的全光 Cs 原子磁力仪研究

石 铭^{1,2}, 王 羚^{1,2}, 程泓勋^{1,2}, 张 樊^{1,2}

(1. 中国船舶重工集团公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 国防科技工业弱磁一级计量站, 湖北 宜昌 443003)

摘 要: 采取对激光左旋 $\sigma+$ 偏振态和右旋 $\sigma-$ 偏振态周期性调制产生共振的方法, 实现对 Cs 原子拉莫尔进动频率的检测, 取代了采用射频线圈产生共振的方法而实现了对磁场的全光检测, 从而避免了传统光泵原子磁力仪信号串扰的问题。展示了该方法对原子磁矩在磁场中进动频率的检测原理, 分析了该模式下的信号特征, 根据信号特征设计了对拉莫尔进动信号的检测和处理系统。同相信号显示为洛伦兹线形; 正交信号显示为色散线形, 在共振频率处大小为 0; 相位信号显示为连续单调递减函数, 在共振频率处大小为 0。正交信号和相位信号均可以用来锁定共振频率点, 实现磁场测量。

关键词: 原子磁力仪; bell-bloom; 拉莫尔频率; 全光检测

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0920001

Research of all-optical Cs atomic magnetometer by using modulation of laser's polarization

Shi Ming^{1,2}, Wang Ling^{1,2}, Cheng Hongxun^{1,2}, Zhang Fan^{1,2}

(1. No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China;
2. 1st Class Weak Magnetic Metering Station of NDM, Yichang 443003, China)

Abstract: Modulation of laser's left-handed and right-handed polarization was used in the paper. This method has realized all-optical detection of magnetic field and avoided cross talk existing in conventional atomic magnetometer. The detection principle of precession frequency of atomic magnetic moment in magnetic field was demonstrated based on the method, and the signal was analyzed, then the detection and processing system was designed based on the analysis. The in-phase signal was displayed as Lorenz lineshape. The quadrature signal was displayed as dispersion lineshape, and the magnitude was 0 at resonance frequency. The phase signal was displayed as monotonically decreasing function with frequency, and the magnitude was 0 at resonance frequency. Both the quadrature and phase signals can be used to lock resonance frequency and realize measurement of magnetic field.

Key words: atomic magnetometer; bell-bloom; Larmor frequency; all-optical detection

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-05-11

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(JSJL2017207C001)

作者简介: 石铭(1985-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光电检测方面的研究。Email: shiming104@163.com

0 引言

光泵原子磁力仪是通过测量原子磁矩在静磁场中的拉莫尔进动频率来测量静磁场的一种磁场标量测量仪器^[1]。共振光源用于极化原子使原子自旋取向产生宏观磁矩,然后,通过检测原子气体对共振光吸收系数来检测磁矩进动效应。光泵原子磁力仪(OPM)的早期研究可以追溯到 20 世纪 60 年代^[2-3],当时主要采用原子光谱灯作为泵浦光源。近年来,随着微加工工艺和小型半导体激光器研究的进展,采用激光作为泵浦光源的光泵原子磁力仪又成为研究热点^[4-6]。

对于传统的光泵原子磁力仪,在光泵浦作用下,偏振光与原子吸收线产生共振,打破了磁场中形成的塞曼子能级间的平衡,从而产生了原子的自旋极化及原子宏观磁矩。在光磁共振模式下,由射频线圈产生频率为 ν_{rf} 的波动磁场,该射频场驱动塞曼子能级间的跃迁,破坏了自旋极化,当 ν_{rf} 等于拉莫尔进动频率时,达到共振增强的效果^[7]。这也是目前商业光泵原子磁力仪所广泛采取的方法。上述采取 rf 场的光磁共振模式,可以理解为使 rf 场与极化原子的自旋进动同步。作为一种替代方法,自旋进动的同步可以采取调制泵浦光的方法予以实现^[8-9],如泵浦光振幅、频率或偏振的调制,从而实现全光检测模式。采取此种方法,没有振荡磁场作用于传感器探头,除了极化原子自身极弱的磁场之外,传感器本身不会产生任何场。这样可以有效地避免传感器探头之间的互相串扰,在多传感器的应用中(如梯度测量)有着显著优势。对光源进行调制的结构最早由 Bell 和 Bloom 提出^[3],由于没有外加射频振荡场产生的功率增宽,所以能有效地减小磁力仪线宽,从而提高灵敏度。

相比于使用原子光谱灯作为泵浦光源,半导体激光器表现出体积小、功耗低、线宽窄、波长单一等特点。S. Groeger 等人对比研究了使用原子光谱灯和半导体激光器作为泵浦光源的 Cs 原子磁力仪^[10],在相同的处理电路和制备工艺下,采用半导体激光器作为泵浦光源灵敏度更高。除了上述特点之外,半导体激光器通过控制温度和电流的变化容易对激光进行调制,可以取代外加射频线圈的方式,实现磁场的全光检测。

文中采取对激光偏振态进行调制使其与原子自旋进动保持同步的方法,并分析了该方法的基本原理,设计了信号检测与处理电路以实现其对拉莫尔频率的检测。

1 工作原理

在没有光泵浦作用时,¹³³Cs 原子基态 $F_g=3$ 和 $F_g=4$ 上的粒子数均匀分布,没有极化效果(如图 1 所示)。当有一束频率为 D1 线 $F_g=3 \rightarrow F_e=4$ 的左旋圆偏振光与铯原子作用时,根据跃迁选择定则,对于左旋圆偏振光只有满足 $\Delta m_f=+1$ 的两个塞曼子能级间可以产生跃迁,因此基态 $F_g=3$ 的粒子数会被泵浦至激发态 $F_e=4$ 上磁量子数高的能级上。由于激发态不稳定,粒子会通过自发辐射回落到基态 $F_g=3$ 和 $F_g=4$ 符合 $\Delta m_f=0, \pm 1$ 的塞曼子能级上。回落到基态 $F_g=3$ 上的粒子会由于光泵浦作用继续被泵浦至磁量子数高的能级上。最终 $F_g=3$ 上的粒子数会被抽空,全被泵浦至 $F_g=4$ 线上,并且在 $|F_g=4, m_f=4\rangle$ 塞曼子能级上的粒子数最多。从而使 $F_g=4$ 态上的粒子数分布不均匀,实现原子自旋的极化。而在右旋圆偏振光作用下,极化过程相反。

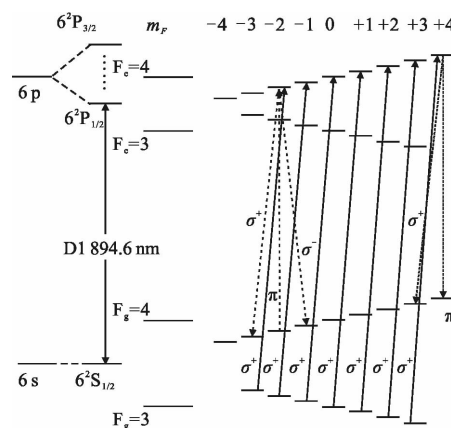


图 1 Cs 原子的超精细能级结构在外磁场中的塞曼能级分裂及其在 D1 线 $F_g=3 \rightarrow F_e=4$ 左旋圆偏振光作用下泵浦过程

Fig.1 Zeeman splitting of Cs atom's hyperfine level structure in magnetic field and pumping process under left-handed polarized light of Cs atom's $F_g=3 \rightarrow F_e=4$ transition level

静磁场 B 垂直于光线传播方向,如图 2 所示,在光泵浦作用下,原子气体介质在光线传播方向上产生自旋取向。开始时,激光为左旋 $\sigma+$ 圆偏振光,原子

气体产生与光传播方向相同的宏观磁矩 M , 如图 2(a) 所示, 经过半个拉莫尔周期后, 磁矩进动到图 2(b) 所示的位置(此处忽略横向弛豫作用)。此时, 如果激光变为右旋 σ^- -圆偏振光, 光泵浦作用产生与光传播方向相反的磁矩, 即对磁矩 M 有一个加强作用, 经过半个拉莫尔周期后, 激光再变回左旋 σ^+ -圆偏振光。此过程经过多个周期直到形成稳定, 得到一个绕磁场进动的磁矩常量。当激光偏振态在以拉莫尔进行频率切换时, 可以最有效地保护原子自旋极化态, 形成共振信号。

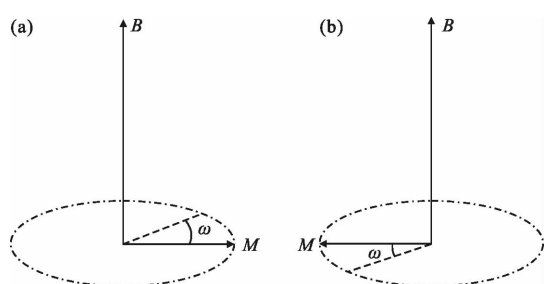


图 2 (a) 原子沿光束方向极化; (b) 极化磁矩经过半个拉莫尔周期

Fig.2 (a) Polarization of Cs atom in the direction of pumping light; (b) Polarized magnetic moment after half Larmor cycle

2 装置结构

系统主要由激光二极管、Cs 气室、光电二极管、激光控制电路、激光调制电路、加热电路等组成, 如图 3 所示。激光输出频率锁定在 Cs 原子 D1 线的 $F_g=4 \rightarrow F_c=3$ 跃迁能级上, 激光控制电路控制激光器的输入电流和加热功率, 用于调节激光器的输出波长并保持其稳定性。Cs 原子吸收室大小为 $\Phi 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, 填充有 300 torr (1 torr=133.32 Pa) 的氦气和 20 torr 的氮气。通过加热使吸收室达到并维持一定温度 (56 °C), 确保气室内原子数密度足够大, 对激光保持足够高的吸收率。调制信号经施密特触发器变为方波信号, 方波信号经驱动器作用于电光调制器 (EOM), 用于调制激光偏振态。当调制激光信号经 Cs 气室由光电二极管接受转化为电信号, 电信号经跨阻放大和解调器解调后, 可以得到鉴频信号用于判断是否产生共振, 再由控制器控制调制信号的大小直到形成共振。根据产生共振的调制信号即可以推导出原子自旋拉莫尔进动频率, 再由磁场与拉莫尔进动频率的

正比例关系 ($\omega_L = \gamma B$) 得到磁场大小。

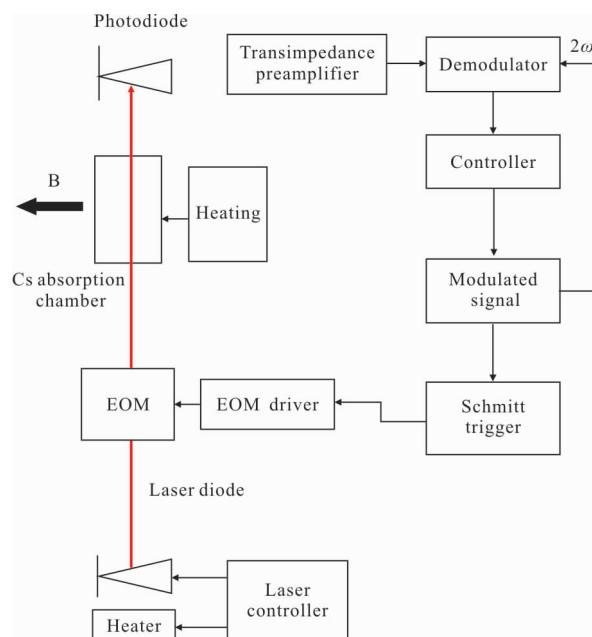


图 3 装置工作示意图

Fig.3 Schematic drawing of device

3 信号检测与分析

以磁场方向为 z 方向, 以光线传播方向为 x 方向。根据布洛赫方程可以得到:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} - \frac{1}{S} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: γ 为 Cs 原子旋磁比; S 为与原子气体的横向弛豫时间和光泵浦作用相关的常量; P_0 为光作用下原子磁矩极化速率。 P_0 的大小被激光偏振态变化所调制, 其具体表达式为:

$$P_0 = \begin{cases} +P, & \frac{2n\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{(2n+1)\pi}{\omega} \\ -P, & \frac{(2n+1)\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{(2n+2)\pi}{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为与激光光强相关的常量; ω 为激光调制频率。探测器检测 x 方向的光强, 其大小与 M_x 成正比, M_x 含有激光偏振调制频率信号, 通过锁相放大器 (LIA) 的解调作用, 得到信号的同相和正交分量为:

$$IP = I \frac{\Delta\gamma^2}{(\omega - \omega_L)^2 + \Delta\gamma^2} \quad (3)$$

$$QU = 2I \frac{\Delta\gamma(\omega_L - \omega)}{(\omega - \omega_L)^2 + \Delta\gamma^2} \quad (4)$$

式中： I 和 $\Delta\gamma$ 分别为共振振幅和线宽； ω 和 ω_L 分别为调制频率和拉莫尔频率。

图 4 和图 5 为在 2ω 的解调频率下得到的光电转换信号的同相分量、正交分量和相位大小。图 5 中的相位大小可以由锁相放大器读出，对应具体表达式为：

$$\varphi = \arctan(QU/IP) \quad (5)$$

线宽约为 1 050 Hz，激光光强、缓冲气体压强、磁场均匀性均会影响线宽，在后续会逐步调试改进；测试环境为屏蔽筒里面的螺线管线圈产生的复现磁场，噪声受到磁力仪自噪声和环境测试噪声的共同影响。同相分量和正交分量分别为洛伦兹线形和色散线形；相位信号显示为连续单调递减函数。在 $\omega = \omega_L$ 时产生共振，正交信号和相位信号在共振时为 0，因此可以用其锁定共振点。

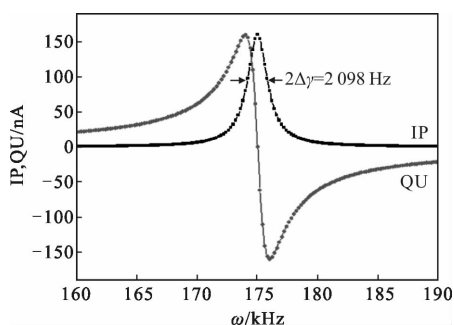


图 4 光电转换信号的同相分量(IP)和正交分量(QU),在 2ω 频率处解调

Fig.4 In-phase and quadrature signals of photodetector at 2ω 's demodulation frequency

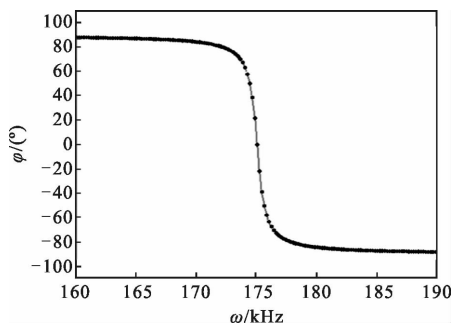


图 5 光电转换信号的相位大小,在 2ω 频率处解调

Fig.5 Phase signal of photodetector at 2ω 's demodulation frequency

4 结束语

文中研究采用对激光左旋 $\sigma+$ 偏振态和右旋

$\sigma-$ 偏振态周期性调制的方法完成对铯原子拉莫尔进动信号的检测,从而实现了磁场测量。采用激光调制产生共振的方法取代传统的采用射频线圈产生共振的方法,实现了对磁场的全光检测,避免了传统光泵原子磁力仪信号串扰的问题,在多探头测试中有着显著优势。通过理论分析设计了设备结构与信号处理系统,通过装置结构的搭建获取了光电转换器件的同相、正交和相位信号,并得到了产生共振时的信号特征。同相信号显示为洛伦兹线形;正交信号显示为色散线形,在共振频率处大小为 0;相位信号显示为连续单调递减函数,在共振频率处大小为 0。正交信号和相位信号均可以用来锁定共振频率点,实现磁场测量。

参考文献:

- [1] Happer W: Optical pumping[J]. *Rev Mod Phys*, 1972, 44(2): 169–249.
- [2] Arnold L Bloom. Principles of operation of the rubidium vapor magnetometer[J]. *Applied Optics*, 1962, 1(1): 61–68.
- [3] William E Bell, Arnold L Bloom. Optically driven spin precession [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 6 (6): 280–281.
- [4] Chen Xi, Quan Wei, Duan Lihong, et al. Design and realization of beam collimation system for semiconductor laser in atomic magnetometer[C]//SPIE, 2015, 9671: 967114.
- [5] Arach S, Ban G, Bison G, et al. Highly stable atomic vector magnetometer based on free spin precession[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22108–22115.
- [6] Fu Jiqing, Du Pengcheng, Zhou Qing, et al. Spin dynamics of potassium magnetometer in spin-exchange relaxation free regime[J]. *Chin Phys B*, 2016, 25(1): 010302.
- [7] Baranov A A, Ermak S V, Sagitov E A, et al. Double resonance frequency light shift compensation in optically oriented laser-pumped alkali atoms [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, 121 (3): 393–403.
- [8] Ricardo Jimenez-Martinez, W Clark Griffith, Wang Yingju, et al. Sensitivity comparison of Mx and frequency-modulated bell-bloom Cs magnetometers in a microfabricated cell [J]. *IEEE*, 2010, 59(2): 372–378.
- [9] Zhang Junhai, Xiang Kang, Mei Hongsong, et al. Realization and optimization of all-optical Cs atom magnetometer based on Bell-Bloom structure [J]. *Journal of Optoelectronics - Laser*, 2015, 26(2): 211–216. (in Chinese)
- [10] Groeger S, Pazgalev A S, Weis A. Comparison of discharge lamp and laser pumped cesium magnetometers [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80: 645–654.