

原子磁力仪系统高增益平衡光电探测器的设计

张 鹏^{1,2,3}, 陈洪娟^{1,2}, 桂永雷³, 孙立凯³

(1. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 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: 为了实现对原子磁力仪系统中微弱、发散、快速调制的光信号的精密检测, 克服传统平衡探测器接光面积小、增益小、光电管间距不可调及与自由空间光信号探测不兼容等缺点, 采用基于基尔霍夫定律的平衡差分放大法和基于平行轨道焊盘的精调方法, 设计并制作了高增益平衡光电探测器, 并介绍了其工作原理和结构组成。首先, 针对光斑发散大和调制速率快的特点确定了具有 10 mm × 10 mm 大接光面积的高速光电管; 然后设计了双管中心间距从 20 ~ 60 mm 连续可调的平行轨道焊盘, 增强其对各种光学系统的兼容性; 最后, 利用两级放大电路设计实现了高增益特性。实验结果表明, 该探测器 -3 dB 带宽达到 800 kHz, 信号跨阻增益达 0.91 MΩ, 在 70 kHz 时的信噪比为 38.5 dB, 能够满足原子磁力仪系统光信号检测的要求。

关键词: 平衡光电探测器; 原子磁力仪; 接光面积; 高增益; 信噪比

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.06.020

Design of a high gain balanced photoelectric detector for atomic magnetometer system

ZHANG Peng^{1,2,3}, CHEN Hong-juan^{1,2}, GUI Yong-lei³, SUN Li-kai³

(1. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
3. The NO. 49th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to achieve precision detection of the weak, divergent and fast modulated optical signal in atomic magnetometer systems and overcome the disadvantages of traditional balanced detectors with small light-receiving areas, small gains, nonadjustable center distances between each pair of photodiodes and incompatible with free space optical signal detection, an approach based on Kirchhoff's law of balanced differential amplification and a fine tuning method based on parallel tracks pads are adopted. A high-gain balanced photodetector is designed and produced, and the working principle and structure composition are introduced. First, for the features of large spot divergence and high modulation rate, a high-speed photodiode with a 10 mm × 10 mm large light-receiving area is determined; then a pair of parallel track pads which enabled double-diode center space to be continuously adjusted from 20 mm to 60 mm is designed, which enhances the compatibility with a variety of optical systems; Finally, a two-stage amplifier circuit is designed to achieve the high gain characteristic. Experimental results show that the detector achieves a -3 dB bandwidth of 800 kHz, a signal transimpedance gain of 0.91 MΩ, and a SNR of 38.5 dB@ 70 kHz. Therefore, this balanced photodetector fairly meets the needs of optical signal detection of atomic magnetometer systems.

Key words: balanced photodetector; atomic magnetometer; light-receiving area; high gain; SNR

基金项目: 国家 863 高新技术研究发展计划项目 (No. 2015AA8112005) 资助。

作者简介: 张 鹏 (1981 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事原子磁传感器, 光纤水听器, 光纤压力传感器等方面的研究工作。E-mail: zhangpeng1319@126.com

收稿日期: 2016-11-05

1 引言

平衡光电探测器是一种基于平衡零差探测技术和光电探测技术的新型差分式光电探测器,因其具有高共模抑制比、高速和高灵敏度特性而成为平衡零拍探测技术的核心器件。平衡光电探测器不但被广泛应用于量子光学^[1-2]和相干光通信^[3-6]中,而且也被用于各种基于偏振分光的相干光学检测系统中^[7-8]。2013年,黄端^[9]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,获得了300 MHz带宽和14 dB的噪声比率(散粒噪声对电子噪声的比率);2014年,孙洋^[3]等人采用SMIC 0.13 μm COMS工艺,设计完成了一款用于5 Gbps平衡光探测器通信系统的前置光电放大器,其仿真性能良好,在4.7 GHz带宽范围内获得了62 dB Ω 的跨阻抗增益;2015年,代永红^[4]等人研制了一种用于相干光通信的高速平衡探测器,实现了在2.5 Gbps通信速率下优于46 dB的共模抑制比。另外,代永红^[5]等人还设计了2.5 Gbps和5 Gbps平衡探测器,分析了两种探测器在非相干和相干探测条件下的灵敏度,并且通过实验在2.5 Gbps的信号速率下获得了-21.1 dBm的非相干探测灵敏度和-41.2 dBm的相干探测灵敏度。目前,商用化的平衡探测器以Newport公司的New Focus平衡光电探测器和Thorlabs公司的PDB210系列平衡光电放大器为主。然而上述文章中的各种平衡探测器并不适用于许多涉及自由空间光的光学实验,而商用化的平衡探测器由于增益小、光电管面积小及两管间距不可调等问题也不能很好地与各种光学系统兼容。为了获得更高的探测性能和更好的系统兼容性,本文以原子磁力仪^[10-14]系统为背景,对现有平衡光电探测器进行了理论分析以及性能和结构上的改进,研制了一种性能优良的大接光面积平衡光电探测器,验证了其在原子磁力仪系统中的应用。

2 平衡探测器原理简介

对于差分光信号的检测,传统的光电检测方案是基于“先放大后差分”的原理,而平衡探测器检测方案则是基于“先差分后放大”的原理。如图1(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基本一致^[3]的光电管上,通过光电管串联的方式将两路光电流直接做减法运算,输出信号为两个光电管输出电流信号的差值^[15]。该信号再经跨阻放大及滤波,提取其中频差值信号,从而得到信号光的相关信息。这种设计结构简单紧凑,避免使用减法器,并能最大程度

地抑制两束光的共模噪声从而进一步提高信噪比。

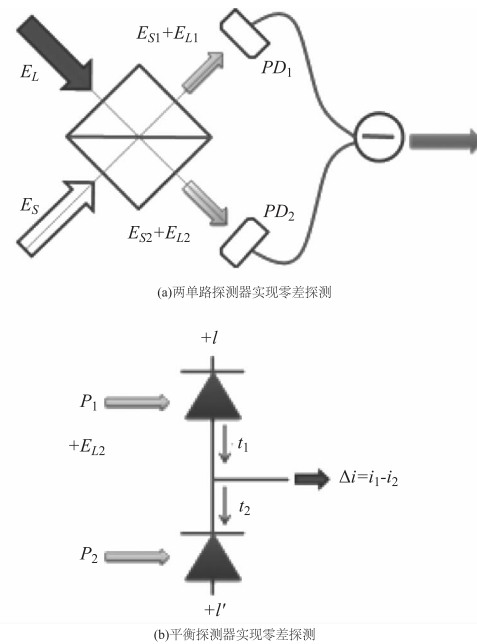


图1 平衡零差探测器示意图

Fig. 1 Diagram of balanced homodyne detectors

3 平衡光电探测器的设计及制作

通常情况下,原子磁力仪系统中所使用的碱金属原子气室^[16-18]由于其制作工艺的限制,不可避免地存在结构缺陷,因此通过气室的光束将会出现不同程度的离轴或发散等现象。虽然增加聚焦透镜等光学元件可以改善上述情况,但这些方法也增加了系统的复杂程度和对信号光的损耗。而且,聚焦不当将导致诸多问题:经过聚焦的高功率光束进入光电管的光敏面将会引起非线性效应,还会导致平衡探测器频率响应特性衰减;两束光分别聚焦会导致输出信号的共模抑制比降低。因此,聚焦法有很大的局限性。本文设计并研制出一款具有大接光面积的高增益宽带平衡光电探测器,在限定的噪声水平下,使带宽尽可能达到最大,通过各元件参数优化,最终解决了自由空间光差分探测时出现的上述问题。

3.1 光电管的选择

用于原子磁力仪系统的光电管应满足两个要求:(1)保证光电管能够接收到完整的光斑从而获得完整信号;(2)保证光电管不会对原子磁力仪系统引入磁干扰。S3994-01(Hamamatsu)是一种高速硅PIN光电二极管。其芯片感光面积达10 mm \times 10 mm,采用陶瓷基板封装,表面有玻璃窗口保护,满足以上两个要求。

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 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 或者直径达 $\phi 10\text{ mm}$ 的光电管,一般其结电容都在 100 pF 以上。文中采用的 S3994-01 在零偏时,其结电容在 110 pF 以上。而大的结电容会导致前置放大电路的响应速度下降^[3]。因此,为了获得快速响应,必需选择尽量高的反偏电压。然而,高的反偏电压会增加暗电流,随着暗电流增加其散粒噪声也相应增大。

反向偏置下的光电二极管产生的噪声电流 (I_N) 主要是反偏漏电流 (I_D) 引起的散粒噪声电流 (I_S) 和光电二极管并联电阻 (R_{SH}) 产生的约翰逊噪声电流 (I_J)。由于稳压器以 5 V 和 9 V 最为常见,因此分析光电管在上述两种偏压下的噪声情况,如表 1 所示。

表 1 两种偏置电压下光电管噪声对比

Tab. 1 Noise comparison between two different bias voltages

Specifications	5 V Bias	9 V Bias
I_D/nA	1.3	1.8
$R_{SH}/\text{G}\Omega$	3.85	5
$R_\lambda/(A \cdot W^{-1})$	0.57	0.57
B/Hz	1	1
$I_S/(10^{-14}\text{ A} \cdot \text{Hz}^{1/2})$	2.04	2.40
$I_J/(10^{-14}\text{ A} \cdot \text{Hz}^{1/2})$	0.20	0.18
$I_N/(10^{-14}\text{ A} \cdot \text{Hz}^{1/2})$	2.05	2.41
$\text{NEP}/(10^{-14}\text{ A} \cdot \text{Hz}^{1/2})$	3.60	4.22

从上表可以看出,大感光面积光电二极管在反偏模式下,散粒噪声是噪声主要部分。光电二极管在 5 V 反向偏压下,具有比 9 V 偏压时更小的总噪声电流 (I_N) 和等效噪声功率 (NEP)。故在本设计中采用 5 V 反偏电压,这样可实现光电管的响应速度和噪声的均衡,从而适用于原子磁力仪系统对于连续光信号的检测。

3.2 信号放大电路的设计

为了在高增益下实现高速响应^[3],本设计采用两级放大,前级为跨阻放大,在高增益下提供尽可能大的信噪比和带宽。后级为反相放大,进一步提高信号增益。前级使用 TI 公司的 OPA657 型运放,其拥有高达 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 $4.8\text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$,非常适合应用于低噪声的宽带光电探测器中。后级选择 TI 公司的超低噪声高速放大器 THS4031,其具备 100 MHz 增益带宽

积和 $0.1\text{ V}/\text{ns}$ 的转换速率以及 $1.6\text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 的超低电压噪声,拥有非常优秀的交流性能。平衡探测器详细原理图如图 2 所示。

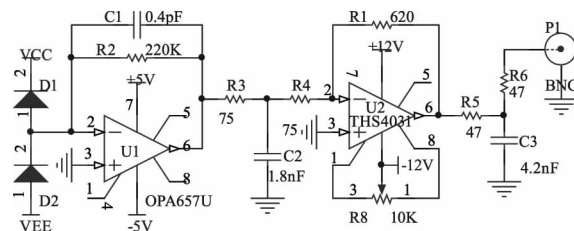


图 2 平衡探测器电路原理图

Fig. 2 Circuit schematic of the balanced photodetector

为了获得原子磁力仪系统所需的增益(信号跨阻增益 $> 0.5\text{ M}\Omega$),将前级反馈电阻 R_F 取为 $220\text{ k}\Omega$,并且增益的绝大部分由前级电路提供,后级放大电路仅放大 4 倍。理想情况下,光电管的全部输出电流均通过 R_F ,但由于所有运放都存在输入偏置电流,导致其输出产生误差。因此最好能够将运算放大器的输入偏置电流限制在数皮安范围内,并且压低输入失调电压,以使误差最小。OPA657 的输入偏置电流仅为 2 pA ,输入失调电压仅为 $\pm 250\text{ }\mu\text{V}$,完全满足上述两个要求。因此,前级放大电路能完美地将光电管产生的光电流转换为输出电压,可表示为:

$$V_{OUT} = \frac{I_{PHOTO} \times R_F}{1 + sC_F R_F} \quad (1)$$

其中, I_{PHOTO} 为光电流; R_F 和 C_F 分别为反馈电阻和反馈电容,两者并联决定信号带宽,可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad (2)$$

由式(1)可知,输出电压信号正比于 R_F 。然而由于 R_F 内有光电流流过会引入热噪声。故跨阻放大电路的信噪比最终由上述两项共同决定,可表示为:

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

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 为热力学温度。由式(3)可知,在探测器和入射光功率确定时,信噪比将仅取决于噪声带宽和反馈电阻。而由式(2)可知,前级电路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(即带宽确定)时,应选取大电阻和小电容搭配,才能获得更高的信噪比。

此前置放大器所能实现的稳定带宽是以下参数的函数:反馈电阻 R_F ,放大器的增益带宽积 f_{CR} ,放

大器求和点的总电容 C_{IN} 。电路在 45° 相位裕量下的信号带宽可表示为:

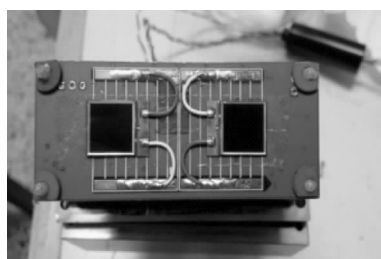
$$f_{c_{45^\circ}} = \sqrt{\frac{f_{CR}}{2\pi \times R_F \times C_{IN}}} \quad (4)$$

其中, R_F 和 C_F 在放大器的环路传递函数中产生一个极点, C_F 取值不当可能会导致电路自激振荡。产生 45° 相位裕量所对应的反馈电容值记为 C_f , 可表示为:

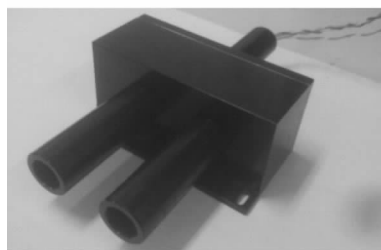
$$C_f = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\pi \times R_F \times f_{CR}}} \quad (5)$$

代入各元件的数值, 得 $C_f = 0.2 \text{ pF}$ 。反馈电容 C_F 的取值应该大于 C_f 才能保证系统稳定, 系统选择 $C_F = 0.4 \text{ pF}$ 。此时, 由式(2)得到前级带宽约为 1.8 MHz 。

为了避免电子元件在工作时对光电管产生噪声干扰, 设计了4层电路板。将光电管和电子元件分别安装在PCB板的两面, 光电管所在平面做大面积铺地处理, 这样可以实现较好隔离背面的电路产生的电磁干扰, 如图3(a)所示。PCB板安装在无磁的纯铝制作的外壳内, 外壳表面采用黑色阳极化处理, 组装完成的平衡探测器如图3(b)所示。



(a)平衡探测器电路板



(b)平衡探测器成品

图3 平衡探测器实物图

Fig. 3 Physical map of the balanced photodetector

4 平衡探测器性能测试

4.1 平衡探测器带宽及噪声测试

为了模拟平衡探测器在原子磁力仪系统中的工作情况, 搭建如图5所示的测试系统, 主要测试了其频响及噪声特性。LD driver 模块由 850nm VCSEL 激光管和驱动电路组成, 通过外部信号发生器输入驱动信号, 对激光管输出光功率进行强

度调制。调整 LD driver 相关参数, 使其出射光强的直流和交流分量与原子磁力仪系统中实际情况一致。将平衡探测器置于光源出光口处固定距离 (40 cm), 使其中一个通光窗口接光, 而另一个窗口挡光。使用两块蓄电池组成 $\pm 12 \text{ V}$ 电源为平衡探测器供电。探测器输出信号接入数采系统处理再由计算机显示。

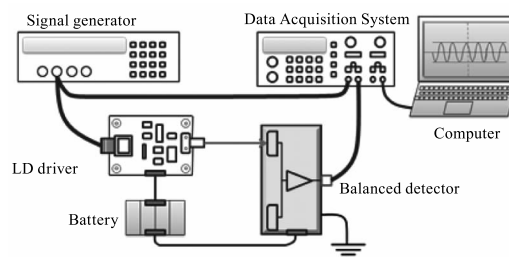


图4 平衡探测器测试系统图

Fig. 4 Diagram of the balanced photodetector test system

使用扫频仪从 $10 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$ 做线性扫描, 频率间隔设为 10 kHz , 起始频率为 10 kHz 。对探测器两只光电管单独扫频, 得到幅频响应曲线如图5和图6所示。

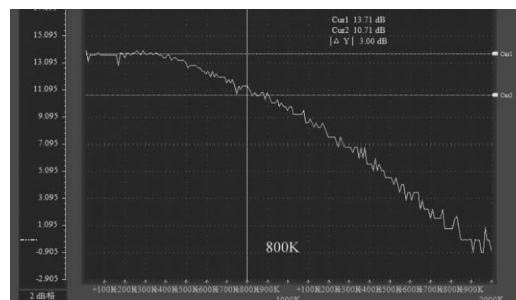


图5 正单管频率响应

Fig. 5 Frequency response of the positive photodiode

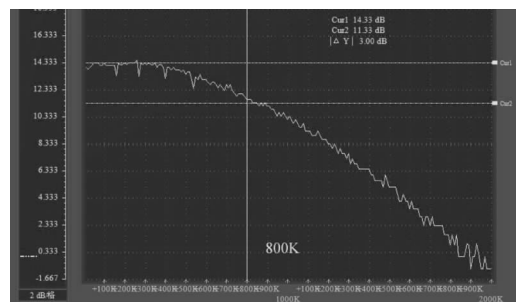


图6 负单管频率响应

Fig. 6 Frequency response of the negative photodiode

可以看出, 其 -3 dB 带宽为 800 kHz 。对平衡探测器暗态输出噪声波形进行 FFT 变换, 可得到噪声分布特点: 在 2 MHz 范围内, 其整体噪声水平在 -80 dB 以下, 在 800 kHz 范围内, 整体噪声低于 -85 dB 。

4.2 平衡探测器在线信噪比测试

为了验证平衡探测器在原子磁力仪系统中的总信噪比,使用无磁封装技术制作了小型化原子磁传感器。传感器无磁封装整体是将光路部分、无磁加热部分、偏振检测部分、探测及泵浦光反馈检测部分固定在固支底板构成传感器物理结构,底板材料使用了有机玻璃,主体部分使用聚四氟乙烯材料,保证了无磁特性。传感器形尺寸为 100 mm × 36 mm × 350 mm;固定支架尺寸为 110 mm × 8mm × 630 mm,其实物图如图 7 所示。

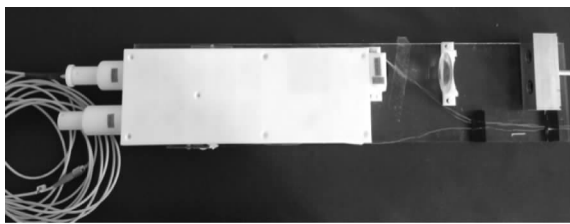


图 7 磁传感器实物图

Fig. 7 Magnetic sensor physical map

将该磁传感器与制作的平衡探测器以及中国计量院的磁力仪测试平台的激光调制、信号处理、频率跟踪等部分连接,搭建了原子磁力仪测试系统。整个系统置于中国计量院的稳磁平台上,稳磁环境下进行了信噪比测试。测试框图如图 8 所示,其中自制的小型化原子磁传感器包括检测光路和磁传感器两部分,而平衡探测器在图中以光电转换表示。

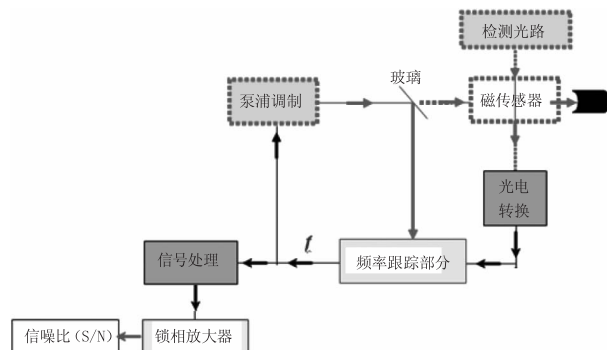


图 8 平衡探测器在线信噪比测试系统框图

Fig. 8 Block diagram of the balanced detector on-line Signal-to-Noise Ratio Test System

利用磁力仪系统的锁相放大器在 70 kHz 下测量了磁共振点的信号 S 和噪声 N,测得振幅信噪比 AMP SNR = 38.574 dB,计算信噪比得 $\delta = 7498.9$,优于合同要求的 4000 的技术指标,说明此平衡探测器可以用于磁力仪系统,测试频谱曲线如图 9 所示。

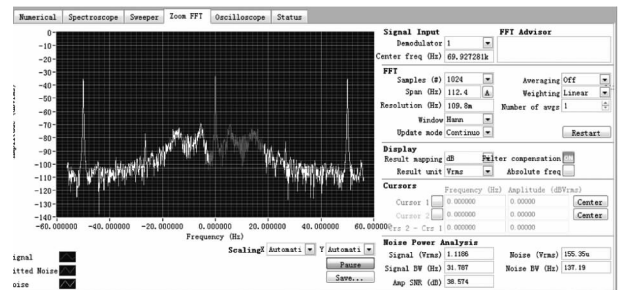


图 9 信噪比测试频谱图

Fig. 9 Signal to noise ratio test spectrum

5 结论

根据原子磁力仪系统对光信号检测的增益高、接光面积大、响应速度快及双管间距可调的要求,通过采用平衡差分放大和平行轨道焊盘的方法,设计并制作出一种具有单管 10 mm × 10 mm 大接光面积,跨阻增益 0.91 MΩ 及双管中心间距从 20 mm 到 60 mm 连续可调的平衡光电探测器。实验结果证明,该探测器 -3 dB 宽带达到 800 kHz,还具有噪声小(带内噪声低于 -85 dB),信噪比高(优于 38 dB)的优点,适用于磁力仪系统及弱磁信号检测的光学系统中。

参考文献:

- [1] ZHOU Haijun, WANG Wenzhe, ZHENG Yaohui. Improvement of high-gain shot-noise detector[J]. Opt. Precision Eng, 2013, 21(11): 2737 - 2743. (in Chinese)
周海军, 王文哲, 郑耀辉. 高增益散粒噪声探测器的性能改进[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2737 - 2743.
- [2] XY Wang, ZL Bai, PY Du, et al. Ultrastable fiber-based time-domain balanced homodyne detector for quantum communication[J]. CHIN. PHYS. LETT, 2012, 29(12): 124202.
- [3] SUN Yang, HUANG Qijun, WANG Hao, et al. Design of 5 - Gbps full differential optical receiver pre-amplifier [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2137 - 2142. (in Chinese)
孙洋, 黄启俊, 王豪, 等. 5 Gbps 全差分双端光接收前置放大器设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2137 - 2142.
- [4] DAI Yonghong, AI Yong, XIAO Wei, et al. The research of balance detector for high-speed coherence optical communications [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0125002. (in Chinese)
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.
- [5] DAI Yonghong, LIU Yanfei, ZHOU Haotian, et al. Sensi-

- tivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110 – 3116. (in Chinese)
- 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.
- [6] Kim Fook Lee, Yong Meng Sua, Harith B Ahmad. Theory and practice of cryptography and network security protocols and technologies [M]. INTECH Publishers, 2013.
- [7] ZENG ZHoumo, ZHANG Ximo, FENG Hao, et al. Control of polarization fading for dual Mach – Zehnder fiber interferometric sensing system [J]. *Opt. Precision Eng*, 2012, 20(3): 0468 – 0476. (in Chinese)
- 曾周末, 张溪默, 封皓, 等. 双 Mach – Zehnder 光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 0468 – 0476.
- [8] LIU Lisheng, ZHANG Heyong, WANG Tingfeng, et al. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. *Opt. Precision Eng*, 2015, 23(6): 1508 – 1515. (in Chinese)
- 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.
- [9] HUANG D, FANG J, WANG C H, et al. A 300 – MHz Bandwidth Balanced Homodyne Detector for Continuous Variable Quantum Key Distribution [J]. *CHIN. PHYS. LETT*, 2013, 30: 114209.
- [10] SHENG D, LI S, DURAL N, et al. Subfemtotesla Scalar Atomic Magnetometry Using Multipass Cells [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 160802.
- [11] 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.
- [12] Keigo Kamada, Yosuke Ito, Sunao Ichihara, 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.
- [13] Dolgovskiy V, Lebedev, Colombo S. A quantitative study of particle size effects in the magnetorelaxometry of magnetic nanoparticles using atomic magnetometry [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 379: 137 – 150.
- [14] FANG J, LI R, DUAN L, et al. Study of the operation temperature in the spin – exchange relaxation free magnetometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073116.
- [15] FU Min, PENG Donglin, ZHU Ge, et al. Mathematical model and error analysis of light intensity orthogonal modulation type displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng*, 2015, 23(3): 784 – 793. (in Chinese)
- 付敏, 彭东林, 朱革, 等. 光强正交调制型位移传感器的数学模型与误差分析 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 784 – 793.
- [16] QUAN Wei, LIU Yang, CHEN Yao. Accurate measurement of coating thickness for alkali vapor cells based on frustrated total internal reflection [J]. *Opt. Precision Eng*, 2014, 22(1): 0069 – 0075. (in Chinese)
- 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): 0069 – 0075.
- [17] XIE Jijiang, XU Yan, CHEN Fei, et al. Mode matching of LD-end-pumped cesium vapor laser [J]. *Opt. Precision Eng*, 2015, 23(10): 2755 – 2760. (in Chinese)
- 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.
- [18] REN Jie, LIU Hui, LU Benquan, et al. Program control in transition observation of strontium optical lattice clock [J]. *Opt. Precision Eng*, 2016, 24(1): 50 – 58. (in Chinese)
- 任洁, 刘辉, 卢本全, 等. 锶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.