

激光与光电子学进展

基于雪崩光电二极管的 1550 nm 单光子探测模块

朱子辰^{**}, 张志明^{*}

同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804

摘要 单光子探测模块在多个领域中有重要的用途,然而现有的单光子探测模块依赖进口芯片。研制了一种基于国产元器件的 1550 nm 的单光子探测模块,改进了触发信号处理电路,避免了使用进口芯片。在触发信号的作用下,雪崩光电二极管进入盖革模式,处在盖革模式下的雪崩光电二极管接收到光子以后,产生雪崩信号;雪崩光电二极管的输出信号中的雪崩信号强度小于噪声信号,消除输出信号噪声并将其放大,通过比较器识别雪崩信号。为了抑制雪崩二极管的暗电流和暗计数,使用单片机和温控电路保证雪崩光电二极管工作在稳定的低温环境中。实验结果表明,探测效率为 12% 时,暗计数率为 $7.7 \times 10^{-6} \text{ gate}^{-1}$,后脉冲率为 2%,参数均达到预期的指标,该方案结构简单并且实现了国产化。

关键词 探测器; 光电探测器; 单光子探测; 雪崩光电二极管; 噪声抑制; 触发信号

中图分类号 TN215

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1304001

1550 nm Single Photon Detection Module Based on Avalanche Photodiode

Zhu Zichen^{**}, Zhang Zhiming^{*}

College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract Single photon detection modules have important applications in many fields. However, the existing single photon detection modules rely on imported chips. In this paper, a 1550 nm single photon detection module based on domestic components is developed. The trigger signal processing circuit is improved to avoid the use of imported chips. Under the action of trigger signal, the avalanche photodiode enters Geiger mode. When the avalanche photodiode in Geiger mode receives a photon, the avalanche signal is generated. In the output signal of the avalanche photodiode, the intensity of the avalanche signal is less than that of the noise signal. After eliminating noise and amplifying the output signal of the avalanche photodiode, the avalanche signal is identified by the comparator. In order to suppress the dark current and dark count of the avalanche diode, MCU and temperature control circuits are used to ensure that avalanche photodiode works in stable low temperature environment. The experimental results show that when the detection efficiency is 12%, the dark-count and after-pulse probability are $7.7 \times 10^{-6} \text{ gate}^{-1}$ and 2%, respectively. The parameters all meet the expected targets. The scheme has simple structure and realizes localization.

Key words detectors; photodetectors; single-photon detection; avalanche photodiode; noise suppression; trigger signal

OCIS codes 040.5160; 250.1345; 260.3060

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-12; 录用日期: 2020-11-14

通信作者: *zmzhang@tongji.edu.cn; **TinyZZC@126.com

1 引言

单光子探测技术是微弱光信号探测技术,该技术应用于多个领域中,如:量子信息处理、量子密钥分发、激光雷达、生物医学、天文观测、激光测距等^[1-8],这些领域中存在激烈的国际竞争,关键器件的研发是这些领域发展的基础。

国内外一些机构开展了单光子探测器的研制工作,如英国赫瑞瓦特大学、意大利米兰理工大学、加州大学、东芝欧洲研究中心、加拿大的 PerkinElmer 公司、日内瓦大学、美国国家标准技术研究院、美国 Princeton Lightwave 公司、瑞士的 ID Quantique 公司等,国内的华东师范大学、济南量子技术研究院、军械工程学院、清华大学、上海交通大学、上海理工大学、山东大学、云南大学、中国科技大学、中国科学院、重庆理工大学、安徽问天量子科技股份有限公司、科大国盾量子技术股份有限公司、中国电子科技集团公司等。

研究人员经过多年研究,成功地开发出了多种检测单个光子的元件,如雪崩光电二极管(APD)、光电倍增管、半导体近红外上转换单光子探测器(USPD)^[2]、量子点共振隧道二极管(QDRTD)^[3]、超导纳米线(SNSPD)^[4]、超导转变边沿(TES)单光子探测器^[9]等。这些器件具有各种优异的性能,其中的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管具有工作波段宽、体积小、成本低、技术成熟等优点,被广泛地应用到实用化量子密码系统中^[10-11],国内厂家能够稳定地提供雪崩光电二极管。

为了探测单个光子,上述的探测元件需要外围电路配合,组成完整的探测模块。长期以来,国内生产的单光子探测模块中使用进口芯片。在当前严峻的形势下,为了保障各领域科研和生产的正常开展,需要用国产芯片研制单光子探测模块。为了解决芯片问题,本文以成熟的国产雪崩光电二极管为核心研制单光子探测模块,使用自己搭建的触发信号处理电路,这样可避免使用进口芯片。实验表明本文研制的红外单光子探测模块的触发频率、探测效率、暗计数率和后脉冲率等参数都能达到预期值。

2 原理

Si 和 InGaAs/InP 都是制作雪崩光电二极管的材料,使用 Si 制作的雪崩光电二极管主要用于可见光的探测,使用 InGaAs/InP 制作的雪崩光电二极管主要用于近红外波段光子的探测,1550 nm 波段的近红外光具备人眼安全性、穿透烟雾的能力强、在光

纤中传播损耗低等优点^[12],因而得到广泛应用,相应的 InGaAs/InP 材料的雪崩光电二极管得到了推广,本文选用 InGaAs/InP 材料的雪崩光电二极管。

InGaAs/InP 雪崩光电二极管具有两种工作模式:线性模式和盖革模式。在光子到达时间已知的情况下,InGaAs/InP 雪崩光电二极管探测器工作在盖革模式下,此时雪崩光电二极管上的反向工作电压在雪崩电压以上,收到光子后,雪崩光电二极管发生雪崩,雪崩光电二极管的电流迅速增大,此时雪崩光电二极管具有高达 $10^5 \sim 10^6$ 的增益,但存在自维持的雪崩放大,此时需要及时把雪崩光电二极管的工作电压调整到雪崩电压以下,才能停止雪崩,否则器件不断增大的雪崩电流导致器件热烧毁^[13]。为了提高时间分辨率,需要及时停止雪崩,为下一次捕获光子做好准备。

在雪崩过程中,半导体材料的缺陷捕获了载流子,然后释放载流子,引起触发伪雪崩信号,产生后脉冲计数,通常后脉冲效应持续时间达到微秒量级,而且后脉冲效应在 InGaAs/InP 雪崩二极管中非常严重,一个入射光子产生的雪崩脉冲可能引起一个或多个初级后脉冲,同样一个初级后脉冲可能产生一个或多个次级后脉冲,通过改变雪崩光电二极管上的电压,快速进入和离开盖革模式,从而减弱后脉冲效应^[14-15]。

在光子到达时间已知的情况下,每个光子伴随着一个触发信号,通过触发信号处理电路产生门控信号。高速触发信号的幅度和波形与门控信号存在明显的差别,一般采用芯片构建触发信号处理电路,由于未找到合适的国产芯片,本文使用高频三极管研制新的触发信号处理电路。

雪崩光电二极管和普通二极管一样,PN 结存在电容,在脉冲电压作用下产生和脉冲信号周期相同的尖峰噪声,尖峰噪声的峰峰值达到上百毫伏;当光子激发雪崩光电二极管发生雪崩时,雪崩信号的峰峰值仅有几毫伏,雪崩信号湮没在尖峰噪声中。抑制噪声信号、提取出雪崩信号是提高单光子探测器性能的关键技术。现阶段抑制噪声的常用方式有 4 种:1) 双雪崩光电二极管平衡技术,该技术采用两个性能一致的雪崩光电二极管,同时施加门控信号和直流偏置信号,以产生相同的尖峰噪声,其中一个雪崩光电二极管接收光子,对两者进行差分后得到雪崩信号,该方式很难得到两个相同的雪崩光电二极管,成本较高;2) 采用一个单独的电容,电容的数值和雪崩光电二极管的电容一致,理论上

两者的尖峰噪声相等,但是在高频信号作用下,两者的电路模型存在差别,寄生参数明显不一致,所以尖峰噪声也有较大的差别,处理高频信号的效果很难令人满意;3)自差分平衡探测技术,雪崩光电二极管产生的尖峰噪声沿着两条通路传输,其中一路延时一个脉冲周期,然后将两路信号相减,这种方式要求相邻两个尖峰噪声的波形完全一致,并且精确地控制两路信号的幅度和延时^[16];4)正弦门控滤波技术,该技术用滤波器滤除尖峰噪声^[17]。

刘宏敏等^[18]提出采用另一个二极管抑制噪声的方法,刘俊良等^[19]采用PIN二极管抑制噪声,在PIN二极管与雪崩光电二极管上加加载不同的偏置电压,通过改变PIN二极管的偏置电压改变PIN二极管的结电容,使它与雪崩光电二极管的结电容一致,由于两者结构相似,两者的电路模型接近,在两个二极管上加加载相同的脉冲电压会产生相近的尖峰噪声,能取得较好的噪声抑制效果,本文采用该方案抑制噪声。为了降低暗电流和暗计数,需要使雪崩二极管工作在稳定的低温环境中^[20-21]。

3 探测模块

本文单光子探测模块的整体结构如图1所示,包括雪崩光电二极管、触发信号处理、偏置电压、尖峰噪声抑制、信号放大、比较甄别、温度控制、单片机(MCU)等部分。该模块以雪崩光电二极管为核心,图1中的雪崩光电二极管带有单模尾纤,光子通过光纤入射到光电二极管的探测面,雪崩光电二极管的工作波长为950~1650 nm,对1550 nm波段的光响应灵敏,当反向电压在雪崩电压附近时,暗电流仅为0.3 nA。

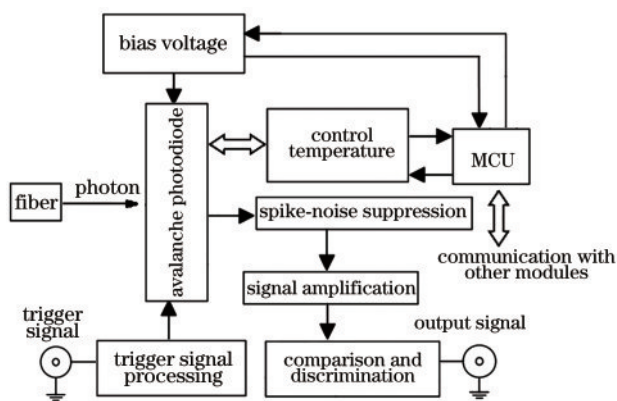


图1 单光子探测模块整体结构
Fig. 1 Structure of single photon detection module

3.1 触发信号处理

图1中的触发信号为方波,利用触发信号产生

负脉冲,将负脉冲加载到雪崩光电二极管的阳极上,使雪崩光电二极管的反向工作电压超过雪崩电压,雪崩光电二极管进入盖革模式;本文在触发信号的上升沿后的0.5~2 ns内可能有光子进入光电二极管,此时工作电压需超过雪崩电压,此后工作电压应低于雪崩电压,以为下一次捕获光子做准备。

触发信号的处理电路一般采用进口芯片,本文使用精心挑选的国产高频三极管搭建了触发信号处理电路。图2是原理图,外部触发信号(TRIGIN)通过电容C15进入放大电路,由于C15和电阻的共同作用,触发信号进入三极管的基极时,上升沿变成正脉冲,通过合理调节C15和电阻的数值,使脉冲宽度约为1.8 ns。再利用放大电路对脉冲信号进行反向放大,放大后的脉冲信号为反向的负脉冲,脉冲幅度为4~6 V,将其施加到雪崩光电二极管的阳极上。

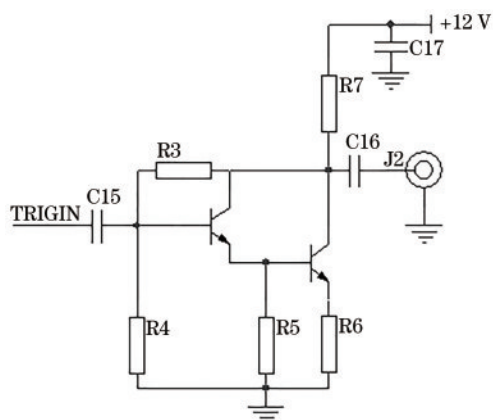


图2 触发信号处理电路

Fig. 2 Processing circuit for trigger signal

外部触发信号频率与光脉冲的频率一致,为100 MHz,图3为触发信号处理电路输出的负脉冲信号,其中横坐标每格1 ns,纵坐标每格1 V,由触发信

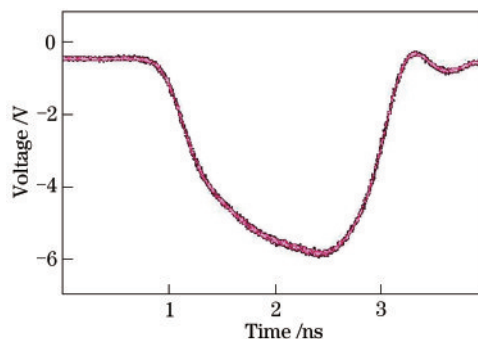


图3 负脉冲信号

Fig. 3 Negative pulse signal

号的上升沿触发产生了幅度约为 5.5 V 的负脉冲。

3.2 偏置电压电路

由于器件的差异,相同温度下,不同雪崩光电二极管的雪崩电压不一样,为了使雪崩光电二极管的反向工作电压接近雪崩电压,需要根据雪崩光电二极管的情况调整偏置电压电路的输出电压。光电二极管的反向工作电压也会影响光电二极管的增益以及探测效率,因此需要根据探测效率调节工作电压。偏置电压电路的输出电压必须是可调和稳定的。

本文选用的光电二极管雪崩电压的范围为 60~74 V,通过国产 DC-DC 模块产生 +80 V 的直流电压,经过场效应管(MOSFET)降压,使用多级 LC 滤除纹波,得到稳定的输出电压。单片机的输入/输出(I/O)端口发送脉冲宽度调制(PWM)信号以控制 MOSFET,从而调节输出电压。经过测量得到输出电压的纹波幅度为 0.02 V,电压的范围为 20~76 V,电压调节的精度为 0.02 V。

3.3 噪声抑制电路

本文采用的尖峰噪声抑制电路如图 4 所示。对雪崩光电二极管与二极管 D4 同时输入门控信号后,雪崩光电二极管接收到光子,D4 不接收光子,雪崩光电二极管输出尖峰噪声和雪崩信号,D4 只输出尖峰噪声,两路信号通过差分电路后噪声被滤除,差分电路输出雪崩信号。偏置电压电路的输出阻抗较小,会显著吸收触发信号处理电路产生的门控信号和雪崩二极管产生的雪崩信号,所以在偏置电压电路的输出端串接电阻。

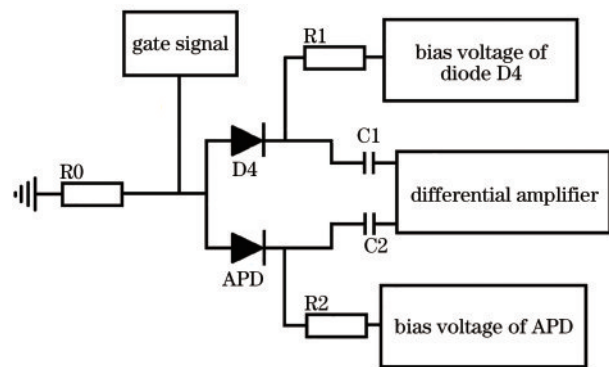


图 4 噪声抑制电路

Fig. 4 Noise suppression circuit

选用国内某研究所研制的一种电流反馈型运算放大器,搭建了差分电路和放大电路,信号经过差分放大电路后,输出的雪崩信号如图 5 所示,雪崩信号是负脉冲,幅度大于 700 mV。从图 5 中可以

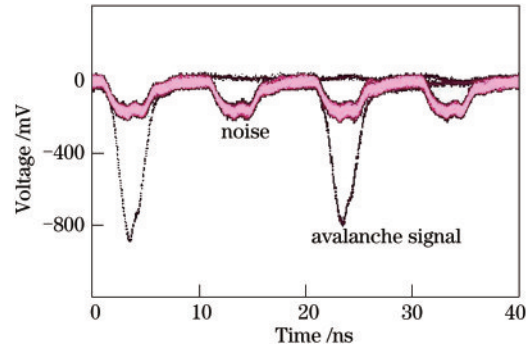


图 5 放大电路的输出信号

Fig. 5 Output signal of amplification circuit

出,尖峰噪声并没有被完全消除,残余噪声的幅度约为 200 mV。

3.4 比较甄别电路

后端的计数器需要晶体管-晶体管逻辑集成电路(TTL)电平信号,放大电路输出信号的波形不能满足后端计数器的要求,比较甄别电路根据信号的幅度滤除残余的尖峰噪声,并产生 TTL 电平信号。

在比较甄别电路中使用运算放大器搭建了滞回比较器,一个输入端接收放大电路的信号,另一个输入端接入一个固定的电压信号(V_{ref}),比较甄别电路的波形如图 6 所示。

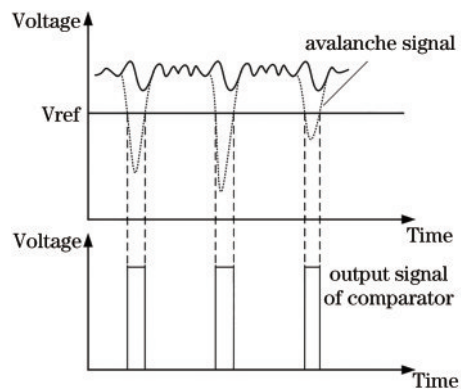


图 6 比较甄别电路的输出波形

Fig. 6 Output waveforms of comparison circuit

3.5 温控电路

温控电路包括 PT1000 热敏电阻、模数(A/D)转换器、半导体制冷器以及驱动半导体制冷器的电路,温控电路与其他电路共用单片机,将 PT1000 热敏电阻和雪崩光电二极管放入隔热盒中。使用兼容 STM32 的国产 GD32 单片机,A/D 转换器选用重庆声光电有限公司生产的 16 位转换器。单片机通过 PT1000 热敏电阻和 A/D 转换器得到隔热盒内的温度;单片机的 I/O 口发出 PWM 波,通过

改变 PWM 波的占空比,调整半导体制冷器的功率,使隔热盒内温度稳定,温度控制的精度在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,实现了厂家建议的雪崩光电二极管的 $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境。

3.6 嵌入式软件

单片机需要程序控制,本文使用 C 语言在 Keil 集成开发环境中编写程序。在主函数(main)中,首先对单片机进行初始化,从闪存(FLASH)中读取运行参数,然后进入无限循环,在循环中检查从上一次运算到本次运算的时间间隔是否达到设定值,如果达到设定值,就调用温度和偏置电压监控程序,采集温度和偏置电压,经过运算后,调整 PWM 波占空比,改变制冷功率和偏置电压。

开启定时器中断后,由定时器中断服务函数进行计时。单片机还与其他模块进行通信。由于上位机可以在任何时刻发送信号给下位机,所以下位机在中断服务函数中接收数据。

本文用到的数据有两个通道的偏置电压、温度值、比例积分微分(PID)控制参数,温度和偏置电压有缺省值、设定值、当前值等。将以上数据放在结

构体中,第一种类型的结构体用来存放偏置电压和对应的参数;第二种类型的结构体用来存放温度值和对应的 PID 参数。以上数据均采用双精度型(double)数据,调试完成后设定它们的缺省值,将缺省值都存入芯片内部的 FLASH 中。程序还有与其他模块通信的功能,在通信过程中,用字符型(char)数据表达信息。

4 测试结果

本文对单光子探测模块的性能进行了测试。实验时,雪崩光电二极管的外壳温度稳定在 $(-42\pm 0.3)\text{ }^{\circ}\text{C}$,使用 1550 nm 高速皮秒激光器产生光脉冲,激光器的重复频率设置为 100 MHz ,激光器发出的脉冲光经衰减器后,平均每 10 个脉冲有一个光子,通过调节触发信号与皮秒激光器信号的相对延时,使探测模块正常工作。

通过调节偏置电压改变探测效率,使用符合计数仪采集并记录光计数、暗计数等数据,得到探测效率在 $0\sim 18\%$ 之间的后脉冲率和暗计数率的变化,如表 1 所示。

表 1 暗计数率、后脉冲率与探测效率的关系

Table 1 Relationship among dark count rate, after-pulse probability, and detection efficiency

Detection efficiency / %	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Dark-count probability (10^{-6} gate^{-1})	0	1.36	2.52	3.44	4.24	5.80	7.74	11.24	14.56	17.96
After-pulse probability / %	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.8	7.8	13.4

从表 1 可知,当探测效率为 12% 时,暗计数率约为 $7.7\times 10^{-6}\text{ gate}^{-1}$,后脉冲率为 2% 。将探测效率调整到 12% ,在高低温试验箱中改变探测模块的环境温度,在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行测试,单光子探测模块连续工作 72 h ,性能稳定,满足室温环境下持续工作的要求。

通过实验发现本文的单光子探测模块最大可以工作在 150 MHz 的门控重复频率下。

5 结 论

使用国产元器件研制了基于 InGaAs/InP 的 1550 nm 的 100 MHz 单光子探测模块,使用高频三极管研制了触发信号处理电路,避免使用进口芯片。经实验测试,探测效率、暗计数率和后脉冲率等主要性能参数均达到预期值,这为 GHz 以下的单光子探测器提供了一种有效的实现手段,避免了受国外芯片禁运的影响。虽然本课题组已经完成了研制工作,但所做的工作仍存在一定的不足之处,

在下一步的工作中将提高探测模块的频率;未来研究将通过进一步改进外围电路,提高单光子探测模块的性能。

参 考 文 献

- [1] Liang Y, Zeng H P. Single-photon detection and its applications[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(7): 1218-1232.
- [2] Bai P, Zhang Y H, Shen W Z. Research progress of semiconductor up-conversion single photon detection technology[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 221401.
白鹏, 张月衡, 沈文忠. 半导体上转换单光子探测技术研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 221401.
- [3] Wang H P, Wang G L, Qiu P, et al. Single photon detection technology based on quantum-dot resonant tunneling diodes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2659-2663.
王红培, 王广龙, 邱鹏, 等. QDRTD 单光子探测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2659-2663.

- [4] You L X. Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1202001.
尤立星. 超导纳米线单光子探测现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 1202001.
- [5] McCarthy A, Ren X M, Frera A D, et al. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [6] Zhang X, Lin D Y, Niu J J, et al. Low photon count fluorescence lifetime analysis based on alternating descent conditional gradient method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207022.
张潇, 林丹樱, 牛敬敬, 等. 基于交替下降条件梯度的低光子数荧光寿命分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207022.
- [7] He Y F, Guo J R, Li C Y, et al. Fluctuation analysis of key distribution protocol based on heralded single-photon source and orbital angular momentum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0412001.
何业锋, 郭佳瑞, 李春雨, 等. 基于指示单光子源和轨道角动量的密钥分配协议的波动分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0412001.
- [8] Rong X C, Wang C, Ren J W, et al. Visible light communication system based on embedded hard drive indicator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1806004.
荣新驰, 王超, 任嘉伟, 等. 基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1806004.
- [9] Zhang Q Y, Dong W H, He G F, et al. Review on superconducting transition edge sensor based single photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(20): 200303.
张青雅, 董文慧, 何根芳, 等. 超导转变边沿单光子探测器原理与研究进展[J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 200303.
- [10] Liang X L, Jiang W H, Liu J H, et al. A 1.25 GHz InGaAs/InP single-photon detector for high-speed quantum cryptography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0818001.
梁晓磊, 蒋文浩, 刘建宏, 等. 用于高速量子密码系统的 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0818001.
- [11] Zhang H Y, Wang L L, Wu C Y, et al. Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(7): 074204.
张海燕, 汪琳莉, 吴琛怡, 等. 高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器[J]. *物理学报*, 2020, 69(7): 074204.
- [12] Gao J L, Wang K, Pan H X. Hardware circuit design of near-infrared single-photon detector at 1550 nm[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 674-677.
高家利, 汪科, 盘红霞. 近红外 1550 nm 单光子探测器硬件电路设计[J]. *激光与红外*, 2015, 45(6): 674-677.
- [13] Shi Y L, Zhu H X, Yang X Y, et al. InP-based free running mode single photon avalanche photodiode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103005.
史衍丽, 朱泓遐, 杨雪艳, 等. InP 基自由运行模式单光子 APD[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 0103005.
- [14] Huang J H, Wu G, Zeng H P. Study of 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gated InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0204001.
黄建华, 吴光, 曾和平. 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0204001.
- [15] Liu C M, Shi X S, Zhang P J, et al. Detection efficiency measurement of silicon single-photon avalanche detector traceable using standard detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1248006.
刘长明, 史学舜, 张鹏举, 等. 基于标准探测器的硅单光子雪崩探测器探测效率测量[J]. *光子学报*, 2019, 48(12): 1248006.
- [16] Yuan Z L, Kardynal B E, Sharpe A W, et al. High speed single photon detection in the near infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(4): 041114.
- [17] Li Y F, Liu J L, Wang Q P, et al. Avalanche characterization of high speed single-photon detector based on InGaAs/InP APD[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(4): 427-431.
- [18] Liu H M, Chen J, Liang Y, et al. Spike-noise balanced technique for high-speed detection of near-infrared single photons[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(5): 564-568.
刘宏敏, 陈杰, 梁焰, 等. 基于噪声平衡抑制的近红外单光子高速探测方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(5): 564-568.
- [19] Liu J L, Li Y F, Zhang C F, et al. Single-photon detector based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3181-3185.
刘俊良, 李永富, 张春芳, 等. 基于 APD-PIN 结电容

- 平衡电路的门控单光子探测器[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3181-3185.
- [20] Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1004001.
刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1004001.
- [21] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 220001.
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 220001.