

文章编号 1004-924X(2018)02-0284-09

低相噪大面积平衡光电探测器

桂永雷, 孙立凯*, 崔洪亮, 官占江, 张 鹏

(中国电子科技集团公司 第四十九研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现对光泵原子磁力仪系统中发散的快速调制光信号的精密相位检测, 解决现有平衡光电探测器存在的接光面积小、增益小、带宽小及相位性能不理想等问题, 本文采用基于结点差分电流的平衡差分探测方法, 分析了平衡探测器抑制系统共模噪声的机理, 通过优化元件和提高带宽设计出具有低相位噪声且单管接光面尺寸达到 $\phi 10$ mm 的大面积平衡光电探测器, 并进一步利用双板隔离式的制作方法避免了热噪声干扰, 实现了其低相位漂移的特性。实验结果表明, 该探测器 -3 dB 带宽达到 1.1 MHz, 信号跨阻增益达到 0.91 M Ω , 在 175 kHz 调制光信号下的相位噪声峰峰值不超过 0.002 3° , 能够满足碱金属原子磁力仪系统光信号精密相位检测的要求。

关键词: 平衡探测器; 光泵磁力仪; 相位检测; 低相噪; 相位漂移; 大面积

中图分类号: O434.12; TM936.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0284

Balanced amplified photodetector with low phase noise and large area

GUI Yong-lei, SUN Li-kai*, CUI Hong-liang, GONG Zhan-jiang, ZHANG Peng

(The No. 49th Research Institute of China Electronics Technology
Group Corporation, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: godslk@163.com

Abstract: In order to achieve accurate phase detection of diverging and rapidly modulated light signals in optically pumped atom magnetometer systems and to solve the problems of existing commercial balance photodetectors in terms of small optical sensitive area, small gain, small bandwidth, and poor phase performance, the balanced differential detection method based on Kirchhoff's law is adopted in this paper. The mechanism for system common mode noise suppression is analyzed and a low phase noise balanced amplified photodetector, the sensitive area size of which reaches $\phi 10$ mm per photodiode, is designed. Moreover, a two-board-isolation fabrication method is applied to avoid thermal noise and a low phase drift characteristic is achieved. Experimental results show that the -3 dB bandwidth of the photodetector reaches 1.1 MHz, with a signal transimpedance gain of 0.91 M Ω , while the peak-to-peak phase noise at 175 kHz modulated optical signal does not exceed 0.002 3° . The photodetector meets the requirements of optical signal precision phase demodulation in alkali metal atom magnetometer systems.

收稿日期: 2017-06-26; 修订日期: 2017-08-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2015AA8112005)

Key words: balanced photodetector; optically pumped atomic magnetometer; phase detection; low phase noise; phase drift; large area

1 引言

光学泵浦原子磁力仪^[1-2] (Optically Pumped Atomic Magnetometers, OPAMs)具有从地质勘探、地磁导航^[3]、医学疾病诊断^[4]、生物磁信号检测^[5]、物质分析^[6]、水下探测^[7]到深空探测^[8]的广泛应用前景。由于它具备高灵敏度、相对简单的光路结构及更强的环境适应性等优点,近年来获得了越来越多的关注,并成为高灵敏度磁力仪研究领域中的焦点。当前,国内的研究方向主要有两个:一个是以MEMS技术为基础的高集成度微型化磁力仪^[9]研究;另一个是通过优化设计磁力仪系统进一步提高灵敏度,由此完成接近理论极限灵敏度的高灵敏度磁力仪研究。同时,国内学者及研究机构还开展了一系列相关高灵敏度光泵原子磁力仪的研究工作。

在由分立式光学元器件搭建的光泵磁力仪系统中,平衡光电探测器的作用至关重要,它负责将光学信号无失真地转换为电信号,并送入后续以锁相放大器为核心的电信号处理部分。因此,平衡光电探测器^[10]是高灵敏度光泵磁力仪系统中的核心检测部件,其性能对实现微弱磁场的精确测量至关重要。例如,在一个测量范围为 $2 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ nT的铯光泵磁力仪系统中,拉莫尔频率为70~350 kHz(对应旋磁比为3.5 kHz/nT),通过精确测量拉莫尔频率即可获得磁场值。一般采用过零比较法,将检测光经光电转换后得到的正弦波转换为同频率方波,记录方波相邻过零点(或多个周期)的时间差,即可得到信号频率,进而得到磁场值。若要求在 5×10^4 nT时磁场波动不超过0.5 pT(即相对波动为 $0.5 \text{ pT} / (5 \times 10^4 \text{ nT}) = 10^{-8}$),则对应的频率抖动不超过1.75 Hz(旋磁比为3.5 Hz/pT),对应的相位抖动不超过 0.0036° ($1.75 \text{ Hz} / 175 \text{ kHz} \times 360^\circ = 0.0036^\circ$)。另外,探测器应该保证响应波形的过零点斜率足够大,从而减小过零比较时引入的比较误差,从实验经验来看,探测器带宽至少应该为拉莫尔频率的3倍(即 $350 \text{ kHz} \times 3 = 1.05 \text{ MHz}$)。

平衡探测器广泛应用于GHz及THz量级的相干光通信领域。2015年,A. K. M. NazrulIslam^[11]在使用平衡光电探测器作为接收器的自由空间光(FSO)链路中,评估了弱大气湍流对使用光域编码器和顺序反向键控(SIK)的光码分多址(OCDMA)的误码率(BER)性能的影响。2015年,普渡大学的H. J. Kim^[12]提出了一种用于扩频脉冲压缩的平衡光电探测器。2016年,德国杜伊斯堡-埃森大学的B. Khan^[13]设计了一款具有WR-12输出及相干光子70 GHz频带混频器模块的平衡探测器。国内方面,2015年,代永红^[14-15]等人研制了一种用于相干光通信的高速平衡探测器,并进行了灵敏度测试实验。刘立生^[16]等人研制了一款用于连续变量量子点测量的高速平衡零拍探测器。闫欣^[17]等人研制了一款 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的低暗电流InGaAs-MSM光电探测器,其3 dB带宽达到6.8 GHz。范程程^[18]等人研制了工作于650 nm波段、 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的集成大面积光电探测器接收芯片。2017年,梁赫西^[19]等人研制了一款光敏探测面直径为 $100 \mu\text{m}$ 的空间平衡探测器,并研究了本振光功率与相干探测灵敏度的关系。然而上述各种平衡光电探测器为了追求高速响应均采用小面积(相对于厘米级尺度而言)的高速光电管,而且其两管间距往往不可调,因此很难适配到空间光学传感系统中。目前,关于平衡探测器应用于传感领域的报道也有一些。2016年,意大利学者Domenico Caputo^[20]研制了一款用于生物传感领域的集成非晶硅平衡光电二极管,其单管接光面积为 $1800 \mu\text{m} \times 1800 \mu\text{m}$,并且为了补偿暗电流与热噪声电流,平衡探测器以单管遮光的方式工作。商用的适用于空间光学传感的大面积平衡探测器以Newport公司的New Focus Model 23X7系列平衡光电探测器和Thorlabs公司的PDB210X系列平衡光电放大器为主,前者的接光面尺寸为 $\phi 8 \text{ mm}$,具有三档固定增益,在 $2 \text{ M}\Omega$ 的最大增益下其-3 dB带宽仅有约150 kHz,与系统所需带宽相差太多;而后者在 $0.5 \text{ M}\Omega$ 的最大增益下的-3 dB带宽达到1

MHz, 接光面的尺寸仅为 $\phi 5$ mm, 这会产生切光现象。在前期实验过程中, 通过实际使用上述两款商用平衡探测器发现, 两种探测器均无法很好地适配到原子磁力仪系统中。因此, 研制新型的适用于原子磁力仪系统的高性能平衡光电探测器势在必行。

本文基于前期研制的具有高跨阻增益(0.91 M Ω)、大接光面积(10 mm \times 10 mm)、大带宽(800 kHz)的平衡探测器^[10], 进一步提升平衡探测器的相位性能, 包括提高相位检测精度和减小相位噪声及漂移两方面。并通过优化平衡光电探测器的相位性能来进一步提升磁力仪系统的灵敏度。

2 光泵原子磁力仪系统及平衡探测器原理

2.1 光泵原子磁力仪系统

利用光泵浦和探测碱金属原子极化状态来实现高灵敏度磁场测量是光泵原子磁力仪的核心工作原理。其基本思想是, 使用与光学共振跃迁接近的激光来泵浦基态原子, 使原子产生长寿命取向和/或更高阶矩, 激发态原子随后在待测磁场中进行拉莫尔自旋进动。该进动改变了原子的光吸收和色散特性, 通过测量透过原子介质的检测光的强度或偏振态的变化, 即可实现拉莫尔频率的测量, 进而反推出待测磁场的强度。目前, 用于光泵磁力仪系统的碱金属元素主要是钾(K)、铷(Rb)和铯(Cs)三种, 本文涉及到的工作主要是在基于铯原子的磁力仪系统中检测探测光的输出偏振态。光泵铯原子磁力仪系统的简化光路结构如图 1 所示。

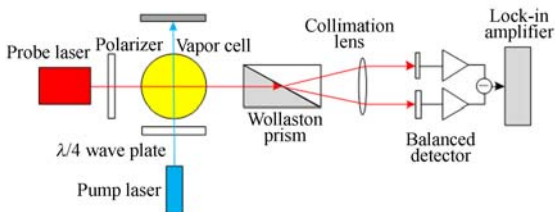


图 1 原子磁力仪系统示意图

Fig. 1 Schematic of atomic magnetometer system

光路系统采用泵浦光路与检测光路相互垂直

的布局结构。泵浦光采用 894.6 nm 的线偏振光, 沿垂直方向入射, 经过 $\lambda/4$ 波片转换为左旋圆偏振光照射铯原子气室^[21-24]。检测光采用 852.3 nm 的线偏振光, 沿水平方向入射铯原子气室。检测光从原子气室出射后通过 Wollaston 棱镜分解为两个正交的线偏振分量, 这两个分量成一定夹角出射。用准直透镜将分出的两束光进行准直, 再使用平衡光电探测器检测两路光信号, 最后将平衡光电探测器的输出电信号送入锁相放大器处理。

初始状态时, 调整检测光的偏振角度, 使其和 Wollaston 棱镜的光轴成 45° 夹角。则在铯原子与检测光相互作用的过程中, 任一时刻 Wollaston 棱镜出射的两束光可以表示为:

$$\begin{cases} I_1(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = \frac{I_0}{2}(1 + \sin 2\theta) \\ I_2(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = \frac{I_0}{2}(1 - \sin 2\theta) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: I_0 为进入 Wollaston 棱镜的总光强, I_1 和 I_2 分别为 Wollaston 棱镜分解出的两个偏振分量的光强, θ 为偏振面的旋转角度。从式(1)可以看出, I_1 和 I_2 是 θ 的函数, 在初始状态下, $I_1 = I_2 = I_0/2$, $I_1 - I_2 = 0$; 在测量过程中的任一时刻, $I_1 - I_2 \neq 0$, 原子磁力仪系统需要提取出 θ 随着时间变化的稳定的周期性信号, 因此将两束光进行差除和运算, 即有:

$$V = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin 2\theta \approx 2\theta. \quad (2)$$

从 θ 的变化频率就可以得到原子做周期性运动^[2]的频率, 从而推出原子所在处的磁场强度。由式(2)可以看出, 这种检测方法可以消除因入射光强抖动而带来的噪声^[25]。原子磁力仪系统中光信号的这种特点, 决定了平衡探测器是绝佳选择。

从系统功能角度来看, 平衡探测器位于系统后端的光信号检测部分, 是系统光电信号转换的中枢部分, 其作用是将光信号转换为模拟电信号后送至后面的锁相放大器做进一步处理。因此, 平衡探测器对原子磁力仪系统至关重要, 其性能直接影响系统的灵敏度^[26-27]及测量精度等指标。

2.2 平衡探测器原理

平衡零拍探测技术的基本原理如图 2(a)所示: 一束弱信号光和一束强本振光在偏振分束器上分光相干后分别入射到两个性能相近的光电探

测器上,得到的两路电信号再经减法器做差,经滤波处理提取其中的中频差值信号,从该信号即可反推出信号光的相关信息。传统的光电检测方案基于“先放大后差分”的原则,而平衡探测器检测方案则基于“先差分后放大”的原则。使用两个性能接近的光电管对两束入射光进行探测,然后通过采用光电管串联的方式(见图 2(b))将两路光电流直接做减法运算,实际输出的电流信号为两个光电管输出电流信号的差值^[13-15]。这种设计的优点是避免使用减法器,同时最大程度地抑制两束光的共模噪声从而进一步提高信噪比^[25]。

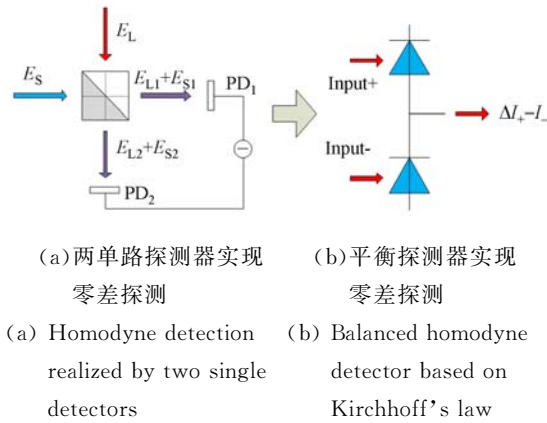


图 2 平衡零差探测器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of balanced homodyne detectors

3 平衡光电探测器设计

3.1 光电管的选择

光电管应满足两个条件:一是要保证光电管能够接收到完整的光斑信号;二是要保证光电管不会引入磁干扰。因此,这里最终选择 GT101 (CETC44 生产)作为光电探测器件。GT101 是一种硅 PIN 光电二极管,采用 FR4 薄片基板封装,芯片感光尺寸达 $\phi 10$ mm,5 V 偏压下的暗电流为 2 nA。

通常,光电二极管的感光面积越大其结电容也就越大。对于感光面积达 10 mm \times 10 mm 或者 $\phi 10$ mm 的光电管,其结电容一般都在数百 pF 以上。为了获得快速响应,必需选择尽量高的反偏电压。然而,高的反偏电压也会带来负面影响,随着反偏漏电流的增加其散粒噪声也相应增大。因此,为了均衡光电管的响应速度和噪声两项指标,本文采用 5 V 的反偏电压。

3.2 电路设计与实现

高速低输入偏置电流运算放大器适合用作宽带高灵敏度跨阻放大电路的前置级。但受转换速率(Slew Rate < 1 V/ns)和增益带宽积(Gain Bandwidth Product < 4 GHz)的限制,放大器很难在高增益下实现高速响应。因此,本文所设计的平衡探测器采用两级放大,第一级为使用 TI 公司的 OPA657 型运算放大器搭建的跨阻放大电路,第二级为采用 TI 公司超低噪声高速放大器 THS4031 构建的反相放大器电路。OPA657 拥有高达 1.6 GHz 的增益带宽积,由于采用了低噪声 JFET 输入级,其输入偏置电流仅为 2 pA,输入电压噪声低至 4.8 nV/Hz^{1/2}。THS4031 具备 100 MHz 的增益带宽积和 0.1 V/ns 的转换速率,拥有非常优秀的交流性能。平衡探测器的详细原理如图 3 所示。

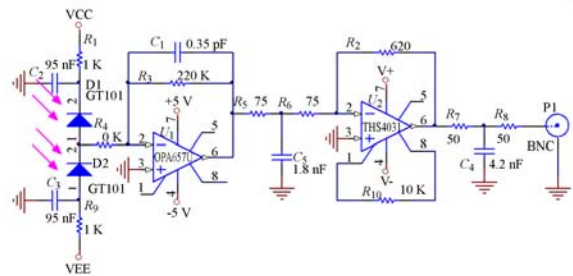


图 3 平衡探测器的电路原理图

Fig. 3 Circuit schematic of balanced photodetector

为了获得磁力仪系统所需增益,第一级反馈电阻取 220 k Ω ,且第一级电路提供绝大部分增益,第二级仅放大 4 倍多。下面从信噪比角度来说明电路的增益分配情况。跨阻放大电路的信噪比可表示为:

$$SNR = \frac{R_\lambda \times P_0}{\sqrt{4KT \times B/R_F}} \quad (3)$$

其中: R_λ 为探测器灵敏度, P_0 为入射光功率, K 为玻尔兹曼常数, B 为噪声带宽, R_F 为反馈电阻, T 为绝对温度。从式(3)可以看出,在光电探测器和入射光功率确定的情况下,信噪比仅取决于噪声带宽和反馈电阻。而在图 3 中,第一级带宽主要由反馈电阻和反馈电容决定。因此,在反馈电阻和反馈电容乘积一定(即电路带宽一定)时,选取大电阻搭配小电容,才能获得更高的信噪比。

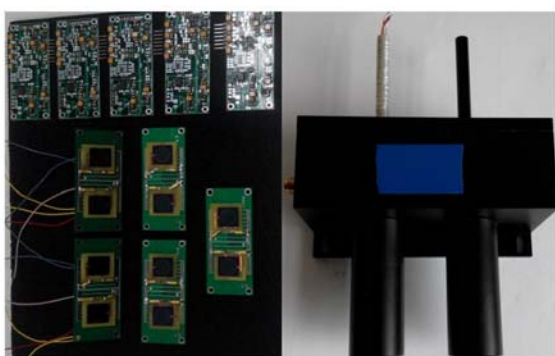
3.3 平衡探测器的制作

由于电信号的速率较高,为了避免电子元件

对光电管产生干扰,这里采用 4 层板,如图 4(a)所示。在第一块 PCB 板(位于图 4(a)的下半部分,称为前面板)正面,设计了一组平行导轨焊盘,焊盘周围铺设漏电流保护环。这样在同一款 PCB 板上就能实现两只光电管的中心间距从 20 mm 到 60 mm 连续可调,使平衡探测器具有更好的系统兼容性。由于光电管采用 FR4 基板封装,因此光电管和其余电子元件分别安装在两块 PCB 板上。

为了提升平衡探测器的相位性能,本文主要采取了三项措施:(1)为了减小温度漂移,防止单片 PCB 板的正面与背面之间的热传导,采用双板隔离式的设计,将光电管安装在前面板上,而将放大器等高功耗电路元件安装在第二块 PCB 板(位于图 4(a)的上半部分,称为后面板)上,从而抑制了光电管中由于热传导而引起的热噪声;(2)对光电管所在面进行大面积铺地处理,这样可以使光电管屏蔽掉外界尤其是第二级放大信号可能引起的干扰;(3)对信号流经路径上的元件进行优化。在由前向后的整条信号路径上,信号被逐级放大,因而,其在各级电路上产生的热量也逐级增大。为了抑制电子元件因热量积累而导致的自身性能下降,将前、后面板上的电子元器件从普通级替换为低温漂级,所用电阻的温度系数均不超过 $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,电容选用 NP0 贴片电容,其温度系数为 $(0 \pm 30) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。上述三项优化设计实现了低相位噪声和低相位漂移。

平衡探测器的外壳使用纯铝制作,这样不但能够起到很好的电磁屏蔽作用,而且不会引入磁



(a) 平衡探测器电路板 (b) 组装完成的平衡探测器
(a) PCB of PD (b) Assembled PD

图 4 平衡探测器实物图

Fig. 4 Physical map of balanced photodetector(PD)

干扰,表面黑色阳极化处理可防止它在使用过程中反光对其他光学元器件形成干扰。组装完成的平衡探测器如图 4(b)所示。平衡探测器的两个通光窗口上安装了通光管,以防止实验环境中的杂散光干扰以及避免原子磁力仪系统中的射频信号^[25]干扰。供电线和信号引出线采用纯铜导线,从后端两根细管引出,以避免磁干扰。

4 平衡探测器性能测试

4.1 平衡探测器带宽测试

为了测试平衡探测器在原子磁力仪系统中的工作性能,这里搭建了如图 5 所示的频率响应测试系统。LD driver 模块由 850 nm 的 VCSEL 激光管和驱动电路组成,通过外部输入驱动信号,对激光管输出光功率进行强度调制,调整 LD driver 的相关参数,使其出射光强中的直流和交流分量与原子磁力仪系统中的实际情况保持一致。将平衡探测器置于光源出口一固定距离处,并沿着垂直方向调整平衡探测器,使其中一个通光窗口能够接收到完整的光信号,而另外一个窗口挡光。使用信号发生器输出一定频率的正弦波作为光源的工作信号。从平衡探测器输出的信号接入数据采集系统,再由计算机显示处理结果。

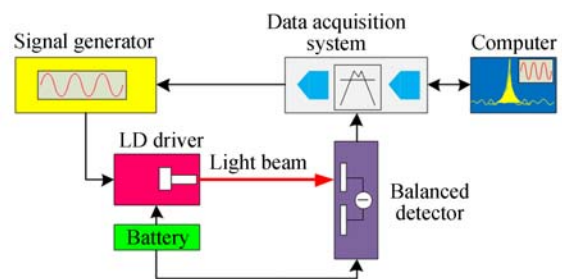


图 5 平衡探测器带宽测试框图

Fig. 5 Bandwidth test of balanced photodetector

使用扫频仪从 10 kHz~2 MHz 做线性扫描,频率间隔设置为 10 kHz,以避免外部干扰引起的测量误差。分别对平衡探测器两只光电管进行扫频,得到的幅频响应曲线如图 6 所示。其 -3 dB 带宽为 1.1 MHz,且在 1.4 MHz 以下的频率响应曲线波动很小,这表明平衡探测器在 1.4 MHz 以下工作时信噪比良好。

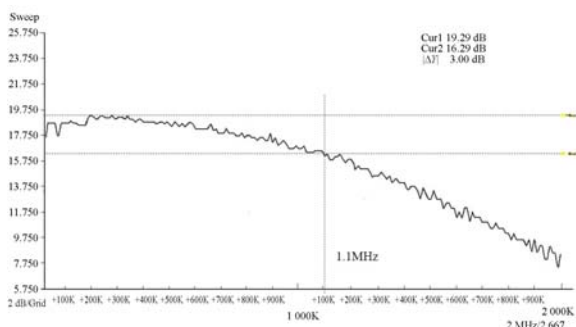


图 6 平衡探测器单管频率响应图

Fig. 6 Frequency response of balanced photodetector

4.2 平衡探测器相位漂移及噪声测试

为了测试相位漂移及噪声,将平衡探测器置于由三组亥姆霍兹线圈组成的稳磁平台上。852.3 nm线偏振光通过保偏光纤从光源引出,正入射到平衡探测器的一个窗口上,另外一窗口挡光。借助示波器监测平衡探测器波形,仔细调整光源到平衡探测器的距离,使波形峰峰值达到 1.2 V 左右,再将信号接回锁相放大器中。测试件的摆放位置如图 7(a)和 7(b)所示。



(a) 测试平台水平视图 (b) 测试平台俯视图
(a) Horizontal view of test platform (b) Vertical view of test platform

图 7 相位漂移及噪声测试系统布局图

Fig. 7 Layout of phase drift and noise test system

平衡探测器相位漂移测试框图如图 8 所示,利用磁力仪系统的锁相放大器产生 175 kHz 标准方波信号驱动激光器,并且将激光器发出光对准照射平衡探测器光敏面,预热 10 min 后,将平衡探测器输出接回锁相放大器。计算出标准方波信号和响应方波信号的相位偏移 $\Delta\varphi_i$,测试 5 min,每隔 1 min 记录一次相位偏移数据 $\varphi_i (i=0, \dots, 5)$,取相位偏移的平均值 φ_s 与单次测量值 φ_i 的最大差值作为相位抖动及短期偏移值 $\Delta\varphi = \text{MAX}(|\varphi_s - \varphi_i|)$ 。测试结果见表 1。

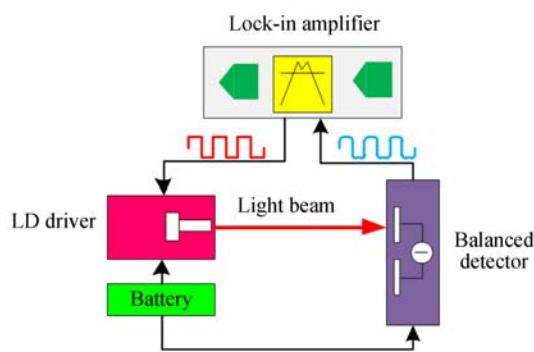


图 8 平衡探测器相位噪声测试框图

Fig. 8 Phase noise test of balanced photodetector

表 1 平衡探测器相位漂移测试记录

Tab. 1 Test record of phase drift for balanced photodetector

No.	Phase offset $\varphi_i / (^\circ)$	Average phase offset $\varphi_s / (^\circ)$	$ \varphi_s - \varphi_i / (^\circ)$
0	0.005	0.005 833	0.000 833
1	0.004		0.001 833
2	0.006		0.000 167
3	0.005		0.000 833
4	0.008		0.002 167
5	0.007	0.001 167	

由于 PDB210X 平衡探测器的接光面尺寸较小,因此以 Model 2307 平衡探测器作为对比。在可视化的磁场测量软件界面上,分别截取两者的测试波形图,如图 9 和图 10 所示。该图是数据处理系统将相位值换算为相应的磁场值后绘出的波形图,磁场值与相位的对应关系为:1 pT 对应于 $0.007 2^\circ$ 。图中横轴的时间跨度为 136 s;纵轴的磁场强度范围会随着信号噪声自动缩放。图 9 中纵轴跨度为 4 pT,磁场噪声峰峰值大于 3 pT;图 10 中纵轴跨度为 2 pT (50000.004 ~ 50000.006 nT)。显然,本文提出的平衡探测器的相位性能优于作为对比的 Model 2307 平衡探测器。而且,由于图 10 中的磁场噪声峰峰值约为 0.317 pT,因此对应的相位噪声峰峰值为 $0.002 3^\circ$,该值为包含信号链路上所有器件相位噪声的系统总相位噪声。显然,平衡探测器的相位噪声一定小于 $0.002 3^\circ$,因此满足高灵敏度原子磁力仪系统精密相位检测的要求。最后,表 2 列出了本文研制的平衡探测器与几种商用平衡探测器的主要指标及特点。

表 2 平衡探测器的性能指标及特点

Tab. 2 Performance indicators and characteristics of balance detectors

品牌	接光面尺寸/mm	带宽@增益	实测相噪峰峰值@175kHz	两管间距是否可调	是否无磁化设计
PDB 210A	φ5	1MHz@ 5×10^5 1MHz@ 2×10^3	\	否	否
Model 2307	φ8	200kHz@ 1×10^5 150kHz@ 2×10^6	0.042 0°	否	否
本文研制	φ10	1.1MHz@ 9.1×10^5	0.002 3°	是	是

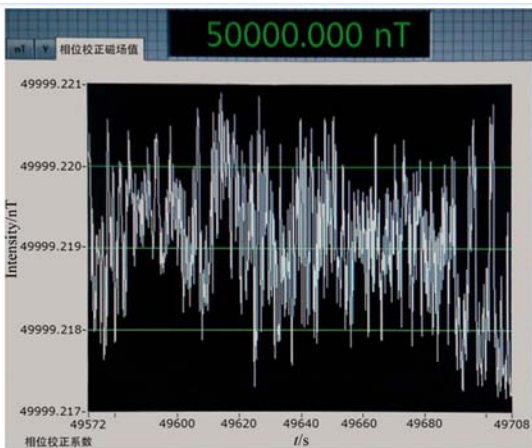


图 9 Model 2307 相位噪声对应的磁场噪声波形

Fig. 9 Magnetic noise responding to phase noise of Model 2307

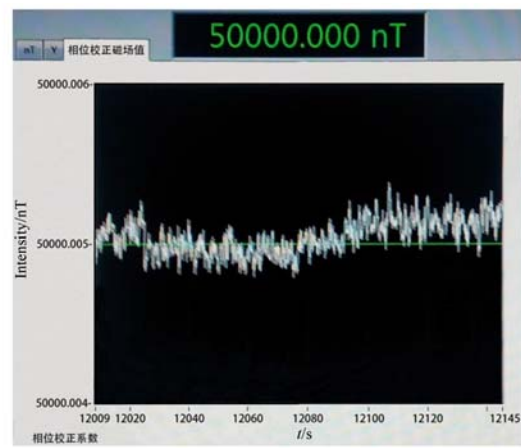


图 10 自制平衡探测器相位噪声对应的磁场噪声波形

Fig. 10 Magnetic noise responding to phase noise of proposed balanced photodetector

5 结 论

本文通过分析平衡光电探测器的原理及关键技术,设计并制作出一种性能优良的平衡光电探测器,其单管接光面积为 $\phi 10$ mm,跨阻增益为

0.91 M Ω , -3 dB 宽带为 1.1 MHz,具有相位噪声小(优于 0.002 3°峰峰值)、相位漂移小(短期漂移约为 0.002°)的优点,适用于原子磁力仪系统精密相位解调的要求。由于其双管中心间距从 20 mm 到 60 mm 连续可调,因此,该探测器能很好地满足各种自由空间光信号检测和传感系统的需求。

参考文献:

- [1] PATTON B, ZHIVUN E, HOVDE D C, *et al.*. All-optical vector atomic magnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(1): 013001.
- [2] SAVUKOV I, KARAUANOV T, BOSHIER M G. Ultra-sensitive high-density Rb-87 radio-frequency magnetometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 023504.
- [3] WAHDAN A, GEORGY J, ABDEL FATAH W F, *et al.*. Magnetometer calibration for portable navigation devices in vehicles using a fast and autonomous technique[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(5): 2347-2352.
- [4] ADACHI Y, MIYAMOTO M, KAWAI J, *et al.*. Improvement of SQUID magnetometer system for extending application of spinal cord evoked magnetic field measurement[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, 21(3): 485-488.
- [5] KIM K, BEGUS S, XIA H, *et al.*. Multi-channel atomic magnetometer for magnetoencephalography: a configuration study[J]. *Neuro Image*, 2014, 89: 143-151.
- [6] LIU G B, LI X F, SUN X P, *et al.*. Ultralow field NMR spectrometer with an atomic magnetometer near room temperature[J]. *Journal of Magnetic*

- Resonance*, 2013, 237: 158-163.
- [7] FARES S A, FLEMING R, DINN D, *et al.*. Horizontal and vertical electric dipoles in a two-layer conducting medium[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5656-5665.
- [8] ZHANG Q, AL-NUAIMY W, HUANG Y. Detection of deeply buried UXO using CPT magnetometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 410-417.
- [9] 张鹏, 陈洪娟, 桂永雷, 等. 基于 MEMS 技术的光泵原子磁力仪发展与应用[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(7): 465-471.
ZHANG P, CHEN H J, GUI Y L, *et al.*. Development and application of optical pump atomic magnetometers based on MEMS technology[J]. *Micro-nano-electronic Technology*, 2017, 54(7): 465-471. (in Chinese)
- [10] 张鹏, 陈洪娟, 桂永雷, 等. 原子磁力仪系统高增益平衡光电探测器的设计[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 755-760.
ZHANG P, CHEN H J, GUI Y L, *et al.*. Design of a high gain balanced photoelectric detector for atomic magnetometer system[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 755-760. (in Chinese)
- [11] ISLAM A K M N, MAJUMDER S P. Effect of weak atmospheric turbulence on the BER performance of an optical CDMA FSO link with Sequence Inverse Keying (SIK) balanced photodetector receiver[C]. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP)*, IEEE, 2015: 1-5.
- [12] KIM H J, RASHIDINEJAD A, WEINER A M. Low-loss ultrawideband programmable RF photonic phase filter for spread spectrum pulse compression[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(12): 4178-4187.
- [13] KHANI B, RYMANOV V, HONECKER J, *et al.*. Coherent photonic 70 GHz band mixer module with WR-12 output[C]. *Proceedings of the 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, IEEE, 2016: 1-2.
- [14] 代永红, 艾勇, 肖伟, 等. 高速相干光通信平衡探测器研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0125002.
DAI Y H, AI Y, XIAO W, *et al.*. The research of balance detector for high-speed coherence optical communications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0125002. (in Chinese)
- [15] 代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3110-3116.
DAI Y H, LIU Y F, ZHOU H T, *et al.*. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110-3116. (in Chinese)
- [16] 刘立生, 张合勇, 王挺峰, 等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1508-1515.
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, *et al.*. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
- [17] 闫欣, 汪韬, 尹飞, 等. 低暗电流 InGaAs-MSM 光电探测器[J]. *光子学报*, 2015, 44(6): 0604002.
YAN X, WANG T, YIN F, *et al.*. InGaAs-MSM photodetector with low dark current[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(6): 0604002. (in Chinese)
- [18] FAN CH CH, CHENG X, YAN H P, *et al.*. Realization of a high sensitivity fully-integrated receiver with optimized large-area photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0423001.
- [19] 梁赫西, 代永红, 艾勇, 等. 本振功率对空间平衡探测器相干探测灵敏度的影响[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 334-341.
LIANG H X, DAI Y H, AI Y, *et al.*. Influence of local oscillator power on sensitivity of coherent detection of space balance detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 334-341. (in Chinese)
- [20] CAPUTO D, PARISI E, NASCETTI A, *et al.*. Integration of amorphous silicon balanced photodiodes and thin film heaters for biosensing application[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 1434-1437.
- [21] 全伟, 刘阳, 陈瑶. 基于受抑全反射的碱金属气室镀膜厚度测量[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 69-75.
QUAN W, LIU Y, CHEN Y. Accurate measurement of coating thickness for alkali vapor cells based on frustrated total internal reflection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 69-75. (in Chinese)

- [22] 张鹏, 陈洪娟, 桂永雷, 等. 原子磁传感器原子气室无磁控温技术[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(6): 18-21, 25.
ZHANG P, CHEN H J, GUI Y L, *et al.*. Non-magnetic temperature control technology of atomic vapor cell in atomic magnetic sensors[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(6): 18-21, 25. (in Chinese)
- [23] 谢冀江, 徐艳, 陈飞, 等. LD 端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2755-2760.
XIE J J, XU Y, CHEN F, *et al.*. Mode matching of LD-end-pumped cesium vapor laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2755-2760. (in Chinese)
- [24] 任洁, 刘辉, 卢本全, 等. 铯原子光钟跃迁谱线探测中的程序控制[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 50-58.
REN J, LIU H, LU B Q, *et al.*. Program control in transition observation of strontium optical lattice clock[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 50-58. (in Chinese)
- [25] KAMADA K, ITO Y, ICHIHARA S, *et al.*. Noise reduction and signal-to-noise ratio improvement of atomic magnetometers with optical gradiometer configurations[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6976-6987.
- [26] FANG J CH, LI R J, DUAN L H, *et al.*. Study of the operation temperature in the spin-exchange relaxation free magnetometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073116.
- [27] SCHULTZE V, SCHOLTES T, IJSSELSTEIJN R, *et al.*. Improving the sensitivity of optically pumped magnetometers by hyperfine repumping[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2015, 32(5): 730-736.

作者简介:



桂永雷(1988—),男,陕西宝鸡人,助理工程师,2012年于安徽大学获得学士学位,主要从事光纤水声传感器技术、光电检测技术及光纤光学传感技术方面的研究工作。E-mail: narutomst@163.com

通讯作者:



孙立凯(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,2000年于佳木斯大学获得学士学位,主要从事弱磁信号检测、磁传感器技术、加速度传感器技术及压力传感器技术的研究。E-mail: godslk@163.com