

·信号与信息处理·

## 光电探测器脉冲相关噪声增强效应研究

张月, 王睿

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘要:** 实验研究发现短脉冲激光可诱导光伏型碲镉汞(HgCdTe)探测器产生噪声增强的现象,通过设计系统的对比实验,明确了此类噪声增强效应产生的根源和诱导途径,并对该类噪声增强效应的抑制方法提出了建议。研究表明,此类噪声增强效应源于短脉冲激光器的放大级电源;该放大级电源处于高频工作状态,会产生较强的电磁脉冲,该电磁脉冲通过自由空间传播直接诱导探测器工作电路产生噪声增强效应,与探测器和激光器间外接链接电路和光敏元无主要关联。静电屏蔽罩、加长探测器与激光器的距离等方法可有效降低该类噪声。

**关键词:** 噪声增强;光电探测器;脉冲激光

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0024-06

## Experimental Research on Pulse Correlation Noise Enhancement Effect of Photoelectric Detector

ZHANG Yue, WANG Rui

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The noise enhancement effect of photovoltaic HgCdTe detectors caused by ultrashort pulse laser is discovered in experimental study, and its source and induction routes are researched through the experiments. The suggestions to suppress the noise enhancement effect are proposed. Experimental results show that the noise enhancement effect is primarily caused by the amplifying power supply of the ultrashort pulse laser at high-frequency which would produce stronger electromagnetic pulse. The electromagnetic pulse passes through free space to induce directly the circuits of detectors to produce noise enhancement effect, and the external link circuit between the detector and the laser and the photosensitive element is not the main association. Electrostatic shield and extending the distance between the detector and the laser can effectively reduce this kind of noise.

**Key words:** noise enhancement; photoelectric detector; pulse laser

激光参数的测量,如功率、能量、脉宽、光束质量,一直是激光领域关注的重要主题。近年来,超短脉冲激光器发展迅速,超短、超强、超亮等给激光参数测量带来了新的挑战,同时也给测量方法和器件改进等创新带来了新的机遇。光电探测器是激光参数测量的核心部件,决定测量的动态范围、准确度和精度等。以往人们主要关注光电探测器内部噪声的来源与抑制<sup>[1-4]</sup>;超短脉冲激光器噪声的测

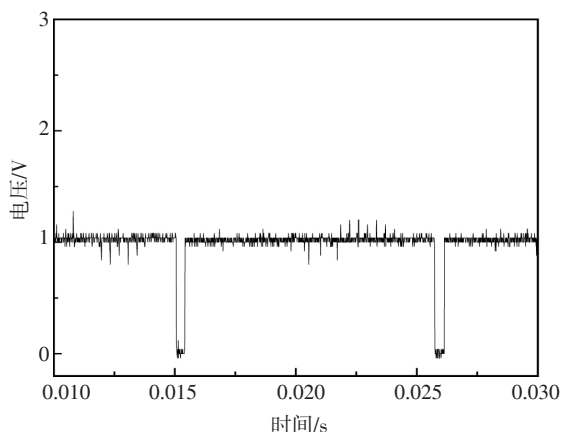
量与抑制<sup>[5-6]</sup>,而对于超短脉冲激光器诱发电探测器的噪声问题还未见报道,文中正是对这一问题展开研究。

在研究皮秒脉冲激光对碲镉汞红外焦平面阵列器件的辐照效应过程中,发现光电探测器的响应曲线包含很强的噪声干扰,已严重影响探测器的响应准确度与图像质量。图1为有脉冲激光与无脉冲光辐照碲镉汞探测器的响应电压。图1a展示了无

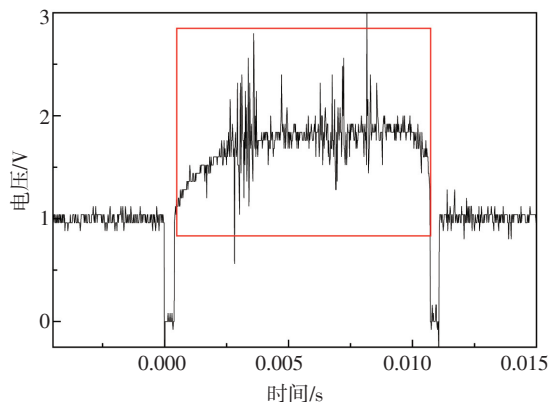
收稿日期: 2018-01-18

作者简介: 张月(1993-),女,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究;王睿(1976-),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

光照时碲镉汞探测器的响应电压,图1b展示了单脉冲皮秒激光辐照碲镉汞探测器时的响应电压,图中两低电平之间为一个积分周期,图1b中第二个积分周期为单脉冲皮秒激光辐照的周期(图中红框部分)。



(a)无脉冲光时碲镉汞探测器的响应电压



(b)单脉冲激光辐照碲镉汞探测器的响应电压

图1 有脉冲激光与无脉冲光辐照碲镉汞探测器的响应电压

从图中可以看出,无光照时,探测器每个周期都存在一定的固有噪声,其峰峰值电压约在0.2 V左右,将其认为是噪声的电压幅值;而在脉冲激光辐照周期内,在固有噪声的基础上又叠加了更强的干扰噪声,其电压幅值可达1.5 V,这种现象称为噪声增强效应。

探测器固有噪声的电压幅值约为0.2 V,探测器饱和电压为3.8 V,加之采用相关双采样电路,固有噪声对探测器光信号的影响较小。但脉冲激光诱导的噪声幅值约为1.5 V,且相关双采样电路无法去除该噪声信号,该噪声对探测器有效光信号的提取影响很大,一些有价值、新的特征信息也可能被隐藏,因此对该类噪声增强效应产生来源及诱导途径的研

究具有重要现实意义,文中将针对该问题展开深入研究,希望对有效抑制该类噪声提供有益的帮助。

## 1 实验内容及方案

实验采用皮秒脉冲激光器,波长为1 064 nm,脉宽为25 ps,单脉冲能量为200 mJ,探测器焦面处的光斑直径约为1.0 mm。光电探测器为光伏型512×1线阵碲镉汞探测器,探测器芯片被封装到杜瓦瓶内,探测器响应光谱范围为1~3 μm,工作温度为77 K,光敏元尺寸为28×28 μm。

图2为实验光路示意图。

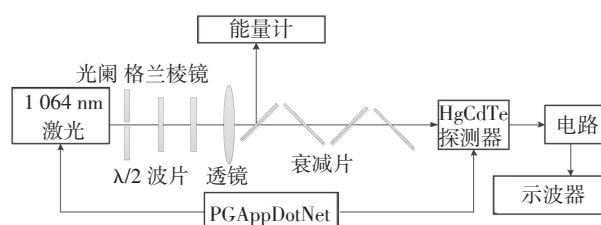


图2 实验装置示意图

实验采用单脉冲方式进行辐照,皮秒脉冲激光经过小孔光阑、 $\lambda/2$ 波片、格兰棱镜、聚焦透镜、衰减片,垂直辐照在探测器的光敏面上。在第一片衰减片处的反射光进入能量计以监测激光能量。通过格兰棱镜和衰减片的共同作用来调节辐照到探测器上的激光能量。码型发生器(PGAppDotNet)控制探测器和脉冲激光器的触发时序,使脉冲激光准确的打到探测器的积分时间内。通过示波器采集探测器对脉冲激光的响应电压,并以此来分析探测器输出信号中的噪声情况。

## 2 噪声来源

光电探测器的响应噪声主要来自两个部分:一是光电探测器接收信号的过程中出现的噪声,干扰源来自器件外部;二是光电探测器内部产生的固有噪声,干扰源来自器件内部。

### 2.1 增强噪声不是由探测器内部损伤所致

设计实验对比了#1、#2两个型号相同的线阵碲镉汞探测器在激光辐照下的噪声情况,确定了噪声与探测器内部读出电路损伤无关,实验结果如图3

所示。#1探测器损伤点较多,#2无损伤点。图3a是#1碲镉汞探测器在皮秒脉冲激光辐照下的响应电压,图中红框内幅值超过1 V的尖峰为损伤单元,从图中可以看到,#1探测器除损伤单元外,存在幅值约0.5 V的噪声干扰,如图1a蓝框部分无光情况下探测器的噪声情况,可以明显看到噪声增强效应。图3b为#2碲镉汞探测器在皮秒脉冲激光辐照下的响应电压,可以明显看到探测器中存在约1.5 V的噪声干扰,同样与无光下探测器的噪声情况对比,可以明显看到噪声增强效应。

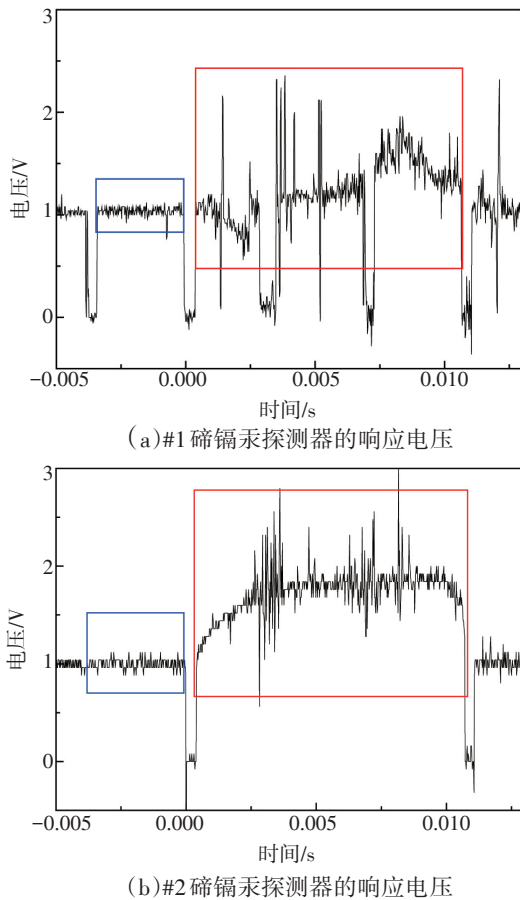


图3 #1、#2探测器在脉冲激光辐照下的噪声情况

综上所述可以看出,#1、#2探测器中均存在噪声增强效应,与探测器是否损伤无关,且该增强效应不是某个探测器存在的偶然现象,表现为该类器件的共性特征。同时根据此次实验结果,可以排除噪声增强效应的噪声是来自探测器内部读出电路损伤。

## 2.2 脉冲激光器放大级开关电源的电磁干扰是增强噪声的主要来源

设计实验对比了激光器放大级电源打开和关

闭时探测器在脉冲激光辐照下的噪声情况,确定了增强噪声与激光器内部放大级开关电源存在直接关联,实验结果如图4所示。图4a是激光器放大级电源关闭时碲镉汞探测器的噪声情况,图4b是激光器放大级电源打开时碲镉汞探测器的噪声情况。实验使用的皮秒激光器在放大级电源打开前仅发出与脉冲光同轴的1 064 nm连续光,图4a为此条件下探测器的响应情况,其中红色方框内为探测器对1 064 nm连续光响应的结果,碲镉汞探测器的噪声电压幅值约0.1 V。当放大级电源打开后,然后通过码型发生器给激光器提供触发时序,此时激光器将同时发出1 064 nm的连续光与皮秒脉冲光,图4b为该条件下探测器的响应情况。可以看出,当激光器放大级电源打开后,碲镉汞探测器存在约2 V的噪声干扰,出现明显的噪声增强效应。

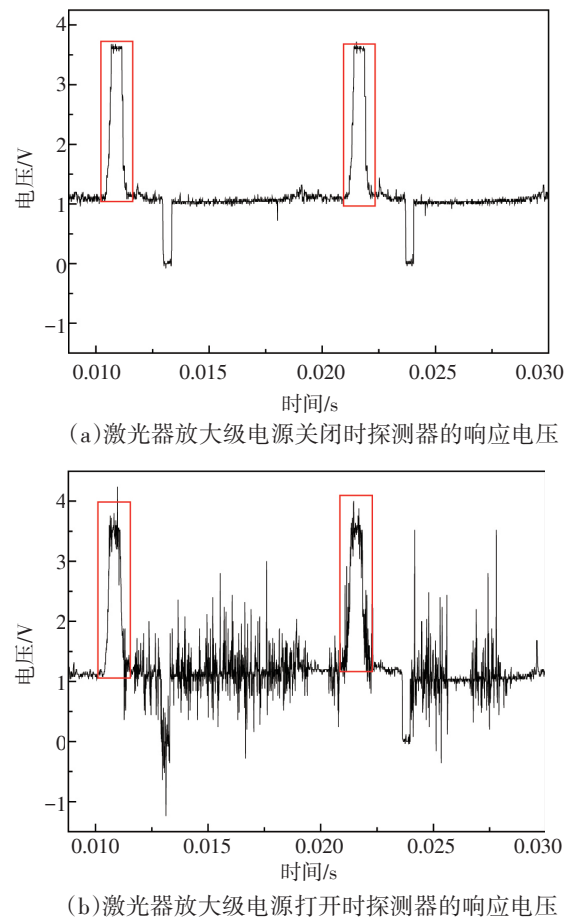


图4 激光器放大级电源打开和关闭时探测器的响应噪声情况

对比脉冲激光器内部放大级电源打开前后探测器响应图像中的噪声情况,可以发现,增强噪声

主要存在于激光器放大级电源打开后。固体脉冲激光器内部电源的主要功能有:对储能电容器充电和对泵浦灯放电。通常脉冲激光器电源选择如图5所示的电源。

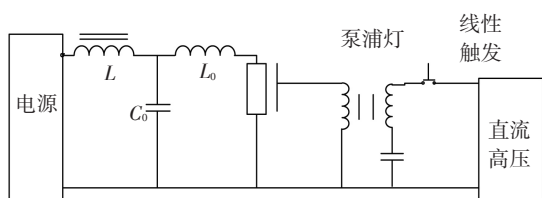


图5 固体脉冲激光器电源

其中 $L$ 为限流电感, $C_0$ 为储能电容。当激光器工作时,电流通过限流电感 $L$ 向储能电容 $C_0$ 充电,达到工作电压后通过电感 $L_0$ 向泵浦灯放电,提供触发泵浦灯的直流高压。

在实际设计中,通常将电源工频变压器换为开关电源电路。开关电源工作在高频开关状态,内部电流与电压变化率很高,它们产生浪涌电流和尖峰电压从而形成干扰源,本电路中的储能电容 $C_0$ 充电放电就是此类干扰源,会使开关电源产生较强的电磁干扰EMI<sup>[7]</sup>,从而以噪声的形式影响探测器的响应。

另外,对比图4a与图1a无光辐照时探测器的噪声情况,探测器噪声幅值相似,均对探测器的输出响应影响较小,可以认为此时不存在噪声增强效应。

### 3 噪声增强效应的诱导途径

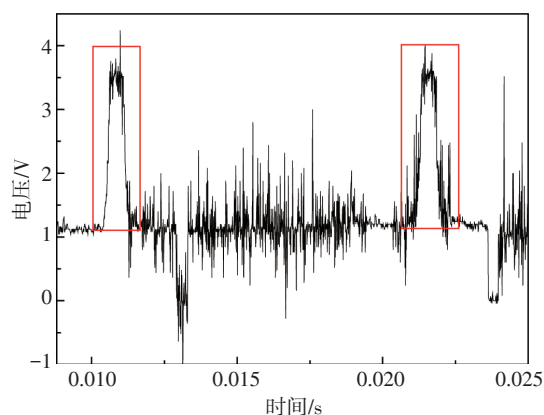
结合具体的实验系统,通过研究电磁波诱导途径,分析认为通过探测器电路输出的增强噪声可能的诱导途径有三种:空气、链接电路、光敏元。下面通过三个对比实验来研究增强噪声的诱导途径。

#### 3.1 链接电路不是增强噪声的诱导途径

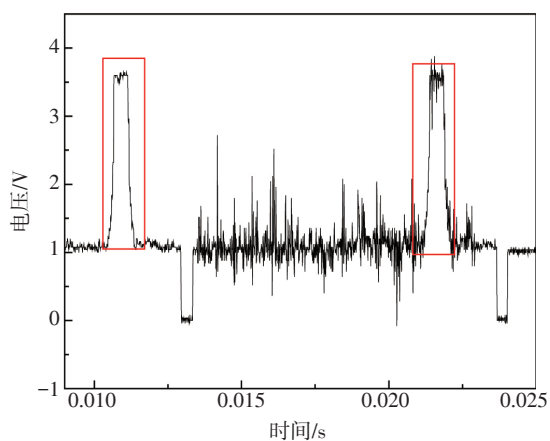
实验中,脉冲激光器与探测器通过码型发生器间接相连,因此,断开码型发生器与激光器相连的两路时序信号就可以切断激光器与探测器的链接电路,从而判断噪声的诱导途径是否与链接电路有关。

图6是连接与断开探测器与激光器的链接电路时探测器的噪声情况。其中图6a为存在探测器与

激光器链接电路时探测器的响应电压,图6b为断开探测器与激光器链接电路时探测器的响应电压,图中红框内为探测器光敏元对1064 nm连续光的响应电压。图6a中探测器的响应曲线中存在幅值约2 V的噪声电压,因此当探测器与激光器有链接电路时,存在噪声增强效应;图6b中探测器的响应曲线中存在电压幅值约1.5 V的噪声响应,因此在断开探测器与激光器的链接电路时,噪声增强效应仍然存在。



(a)连接探测器与激光器的电路连接时探测器的响应电压



(b)断开探测器与激光器的电路连接时探测器的响应电压

图6 连接与断开探测器与激光器的电路连接时探测器的响应噪声情况

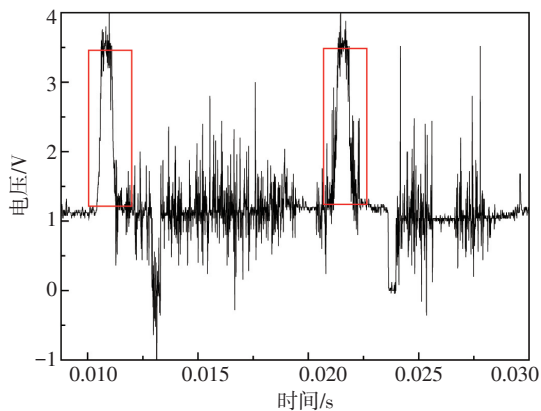
从实验结果可以看出,无论脉冲激光器与探测器间是否存在链接电路,噪声增强效应始终存在,因此噪声增强效应的噪声传播与探测器和激光器的电路连接无关。



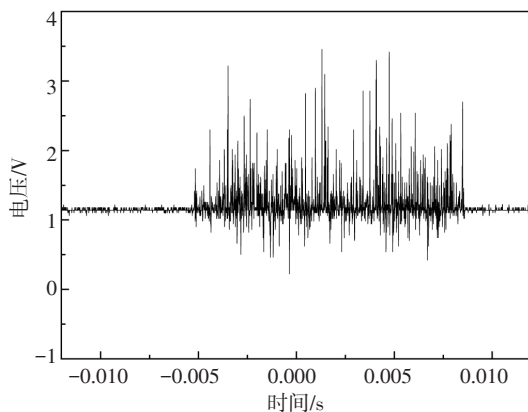
### 3.2 光敏元不是增强噪声的诱导途径

探测器的光敏元正常工作时需要码型发生器给探测器提供脉冲时序与偏置电压等信号。如果不给探测器提供脉冲时序,探测器的输出信号仅为器件电路的输出电压,不含有任何外界光信息,可以以此来判断噪声是否是电磁波通过对光敏元的影响来传播的。

图7a为给探测器提供脉冲时序时的探测器的响应曲线,其中红框内为探测器光敏元对1064 nm连续光的响应电压。从图中可以看出,存在幅值约2 V的噪声电压,因此在给探测器提供脉冲时序时,即在探测器的光敏元响应曲线中噪声增强效应是存在的;图7b为不给探测器提供时序时探测器的响应曲线,由于此时响应曲线不是光敏元的响应,因此不存在1064 nm连续光的响应电压。从图中可以看出,存在幅值约2 V的噪声电压,因此在不给探测器提供脉冲时序时,即在探测器的直流电路响应曲线中噪声增强效应仍然是存在的,而且较强。



(a)给探测器提供脉冲时序时的响应电压



(b)不给探测器提供脉冲时序时的响应电压

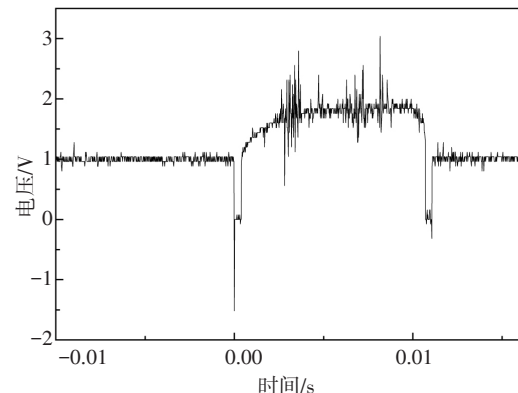
图7 是否给探测器提供脉冲时序得到的响应噪声情况

从上述实验结果可以看出,无论是否给探测器提供脉冲时序,探测器响应曲线中的噪声增强效应一直存在,因此光敏元对增强噪声的影响不大。

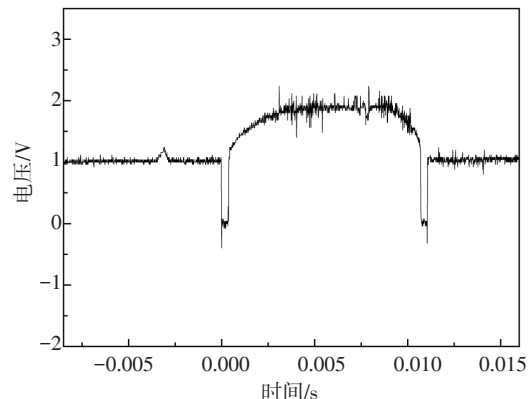
### 3.3 自由空间是增强噪声的主要诱导途径

电场中的导体,不管是实心的还是中空的,由于静电感应而使电荷在导体的表面重新分布,当达到静电平衡后,导体内部(包括导体空腔内)任意一点的场强为零。装了金属外壳后,可以使处在金属外壳内部的实验仪器不再受外电场的影响,从而保持静电平衡状态<sup>[8]</sup>。可以用不锈钢制作一个金属外壳作为静电屏蔽罩来屏蔽探测器周围的电磁波,根据有无静电屏蔽罩时探测器的噪声情况来判断噪声是否是通过空气传播的。

图8a为没有静电屏蔽罩时探测器对脉冲激光的响应曲线。可以看出存在幅值约1 V的噪声电压,因此在没有静电屏蔽罩时,探测器噪声增强效应是明显的;图8b为有静电屏蔽罩时探测器对脉冲激光的响应曲线,可以看出存在幅值约0.3 V的噪声电压,静电屏蔽罩大大降低了探测器的增强噪声。



(a)无静电屏蔽罩时探测器的响应电压



(b)有静电屏蔽罩时探测器的响应电压

图8 有无静电屏蔽罩时探测器的噪声情况

但同时也看到,加屏蔽罩后的噪声电压并没有完全降至图 1a 无光照情况下的噪声电压,这主要是由于为了保证探测器的通光口和电路连接线的引出,静电屏蔽罩并不是完全密闭,即探测器与激光器脉冲源间仍有自由空间的连接,因此,实验屏蔽罩并没有完全切断电磁波的空间诱导途径。

综上,可以认为自由空间是增强噪声的主要诱导途径,电磁波主要通过自由空间传播直接对探测器工作电路产生影响, $u$ 使探测器噪声增强。

#### 4 结论及建议

实验发现脉冲激光会诱导光电探测器噪声增强,研究表明,增强噪声主要是由于激光器放大级开关电源打开后,储能电容充电放电,产生浪涌电流和尖峰电压使开关电源产生较强的电磁干扰所致,该噪声幅度较大,直接影响探测器的测量准确度和精度;该电磁干扰是通过自由空间传播的方式来影响探测器的电路输出。

因此,对于脉冲型激光器,这种脉冲相关的噪声增强效应不容忽视。基于上述噪声来源和噪声诱导途径的研究结果,采取有效的措施可以有效抑制该类噪声。

静电屏蔽是最有效的方法,可以帮助实验仪器免受外部电磁场的影响,在探测仪器设计时有效考虑电路的屏蔽措施可以大为降低脉冲相关的增强噪声。另外,电磁干扰产生的电磁波强度与传播距离有关,延长探测器件与被测激光器的距离,也可以减小噪声增强效应对测量结果的影响,但不如前

者方便、有效。

#### 参考文献

- [1] 郭赛,丁全心,羊毅.雪崩光电探测器的噪声抑制技术研究[J].电光与控制,2012,19(3):69-73.
- [2] 姜先申,韩焱.光电探测器噪声分析及降低噪声的方法[J].现代电子技术,2005(4):3-4.
- [3] 沈开贵,曾丽珍.40GPIN/TIA 光电探测器接收组件的噪声分析[J].光通信技术,2006,30(9):7-9.
- [4] 解光勇.光电探测器噪声特性分析[J].信息技术,2008(11):8-10.
- [5] Werley C A, Teo S M, Nelson K A. Pulsed laser noise analysis and pump-probe signal detection with a data acquisition card[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(12):488.
- [6] 项晓,王少锋,侯飞雁,等.利用共振无源腔分析和抑制飞秒脉冲激光噪声的理论和实验研究[J].物理学报,2016,65(13):121-128.
- [7] 王凡,王志强.开关电源电磁干扰分析及抑制[J].电源技术应用,2005(4):26-30.
- [8] 阙仲元.电动力学教程[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [9] LUO Xin, HAN Xiu-you, GU Yi-ying, et al. Phase noise floor suppression of the output carrier from double sideband-carrier suppressed modulation system[J]. Science China, 2011, 54(6): 1312-1320.
- [10] 陈铭易,楚晓杰,于鹏,等.  $A \Delta \Sigma$  fractional-N frequency synthesizer for FM tuner using low noise filter and quantization noise suppression technique[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(7): 075003-1-075003-7.

(上接第15页)

- [8] Kowzan G, Lee K F, Paradowska M, et al. Self-referenced, accurate and sensitive optical frequency comb spectroscopy with a virtually imaged phased array spectrometer[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 974.
- [9] Tan Z, Wang C, Goda K, et al. Jammed-array wideband sawtooth filter[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 19(24): 24563-8.
- [10] Shirasaki M, Akhter A N, Lin C. Virtually imaged phased array with graded reflectivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11: 1443-1445.
- [11] Tan Z, Li H, Ding Z, et al. Two dimensional spectrum detection based on the imperfect virtually imaged phased array[J]. Microwave&Optical Technology Letters, 2017, 59(10): 2654-2660.