#### 仪器与测量•封面文章

# 0.1 mHz—1 Hz 频段超低噪声光电探测器实验研究\*

尚鑫<sup>1</sup>) 李番<sup>1</sup>) 马正磊<sup>1</sup>) 黄天时<sup>1</sup>) 党吴<sup>1</sup>) 李卫<sup>1</sup>)<sup>†</sup> 尹王保<sup>2)3)</sup> 田龙<sup>1)3)<sup>‡</sup></sup> 陈力荣<sup>3)4)</sup> 郑耀辉<sup>1)3)</sup>

1) (山西大学光电研究所,光量子技术与器件全国重点实验室,太原 030006)

2) (山西大学激光光谱研究所,光量子技术与器件全国重点实验室,太原 030006)

3) (山西大学,极端光学协同创新中心,太原 030006)

4) (山西大学物理电子工程学院,太原 030006)

(2024年11月26日收到; 2024年12月25日收到修改稿)

针对空间引力波探测中抑制 0.1 mHz—1 Hz 频段激光强度噪声需求,基于光电二极管在光伏模式下具有低暗电流的特点,采用零偏置电压方案,结合零失调电压漂移的集成运放及低温漂金属箔电阻组成跨阻放大电路,优化跨阻电容以及跟随电路;进一步通过主动温控对光电二极管控温来稳定光电二极管响应度,研发出在 0.1 mHz—1 Hz 频段内超低电子学噪声的光电探测器.利用自研的强度噪声评估系统对其噪声进行时域及频域全面评估测试,实验结果表明:所研发探测器的电子学噪声谱密度达到 2×10<sup>-6</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>@0.1 mHz—1 Hz,探测器增益能够达到 35 kV/W @1064 nm.该探测器噪声性能比空间引力波探测中对激光强度噪声(1×10<sup>-4</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>)的要求小两个数量级,为高增益光电反馈控制以及空间引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件及技术支撑.

关键词:空间引力波探测,激光强度噪声,光电探测器,毫赫兹频段
 PACS: 95.55.Ym, 42.50.Lc, 42.60.-v
 CSTR: 32037.14.aps.74.20241635

1 引 言

自 2015 年首次直接探测到引力波信号<sup>[1-3]</sup>,目前已经有数百个引力波信号揭示了宇宙中众多天 文事件的物理过程,开辟了多信使天文学<sup>[4]</sup>.空间 引力波探测则主要针对更大天体及更低频段的引 力波信号<sup>[5]</sup>,从地球尺度构建激光干涉仪进行精密 探测.构建高精度超稳激光干涉仪是目前空间引力 波探测计划中的核心关键技术之一,这其中就需要 低噪声的激光光源. 激光器在自由运转状态下,激光强度噪声及频率噪声相对较大,会直接影响超高精度激光干涉测量技术的灵敏度<sup>[6]</sup>,所以需要对激光噪声进行抑制. 不同频段的激光强度噪声抑制所使用的方法也各不相同.地基引力波探测要求光源在10 Hz—10 kHz 频段内具有极低的激光噪声水平<sup>[7-9]</sup>,由于光电反馈回路的噪声水平受到激光散粒噪声的限制,因此 提出了一系列技术方案以进一步突破量子噪声极限,提高光电反馈链路增益,这些技术包括多光电 二极管阵列反馈<sup>[10]</sup>、光学 AC 耦合降噪<sup>[11]</sup>、压缩光 辅助降噪<sup>[12,13]</sup>等方法.空间引力波探测频段主要

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200402)、国家自然科学基金 (批准号: 62225504, U22A6003, 62035015, 12174234, 12274275)、山西省基础研究计划 (批准号: 202303021224006) 和山西省重点研发计划 (批准号: 202302150101015) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xliwei@sxu.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

<sup>© 2025</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

在 0.1 mHz—1 Hz 范围内<sup>[14,15]</sup>, 针对此频段的频 率噪声抑制, 目前可通过将激光系统中的种子激光 锁定到超稳腔上从而实现频率稳定; 对于激光强度 噪声, 则利用光电反馈控制<sup>[16,17]</sup> 的方法进行强度 噪声抑制.

利用光电反馈控制抑制激光强度噪声时,首先 需要光电探测器将激光强度波动转化为电信号,之 后与稳定电压基准进行比较,得到误差信号;然后 经过伺服控制系统对误差信号进行滤波放大,随后 作用于激光泵浦源的驱动电路或振幅调制器上,最 终实现激光强度稳定[18]. 在反馈链路中, 光电探测器 作为进行光电信号转换的首要器件,其噪声水平及 增益会直接影响整个反馈回路的信噪比及增益.此 外,不同频段的激光噪声抑制所需的光电探测器及 光电反馈链路性能也各不相同. Patrick Kwee 等<sup>[10]</sup> 研发出百 mW 级多光电二极管阵列来降低探测中 的激光散粒噪声,提高光电反馈链路增益并进行反 馈降噪. 李玉琼等<sup>[19]</sup> 在 2020 年研发了基于单光电 二极管的弱光探测器;同年,王炜杰等<sup>[20]</sup>研制了极低 频段低噪声平衡零拍探测器,其噪声在1mHz处为 3.6×10<sup>-2</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>;在 2023 年又研制了针对极低频 段强度噪声抑制的光电探测器<sup>[21]</sup>,其在空间引力 波频段的电子学噪声谱密度为 1.649×10<sup>-5</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>.

在上述研究中,针对不同频段的光电反馈抑制 噪声场景,需要选择不同性能的运放芯片进行光电 转换设计,从而降低探测器电子学噪声<sup>[22,23]</sup>.在 10 Hz—10 kHz 频段的激光强度噪声抑制中,光电 探测及整个反馈控制回路的 1/f噪声在几十赫兹 到几赫兹处.对于 0.1 mHz—1 Hz 频段激光噪声 抑制,同样受到 1/f噪声的影响,致使激光强度噪 声在响应频率范围内无法达到空间引力波探测需 求 (1×10<sup>-4</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>)<sup>[24,25]</sup>.所以为了进一步降低激 光强度噪声,需降低光电探测器的电子学噪声、提 高探测增益及提升探测器动态范围.

本文面向空间引力波探测中 0.1 mHz—1 Hz 频段激光强度噪声抑制,在分析了极低频段光电探 测器的噪声来源后,采用光电二极管两端无反向偏 置电压方案,利用光电二极管在光伏模式下具有更 低暗电流的特点<sup>[26-28]</sup>,结合零失调电压漂移的集 成运放及优化低温漂跨阻阻值及反馈电容,形成低 温漂的跨阻放大电路;并进一步对光电二极管进行 高精度温控来稳定光电二极管响应度,最终研发出 在 0.1 mHz—1 Hz 频段内超低电子学噪声的光电 探测器,并通过自研的强度噪声评估系统对光电 探测器噪声进行时域及频域的全面评估测试.实验 结果表明:所研发的低噪声探测器在 0.1 mHz— 1 Hz 频段的电子学噪声谱密度达 2×10<sup>-6</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>, 在 1 mHz 处达 7×10<sup>-7</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>. 探测器极低频段 电子学噪声相对平坦,且此噪声水平低于空间引力 波探测中对激光强度噪声要求两个数量级,为高增 益光电反馈控制以及空间引力波探测中激光强度 噪声抑制等方面提供关键器件及实验支撑.

### 2 极低频段低噪声光电探测器的原理 及设计

传统的光电探测器所考虑的电子学噪声包括: 热噪声 (*i*<sub>t</sub>)、光电二极管暗噪声 (*i*<sub>d</sub>)、散粒噪声 (*i*<sub>n</sub>) 以及运算放大器自身的输入电流噪声 (*i*<sub>TIA</sub>) 等<sup>[29]</sup>, 在进行噪声分析时,各种噪声之间是非相关的,则 探测器的总噪声可表示为

$$i_{\text{noise}}(f) = \sqrt{i_{\text{t}}^2 + i_{\text{d}}^2 + i_{\text{n}}^2 + i_{\text{TIA}}^2(f)}.$$
 (1)

根据 (1) 式给出的几个关键参数, 对于 InGaAs 材料的光电二极管, 其散粒噪声可以忽略不计. 暗 电流噪声主要与二极管的温度以及偏置电压有关<sup>[30]</sup>, 另外在电路设计中选择低失调电压、低输入噪声电 流的运算放大器也必须考量. 电路设计中, 针对空 间引力波探测的极低频段特点 (0.1 mHz—1 Hz), 在进行噪声频域分析中需要长时间的数据采集, 所 以要尽量选择低暗电流噪声的光电二极管以及设 计低噪声跨阻放大电路, 同时要兼顾探测器的温度 稳定性. 与传统的光电探测器相比, 应用于极低频 段激光强度噪声抑制的光电探测器有着极其苛刻 的电子学噪声要求.

本文所研发的低噪声光电探测器主要由一个 集成式温控光电二极管、低噪声跨阻放大电路 (transimpedance amplifier, TIA)以及跟随滤波电 路构成,其简化原理示意图如图 1 所示.低噪声探 测器的电路部分主要由温控光电二极管 (Hamamatsu G12180-150A),50 K的跨阻放大器,以及 跟随电路构成.其中,可温控光电二极管 G12180-150A 的等效电路,主要由分流电阻、结电容、串联 电阻等构成,其在 1064 nm 波长处的响应度为 0.7 A/W,(2)式可以计算出整体探测器的增益为 35 kV/W,其中 新为光电探测器响应度,TIA<sub>R</sub>为





跨阻放大器电阻:

$$k = \Re \cdot \mathrm{TIA}_{\mathbf{R}}.$$
 (2)

G12180-150A 光电二极管具有直径 5 mm 的 光敏面以及内部集成半导体制冷器 (thermo electric cooler, TEC)的配置.光电二极管的暗噪 声与温度的依赖性是非常重要的,最大程度的减小 了暗电流的影响,大的光敏面同样可以避免光束指 向偏移所导致的响应度变化,虽然大光敏面导致其 拥有较大的结电容,从而限制了探测器的带宽范 围,但对于空间引力波探测带宽是足够的.为了进 一步减小暗电流的影响,使光电二极管工作在光伏 模式下,在该模式下虽然牺牲了一定的线性响应 度<sup>[31]</sup>,但可以获得更低的暗电流噪声.

亚德诺半导体技术有限公司 (Analog Devices, Inc, ADI) 所生产的 LTC1151 芯片是双通道的 零漂运算放大器,其具有极低的失调电压漂移 (0.05 μV/℃) 以及低输入电压、电流噪声,双通道 的设计结构可以同时满足跨阻放大电路以及滤波 跟随电路的应用需求.另外在运算放大器中,任何 电源电压的变化都会引起运放输入偏置电流的变 化,从而导致探测器输出电压变化,因此电源电压 的变化是一个潜在的低频噪声源.LTC1151 芯片 具有高电源抑制比,配合自研低频低噪声供电电源 可以有效减少电源电压噪声的耦合.

此外,影响极低频段探测器性能的另一个重要 影响因素是温度漂移.这里区别于传统探测器的电 学噪声——热噪声<sup>[32]</sup>,也被称为"约翰逊噪声",产 生原因是电子器件中的电荷载流子由于热激励而 引起的噪声.而温度漂移的来源分为内部温度扰动 以及外部温度扰动,这种扰动会直接影响电子器件 的实际参数,一般为低频噪声.尽量选择温度系数 相对较低的电阻,如 0.2 ppm/℃ (ppm = 10<sup>-6</sup>)的 金属箔电阻.外部温度扰动通常指实验环境温度的 变化,绝热保温壳体以及适当的温度控制是解决该 影响的最直接的方式;内部温度扰动主要来源于温 控光电二极管的热端以及电路板的温升变化,必须 设计合适的封装以及主动的温度控制来尽可能减 小这种效应的影响.为了有效避免塞贝克效应<sup>[33]</sup>, 使用低热电势插头以及定期保养电路板防止金属 氧化也是非常重要的,例如,铜一旦氧化会产生高 达 1000 µV/℃ 的电动势<sup>[34]</sup>.

### 3 0.1 mHz—1 Hz 频段低噪声光电 探测器性能测试及表征

为了验证极低频段低噪声光电探测器设计方案的可行性,从静态噪底测试与动态打光测试两方面来评估探测器的噪声性能.图2所示为光电探测器静态噪底的测量原理图,测量过程中对光电二极管的光敏面进行遮光处理,另外为了避免杂散光对最终结果的影响,将光电探测器置于一个封闭的铝壳内,壳体材料均进行氧化发黑处理.高精度温控装置、低噪声供电电源等都置于壳外,避免发热影响实际测量结果.另外,实验采用吉时利 3706高精度数字万用表并结合 LabVIEW 编程对探测器的输出电压值进行采集和时域处理<sup>[35]</sup>.

首先对信号采集部件进行相应测试<sup>[21]</sup>,测试 仪器本底噪声低于 4.16×10<sup>-7</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>@0.1 mHz— 1 Hz,确定其能够满足测量探测器电子学噪声的 要求.根据第 2 节的低频段探测器设计思路,光电 二极管工作在光伏模式可以减小暗噪声的影响,因 此对比了光电二极管工作在光伏模式与光电导模 式的不同电子学噪声情况,如图 3 所示.在这里需 要说明的一点是,为了评判探测器长期的稳定性并 且完全表征极低频段的噪声性能,每组对比数据的 测量时长都不低于 11 h,采样率设置为 2 S/s.同 时为了保证实验对比结果的准确性,必须选用相同 的探测器电路结构和电子器件,选用 AD797 作为 跨组运放芯片,测试遵循单一变量原则.

图 3 所示为时域和频域测试结果,绿色噪声曲 线为探测器工作在光电导模式,紫色噪声曲线为探 测器工作在光伏模式.观察图 3(a)时域信号,在光 电导模式下,探测器电子学噪声因为基准芯片的存 在有明显的输出偏置电压,高达-1.1 mV,并且由 于基准芯片受温度影响较大,探测器输出也会存在 明显的温度周期,进而增加与温度周期相应频段的 暗噪声;而光伏模式下没有基准芯片的参与,因此 不存在随温度的变化.利用自研评估系统将时域信 号转化为频域信号<sup>[35]</sup>,图 3(b)所示为频域结果,随 温度的漂移会影响极低频段的电压噪声谱,时域上 的温度周期约为2h,会相应的增大0.1mHz处的 噪声;同时光电导模式拥有较大的暗电流噪声,会 影响100mHz—1Hz的探测器电子学噪声水平. 与此同时,对比了光电二极管在有无主动温度控制 的情况下对电子学噪声的影响;图3中紫色噪声曲 线与红色噪声曲线无明显差别,结果表明光电二极 管由温度所产生的暗噪声对探测器电子学噪声影 响可以忽略不计,但温度变化会影响光电二极管响 应度,对于光照时温控是非常必要的.综上所述, 光电二极管工作在光伏模式并且对其进行主动温 度控制是对于极低频段激光强度噪声抑制的适用 方案.

在探测器设计中,由于电路设计原因引入的电 子学噪声要远大于光电二极管的暗噪声.本次所设 计的低噪声光电探测器,采用交直流不分的电路结 构,主要由 TIA 电路和电压跟随电路构成,输出端 串联一个 50 Ω 的电阻,保证信号输出与下级装置 的阻抗匹配.对于极低频段的噪声来源,运算放大



#### 图 2 探测器静态测量原理示意图

Fig. 2. Schematic diagram illustrating the principle of static measurement in detectors.



图 3 光电二极管不同工作模式下电子学噪声测试表征 (a) 时域测试图; (b) 频域测试图

Fig. 3. Characterization of photodiode electronic noise test in different operating modes: (a) Date results in time-domain; (b) noise power spectrum obtained by LPSD algorithm.

器的失调电压是一个关键影响因素,要尽可能选择 低失调电压的运放芯片.此外,失调电压漂移也是 一个十分关键的参数,这决定了探测器抗环境温度 干扰的能力大小,实验室环境温度漂移大约2h一 个周期,更低的失调电压漂移运放芯片可以在更大 程度上减少环境噪声的耦合.

几种常见的低噪声运算放大器如表1所示,分 别是 AD8671, AD797 以及 LTC1151,表1列出了 影响探测器极低频噪声的几个关键参数.从表1可 知, LTC1151 芯片具有极低的失调电压漂移,典型 值为 0.01 µV/℃;输入失调电压也仅为 0.5 µV,远 小于其他两种运放芯片.

接下来,通过实验对比了探测器使用不同芯片 的电子学噪声影响,实验中所采用的光电二极管, 反馈电阻以及其他外围电路等均保持一致.为了避 免环境温度对探测器的影响,将3个不同的跨阻芯 片的探测器置于一个封闭的绝热壳体内,利用多通 道数字万用表同时进行数据采集,测试结果如图4 所示.

从图 4(a) 时域观察可以发现,选用 AD797 与 AD8671 作为跨阻芯片的探测器时,其短时间的峰 峰值噪声更小,但长时间的失调电压漂移却要比选 用 LTC1151 跨阻芯片的探测器更大.如图 4(b) 所 示, LTC1151 探测器在 0.1—10 mHz 的噪声性能

表 1

更好,但由表1可知,该芯片在0.1—10 Hz 频段内 相比于另外两个芯片有着更大的输入电压噪声,所 以图4(b)中LTC1151在接近1Hz频率处的电压 噪声谱更高.在空间引力波探测中关于激光相对强 度噪声的要求为1×10<sup>-4</sup>Hz<sup>1/2</sup>@(0.1 mHz—1Hz), 所以在引力波要求频段内接近于10<sup>-6</sup>V/Hz<sup>1/2</sup>的 探测器电压噪声谱可以完全满足应用需求,并且选 用该芯片的探测器在极低频段表现更好,避免了由 于温度引起的各种低频段噪声影响,遂选用该芯片 作为探测器的核心芯片.

上述实验已完整测试了探测器静态情况下的 噪声性能,相比于 2023 年本实验小组设计的探测 器<sup>[21]</sup>,此次探测器在极低频处 (0.1—1 mHz) 具有 更低的电子学噪声.接下来将探测器置于预先设计 好的光路中,测量动态响应度及激光入射后的极低 频线性度噪声特性.图 5 所示为光路原理图,激光 器输出 1064 nm 激光,经过隔离器后通过 λ/2 波 片与偏振分束棱镜调节透射光功率,用透镜将激光 光束聚焦到光电探测器的光电二极管光敏面上进 行光电转换,光电二极管光敏面与激光入射方向约 呈 60°夹角,并用吸收片吸收光敏面的微弱反射光, 防止激光散射影响探测准确性.

为了保证长时间采集测量的准确性,必须减小激光功率波动对于该实验的影响,选择一台非平面

Table 1. Comparison of key parameters of three low-noise operational amplifier chips.				
Operational Amplifier model	$\begin{array}{l} \text{Offset voltage} \\ \text{drift}/(\mu V {\cdot}  {}^{\circ}\!\! C^{-1}) \end{array}$	Input offset voltage/ $\mu V$	Input offset current/nA	Input noise voltage $V_{\rm p-p}$ (0.1—10 Hz)/nV
AD8671	0.3	30	8	77
AD797	0.2	30	120	50
LTC1151	0.01	0.5	0.02	1500

三种低噪声运放芯片关键参数对比

C + 1



图 4 光电探测器在不同运放下电子学噪声测试表征 (a) 时域测试图; (b) 频域测试图

Fig. 4. Photodetectors are characterized using different operating electronics noise tests: (a) Date results in time-domain; (b) noise power spectrum obtained by LPSD algorithm.



图 5 光电探测器测试原理图,其中 Laser 为固体激光器, ISO 为光隔离器; λ/2 为半波片, PBS 为偏振分束器, Filter 为光衰减器, PD 为光电探测器; Meter 为高精度数字万用表

Fig. 5. Photodetector test diagram, where Laser is solid-state laser; ISO is optical isolator;  $\lambda/2$  is half-wave-plate: PBS is polarization beam splitter; Filter is optical attenuator; PD is photodetector; Meter is high-precision digital multimeter.

环形腔 (non-planar ring oscillator, NPRO) 激光器 作为测试光源, 其均方根 (root mean square, RMS) 可以达到 0.23%. 调节初始进入光电探测器功率 为 33 µW,随后成倍增大注入光功率, 直到 495 µW, 其中光功率误差波动范围为±3 µW, 功率计使用 的是 THORLABS 公司的光电二极管功率传感器, 型号为 S132C, 分辨率为 1 nW. 之后利用高精度 数字万用表长时间测量探测器输出电压并得到时 域信号, 进一步转化为频域信号.

探测器的输入功率与输出电压测量结果如图 6 所示,其中横纵坐标分别为测量 1500 s 时间内的 平均值,红色曲线为实际测量值,蓝色曲线为探测 器完全线性时的输出;从第 2 节理论中已经了解到 光电二极管工作在光伏模式下会牺牲一定的线性 度,但图 6 中的实际输出电压曲线在低功率下也呈 现出基本的线性相关,429 μW 之后的高功率非线 性主要由于功率过大导致输出运放饱和. 对输出信 号的噪声进行评估,图 7(a)中选取 4 个相差 2 倍 的输入功率作为参考,当光功率每增大 1 倍时,探 测器输出电压也增加约 1 倍.由图 7(b)的噪声谱 可知,当光功率每增大 1 倍时,探测器的输出噪声 谱在 0.04—1 Hz 频段内增大幅度均小于 1 倍,这 样可以保证探测器工作时不会产生额外噪声或产



图 6 探测器输入输出线性度表征

Fig. 6. Characterization of detector input and output linearity.

生的噪声极小, 在实验中可以排除探测器的影响. 而在 0.04 Hz 以下频段内环境温度对光功率有显 著影响, 实验不能保证每次测量温度波动一致, 因 此不做分析, 并且由于激光泵浦驱动电子设备的影 响, 在 100, 300 以及 800 mHz 处存在一些特定频 点的尖峰噪声.



图 7 探测器线性度测试噪声谱表征 (a) 时域测试图; (b) 频域测试图

Fig. 7. Detector linearity test noise spectral characterization: (a) Date results in time-domain; (b) noise power spectrum obtained by LPSD algorithm.

#### 4 结 论

本文从空间引力波探测中抑制毫赫兹频段激 光强度噪声的需求出发,从传统的光电探测器到极 低频段低噪声光电探测器的噪声源进行分析,并提 出其遵循的设计原则:光电二极管工作在光伏模式 下减小其暗噪声;结合零失调放大器组成的跨组放 大电路抑制其低频噪声;使用低温漂金属箔电阻, 电容及其他电子器件减少温度漂移带来的影响;进 一步通过主动温控来控制光电二极管响应度等措 施,研发出在 0.1 mHz—1 Hz 频段内超低电子学 噪声的光电探测器,并且光电探测器动态响应度基 本符合线性要求.所研发的低噪声探测器在空间引 力波频段的电子学噪声谱密度在 2×10<sup>-6</sup> V/Hz<sup>1/2</sup> 以下,在 0.1 mHz 处为 2×10<sup>-6</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>,在 1 mHz 处为 7×10<sup>-7</sup> V/Hz<sup>1/2</sup>;探测器增益为 35 kV/W,线 性度符合要求.该探测器噪声性能比空间引力波探 测中对激光强度噪声要求小两个数量级,可为引力 波探测中激光强度噪声要求小两个数量级,可为引力

#### 参考文献

- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, Acernese F, Ackley K, Adams C, Adams T, Addesso P, Adhikari R X, Adya V B 2016 Phys. Rev. Lett. 116 061102
- [2] Abbott R, Abbott T D, Abraham S, Acernese F, Ackley K, Adams C, Adhikari R X, Adya V B, Affeldt C, Agathos M 2020 Astrophys. J. Lett. 896 L44
- [3] Abbott R, Abbott T D, Abraham S, Acernese F, Ackley K, Adams A, Adams C, Adhikari R X, Adya V B, Affeldt C 2020 Phys. Rev. Lett. 125 101102
- [4] Sathyaprakash B S, Schutz B F 2009 Living Rev. Relativ. 12
   2
- [5] Jennrich O 2009 Class. Quantum Grav. 26 153001
- [6] Wang Z Y, Wang J H, Li Y H, Liu Q 2023 Acta Phys. Sin.
   72 054205 (in Chinese) [王在渊, 王洁浩, 李宇航, 柳强 2023 物 理学报 72 054205]
- [7] Badaracco F, Harms J, De Rossi C, Martynov D, Swinkels B L, Shoda A, van Heijningen J, Staley A, Matone L, Boschi V, Ohashi M, Hild S, Naticchioni L 2021 *Phys. Rev. D* 104 042006
- [8] Li W, Xie C B, Li Q H, Ju M J, Wu Z X, Zheng Y H 2023 *Quantum Opt.* 29 040201 (in Chinese) [李卫, 谢超帮, 李庆回, 鞠明健, 武志学, 郑耀辉 2023 量子光学学报 29 040201]
- [9] Li Q H, Li W, Sun Y, Wang Y J, Tian L, Cheng L R, Zhang P F, Zheng Y H 2022 Acta Phys. Sin. 71 164203 (in Chinese)
  [李庆回,李卫, 孙瑜, 王雅君, 田龙, 陈力荣, 张鹏飞, 郑耀辉 2022 物理学报 71 164203]
- [10] Kwee P, Willke B, Danzmann K 2009 Opt. Lett. 34 2912
- [11] Liu J Y, Han Y F, Chen L R, Zhao Q, Wu Y P, Li L, Wang Y J, Zheng Y H 2025 *Quantum Opt.* **31** 040201 (in Chinese)
  [刘骏杨, 韩逸凡, 陈力荣, 赵琴, 武延鹏, 李林, 王雅君, 郑耀辉 2025 量子光学学报 **31** 040201]
- [12] Vahlbruch H, Wilken D, Mechmet M, Wilke B 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 173601
- [13] Gao L, Zheng L A, Lu B, Shi S P, Tian L, Zheng Y H 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 294
- [14] Luo Z, Wang Y, Wu Y, Mei J, Zhong Y, Hu Y, Yang S, Chen

P, Chen X, Chen Y 2021 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021** 05A108

- [15] Luo J, Chen L S, Duan H Z, Gong Y G, Hu S C, Ji J H, Liu Q, Mei J W, Milyukov V, Sazhin M, Shao C G, Toth V T, Tu H B, Wang Y M, Wang Y, Yeh H C, Zhan M S, Zhang Y, Zharov V, Zhou Z B 2016 Class. Quantum Grav. 33 035010
- [16] Buchler B C, Huntington E H, Harb C C, Ralph T C 1998 *Phys. Rev. A* 57 1286
- [17] Tröbs M 2005 Ph. D. Dissertation (Hannover: Leibniz University Hannover)
- [18] Zhang J 2020 Ph. D. Dissertation (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张骥 2020 博 士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [19] Li Y Q, Wang L Y, Wang C Y 2019 Opt. Precis. Eng. 27
   1710 (in Chinese) [李玉琼, 王璐钰, 王晨昱 2019 光学精密工程 27 1710]
- [20] Wang W J, Li F, Li J B, Ju M J, Zheng L A, Tian Y H, Yin W B, Tian L, Zheng Y H 2022 *Infrared Laser Eng.* 51 20220300 (in Chinese) [王炜杰, 李番, 李健博, 鞠明健, 郑立昂, 田宇航, 尹王保, 田龙, 郑耀辉 2022 红外与激光工程 51 20220300]
- [21] Zheng L A, Li F, Wang J W,Li J B,Gao L,He Z Y,Shang X,Yin W B,Tian L,Yang W H,Zheng Y H 2023 Acta Photonica Sin. 52 0552220 (in Chinese) [郑立昂,李番, 王嘉伟,李健博,高丽,贺子洋,尚鑫,尹王保,田龙,杨文海,郑耀辉 2023 光子学报 52 0552220]
- [22] Understanding and Eliminating 1/f Noise, Robert K https:// www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/ 2017/04/21/10/42/understanding-and-eliminating-1-f-noise. html [2024-12-10]
- [23] Measuring 2nV/√Hz Noise and 120 dB Supply Rejection on Linear Regulators, Todd O, Amit P https://www.analog.com/ cn/resources/app-notes/an-159.html [2024-12-10]
- [24] Sallusti M, Gath P, Weise D, Rivas M, Vitelli M 2009 Class. Quantum Grav. 26 094015
- [25] Cutler C, Thorne K S 2002 General Relativity and Gravitation (Singapore: World Scientific) pp72–111
- [26] Hayashida T, Nanjo T, Furukawa A, Yamamuka M 2017 Appl. Phys. Express 10 061003
- [27] Li W S, Nomoto K, Pilla M, Pan M, Gao X, Jena D, Xing H G 2017 IEEE Trans. Electron Devices 64 1635
- [28] Cooper J A Jr, Melloch M R, Singh R, Agarwal A, Palmour J W 2002 IEEE Trans. Electron Devices 49 665
- [29] Zhou H J, Wang W Z, Cheng C Y, Zheng Y H 2015 IEEE Trans. Electron Devices 15 2101
- [30] Using MCP6491 Op Amps for Photodetection Applications, Yang Zhen https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/01494A.pdf [2024-12-10]
- [31] Graeme J G 1996 Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions 1st ed (New York: McGraw-Hill) pp21–23
- [32] Chilingarian A 1995 Pattern Recognit. Lett. 16 335
- [33] Chen X, Luo M, Hu R Z, Li R, Liang L J , Pang S Y 2019 J. Manuf. Process. 41 111
- [34] Williams J 2001 Electrical Design News: The Magazine of the Electronics Industry 46 83
- [35] Li F, Wang J W, Gao Z C, Li J B, An B N, Li R X, Bai Y, Yin W B, Tian L, Zheng Y H 2022 Acta Phys. Sin. 71 209501 (in Chinese) [李番, 王嘉伟, 高子超, 李健博, 安炳南, 李瑞鑫, 白禹, 尹王保, 田龙, 郑耀辉 2022 物理学报 71 209501]

#### **INSTRUMENTION AND MEASUREMENT • COVER ARTICLE**

## Experimental study of ultra-low noise photodetectors in 0.1 mHz–1 Hz frequency band<sup>\*</sup>

DANG Hao<sup>1)</sup> LI Wei<sup>1)†</sup> YIN Wangbao<sup>2)3)</sup> TIAN Long<sup>1)3)‡</sup>

CHEN Lirong<sup>3)4)</sup> ZHENG Yaohui<sup>1)3)</sup>

1) (State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

2) (State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

3) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

4) (College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

( Received 26 November 2024; revised manuscript received 25 December 2024 )

#### Abstract

Laser intensity noise suppression in the millihertz frequency band is essential for space-based gravitational wave detection to ensure the sensitivity of the interferometer. Optoelectronic feedback technology is one of the most effective methods of suppressing laser intensity noise. The noise of the photodetector that is the first-stage component in the feedback loop, directly couples into the feedback loop, thus significantly affecting the laser intensity noise. In this paper, starting from the requirement of suppressing laser intensity noise in the 0.1 mHz-1 Hz frequency band for space-based gravitational wave detection, the factors affecting the electronics of photodetectors at extremely low frequencies are analyzed in detail. Using the low dark current characteristic of photodiodes in photovoltaic mode, a zero-bias voltage scheme is adopted to reduce the dark noise of the photodiode. A transimpedance amplification circuit is designed using an integrated operational amplifier with zero offset voltage drift and low-temperature drift metal foil resistors, thereby optimizing the transimpedance capacitor and follower circuit to reduce 1/f noise in the circuit. Active temperature control is employed to stabilize the responsivity of photodiode, and additional measures such as using a homemade low-noise power supply and shielding interference are taken to further reduce the noise. Ultimately, an ultra-low electronic noise photodetector operating in the 0.1 mHz-1 Hz frequency band is developed. A homemade intensity noise evaluation system is used to comprehensively assess the noise both in the time domain and in the frequency domain. The constant noise characteristics of the homemade detector are estimated experimentally. The experimental results show that the electronic noise spectral density of the homemade detector reaches  $2 \times$  $10^{-6}$  V/Hz<sup>1/2</sup> in the 0.1 mHz-1 Hz frequency band, and the electronic noise of the detector does not vary with optical power. The detector achieves a gain of 35 kV/W at 1064 nm. The noise performance of the detector is two orders of magnitude lower than the laser intensity noise requirement  $(1 \times 10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2})$  for space-based gravitational wave detection, providing a critical component and technical support for high-gain optoelectronic feedback control and laser intensity noise suppression in space-based gravitational wave detection.

Keywords: space-based gravitational wave detection, laser intensity noise, photodetector, millihertz band

**PACS:** 95.55.Ym, 42.50.Lc, 42.60.-v

**DOI:** 10.7498/aps.74.20241635

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241635

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62225504, U22A6003, 62035015, 12174234, 12274275), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202303021224006), and the Key R&D Program of Shanxi, China (Grant No. 202302150101015).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xliwei@sxu.edu.cn

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

物理学报Acta Physica Sinica





Institute of Physics, CAS

## 0.1 mHz—1 Hz频段超低噪声光电探测器实验研究 尚鑫 李番 马正磊 黄天时 党吴 李卫 尹王保 田龙 陈力荣 郑耀辉

#### Experimental study of ultra-low noise photodetectors in 0.1 mHz1 Hz frequency band

SHANG Xin LI Fan MA Zhenglei HUANG Tianshi DANG Hao LI Wei YIN Wangbao TIAN Long CHEN Lirong ZHENG Yaohui

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 059501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241635 CSTR: 32037.14.aps.74.20241635 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20241635 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection 物理学报. 2022, 71(20): 209501 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841

面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器

Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection 物理学报. 2023, 72(5): 054205 https://doi.org/10.7498/aps.72.20222127

面向空间引力波探测的程控低噪声高精度电压基准源

Programmable precision voltage reference source for space-based gravitational wave detection 物理学报. 2023, 72(4): 049502 https://doi.org/10.7498/aps.72.20222119

面向地基引力波探测频段的超低噪声激光强度噪声评估系统 Ultra-low-noise laser intensity noise evaluation system in Hz frequency band for ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2025, 74(3): 034202 https://doi.org/10.7498/aps.74.20241319

利用脉冲激光沉积外延制备CsSnBr2/Si异质结高性能光电探测器

High-performance CsSnBr<sub>3</sub>/Si PN heterojunction photodetectors prepared by pulsed laser deposition epitaxy

物理学报. 2024, 73(5): 058503 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231645

基于TiO<sub>2</sub>纳米柱的多波段响应Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>双钙钛矿光电探测器

Multi-band response Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> double perovskite photodetector based on TiO<sub>2</sub> nanopillars

物理学报. 2024, 73(7): 078502 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231919