文章编号:1001-5078(2020)05-0573-05 ·红外技术及应用·

InGaAs/InP单光子探测器的研制

刘 云[1,2,3],李 源[1,2],徐焕银[2],李风雨[2],马 伟[2],曹德良[2],朱向冰[1]
(1. 安徽师范大学物理与电子信息学院,安徽 芜湖 241002;2. 安徽问天量子科技股份有限公司,安徽 芜湖 241000;
3. 安徽省量子安全工程研究中心,安徽 芜湖 241000)

摘 要:InGaAs/InP单光子探测器是量子密钥分配系统中的重要器件,为了实现InGaAs/InP单光子探测器的国产化,本文采用国产元器件研制了一种InGaAs/InP单光子探测器,包括雪崩二极管、单片机模块、温控模块、偏置电压模块、门控信号模块和小信号处理模块,编写了程序。实验表明,在100 MHz门控条件下且制冷温度为 -45 ℃时,探测器的最大探测效率约为25 %,当探测效率为10 %时,暗计数率约为 5.8×10^{-6}/ns,后脉冲率仅为1 %。本文研制的单光子探测器能够满足国产仪器设备的要求,对保障我国重点领域信息数据的安全具有显著的价值。

关键词:单光子探测器;国产化;雪崩二极管
中图分类号:TN215 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.05.011

Development of InGaAs/InP single photon detector

LIU Yun[1,2,3], LI Yuan[1,2], XU Huan-yin[2], LI Feng-yu[2], MA Wei[2], CAO De-liang[2], ZHU Xiang-bing[1]
(1. Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China;
2. Anhui Qasky Quantum Technology Co., Ltd., Wuhu 241000, China;
3. Anhui Quantum Security Engineering Research Center, Wuhu 241000, China)

Abstract: InGaAs/InP single-photon detector is an important device in quantum key distribution system. In order to make it come true on the nationalization of InGaAs/InP single-photon detector, a kind of InGaAs/InP single-photon detector based on domestic components, including avalanche diode, single-chip microcomputer module, temperature control module, bias voltage module, gating signal module and small signal processing module, is developed in this paper and the program has been written. The experiment proves that the maximum detecting efficiency of the detector is about 25 % on the condition of 100 MHz gate control and -45 ℃ cooling temperature. When the detecting efficiency is 10 %, the dark count rate is about 5.8×10^{-6}/ns and the pulse rate will only reach 1 %. The single-photon detector introduced in this paper can meet the requirements of domestic instrument and equipment. It has great value to the security of information data in the key field of China.

Keywords: single-photon detector; nationalization; avalanche diode

1 引 言

单光子探测器是量子密钥分配(QKD)系统中的重要器件[1-4],国内已经有文献报道了相关的研究[5-9],但是目前国产单光子探测器还是依赖进口元件,为保障国家重点领域信息数据的安全,单光子探测器需要完全国产化。

本文基于国产元器件研制了红外单光子探测器,使用InGaAs/InP雪崩二极管作为核心元件,采用半导体制冷片控制雪崩二极管的温度,在雪崩二极管上施加合适的偏置电压,使用门控电路切换雪

作者简介:刘 云(1979-),男,博士,高级工程师,现主要从事量子通信技术的研究。
通讯作者:朱向冰(1973-),男,博士,教授,现主要从事应用研究。E-mail:769420211@qq.com
收稿日期:2019-09-24;**修订日期**:2019-10-25

崩二极管的工作状态，通过小信号处理电路提取雪崩信号，实验表明本文研制的单光子探测器的探测效率、暗计数率和后脉冲等主要参数都能达到量子密钥分配系统的要求。

2 系统硬件

本文采用国产元器件，设计的红外单光子探测器系统如图 1 所示，主要包括雪崩二极管、单片机模块、温控模块、偏置电压模块、门控信号模块和小信号处理模块。

常见的雪崩二极管有 Si 和 InGaAs/InP 两种类型，本文需要探测 1550 nm 的光子，满足该波长要求的雪崩二极管主要是 InGaAs/InP 型。本探测器的核心器件采用某型国产的 InGaAs/InP 雪崩二极管，该雪崩二极管工作波长在 950 ~ 1650 nm，可工作在线性模式和盖革模式下。

为了抑制雪崩二极管的暗电流和暗计数，需要使雪崩二极管工作在较低的温度环境下[10]。本文通过温控模块控制雪崩二极管的温度。

在雪崩二极管工作时需要在阴极加载偏置电压，由于器件的差异，相同温度下，不同二极管的雪崩电压是不一样的，导致偏置电压也不同。当雪崩二极管工作在盖革模式下，通过改变偏压，可以改变探测器的探测效率[5]。偏置电压模块为雪崩二极管提供偏置电压。

持续工作在盖革模式下容易导致雪崩二极管损坏，本文采用门控信号来使雪崩二极管迅速进入和脱离盖革模式。当正偏置电压与门控信号模块产生的负电压之差略大于雪崩电压时，雪崩二极管工作在盖革模式，光子入射到雪崩二极管上，二极管发生雪崩，产生雪崩信号；当电压差小于雪崩电压，二极管迅速脱离盖革模式，即便有光子入射到二极管上也不会产生雪崩现象。

当发生雪崩时，输出的微弱的雪崩信号将会湮没在尖峰噪声中[11]，本文设计一种小信号处理模块，有效滤除尖峰噪声，提取雪崩信号，实现雪崩信号的鉴别探测。

单片机模块控制其他模块并进行通讯。

2.1 单片机模块

单片机模块选用的是 GD32F103RET6 型国产 ARM 单片机，封装为 LQFP64，有 51 个 I/O 口[12]。在本文中该芯片工作频率为 108 MHz，采用外置的 8 MHz晶振，完全满足设计要求。

单片机模块给偏置电压模块发送参考信号。单片机接收温控模块发送的温度数据，经过运算后，发送数字信号给温控模块。小信号处理模块需要一个可调的参考电压，由单片机通过 DAC 提供给小信号处理模块。

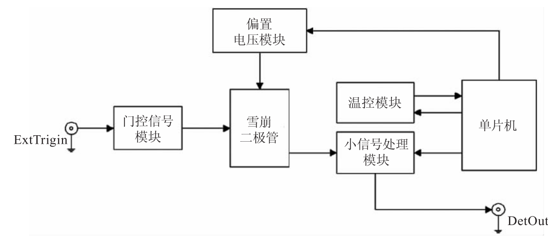


图 1 单光子探测器结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of single photon detector

2.2 温控模块

温控模块包括热敏电阻、A/D 转换器、D/A 转换器、PWM 控制器和热电制冷器。其中热电制冷器、热敏电阻和雪崩二极管放在密封盒中，密封盒可起到绝热、密封的作用，以便于控制雪崩二极管的温度。单片机通过热敏电阻和 A/D 转换器得到雪崩二极管的温度；通过 D/A 转换器和 PWM 控制器驱动热电制冷器。

选用兼容国外 LT3845 芯片的国产某型 PWM 控制器，选用兼容国外 ADS8509I 芯片的国产某型 A/D 转换器。测量表明在室温条件下，密封盒内部最低温度可达 -50 ℃，控制精度为 ±0.1 ℃。

2.3 偏置电压模块

对偏置电压模块的要求是输出电压稳定、连续可调、纹波小、噪声低，设计的偏置电压模块如图 2 所示。采用国产 JS3580 芯片作为 boost 转换器，该芯片具有 2 A的内部电源开关，并且开关频率可调。低压精密运算放大器采用国产的 SX061XHR 芯片，失调电压仅为 6 mV。设计的直流偏置电压在 26.5 ~ 75.0 V 内可调，电路具有较低的温漂，输出偏置电压很稳定。

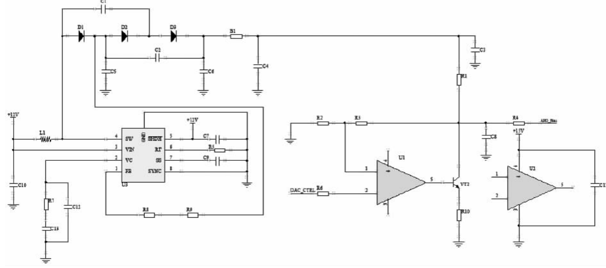
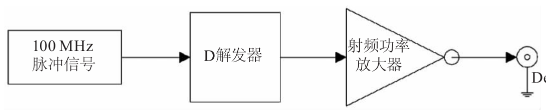


图 2 偏置电压电路

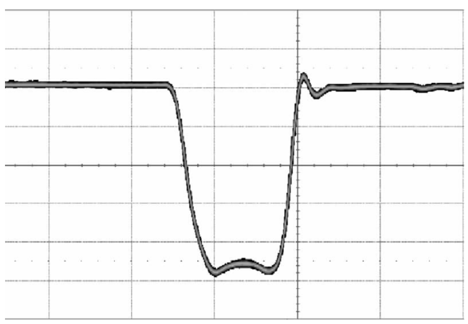
Fig. 2 Bias voltage circuit

2.4　门控信号模块

门控信号产生电路如图 3(a)所示，输入信号为 100 MHz 的脉冲信号，脉冲信号通过 D 触发器形成 1 ns 的窄脉冲信号，再通过射频功率放大器反向放大，输出的门控信号幅度范围在 -4 ~ -6 V，脉宽为 1.5 ns，施加到雪崩二极管的阳极。图 3(b)为门控电路产生的输出信号，其中横坐标每格 1 ns，纵坐标每格 1 V，脉冲幅度 -4.9 V。



(a)门控信号产生电路



(b)窄脉冲波形图

图 3　门控信号产生电路及产生的窄脉冲信号

Fig. 3 Gated signal generating circuit and narrow pulse waveform

2.5　小信号处理模块

雪崩二极管具有结电容，当门信号加到雪崩二极管上时，雪崩二极管会对门信号产生微分效应，形成尖峰噪声，雪崩二极管输出的雪崩信号仅有毫伏级，微弱的雪崩信号将会湮没在尖峰噪声中[13]。为了提取雪崩信号，本文提出了一种双雪崩二极管的差分降噪方案，电路框图如图 4 所示。

本文选用同批次的两个国产雪崩二极管，保证了结电容特性尽可能一致，即产生近乎相同的尖峰噪声；两个雪崩二极管上同时输入门信号，只有一个雪崩二极管接收光子，接收光子的雪崩二极管上输出尖峰噪声和雪崩信号，另外一个只输出尖峰噪声，将两路信号通过差分电路滤除尖峰噪声，随后进行小信号放大，小信号放大电路输出如图 5 所示，其中横坐标每格 5 ns，纵坐标每格 200 mV，脉冲幅度约为 200 mV 的是噪声，大于 700 mV 的为雪崩信号。由于两路信号的路径不完全一致，导致尖峰噪声并不能被完全滤除，但此时的雪崩信号已明显区别于噪声信号，最后通过比较甄别电路，设置阈值提取雪崩信号，整形输出 TTL 电平信号至后端的计数器进行计数。

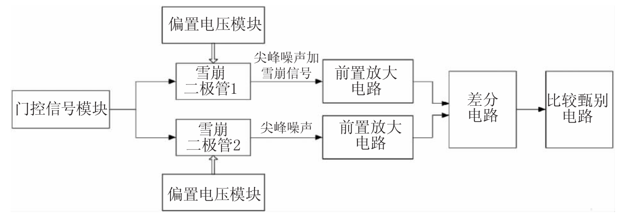


图 4　小信号处理模块

Fig. 4 Small signal processing module

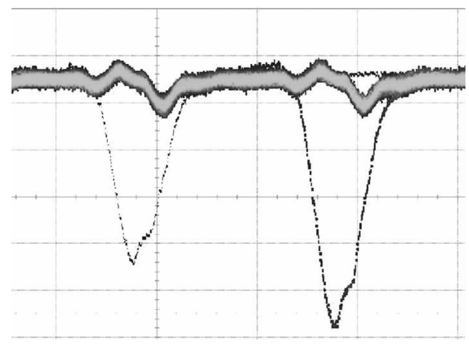


图 5　小信号放大电路输出

Fig. 5 Output of small signal amplifier circuit

3　系统软件设计

根据系统的功能要求，单片机需要对时钟、ADC、DAC、串口、看门狗、定时器进行初始化，通过 ADC、DAC 控制温度，通过 DAC 发出参考信号给偏置电压模块和小信号处理模块，进行串口通讯。

相应的软件也分为几个部分：初始化模块、串口通讯模块、定时器中断处理程序，在定时器中断处理程序中控制温度和产生参考信号。上电以后，单片机内部的 RC 振荡器作为时钟源，立即运行初始化模块，读取 FLASH 存储的内容，依据这些内容对单片机中的外设进行初始化，开启中断，单片机等待中断发生。每过 20 ms 产生一次定时器中断，在定时器中断处理程序中，单片机读取 ADC 的数据并通过 DAC 输出模拟电压控制温度，根据 FLASH 中的参数调用 DAC 程序产生参考信号。

串口通讯模块接收上位机的数据并修改 FLASH 中的参数，向上位机发送密封盒的温度等参数，由于上位机可以随时发送参数，所以采用中断方式，在出现异常的时候，处理程序也要采用主动向上位机发送数据。

用多个 C 函数分别实现初始化、中断、ADC、DAC、读写 FLASH 等功能。

4 实验结果分析

本文对设计的单光子探测器的探测性能进行了测试，APD 温度稳定控制在 -45 ℃，采用衰减后的弱相干光作为准单光子源，将 1550 nm 高速皮秒激光器的重复频率设置为 10 MHz、脉宽设置为 200 ps，衰减至 0.1 光子/脉冲，通过调节门控信号与皮秒激光器之间的延时，可使探测计数达到最大。

通过调节偏置电压，改变探测器的探测效率，使用自主研制的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 ~ 25% 之间时后脉冲率和暗计数的变化，如图 6 所示。

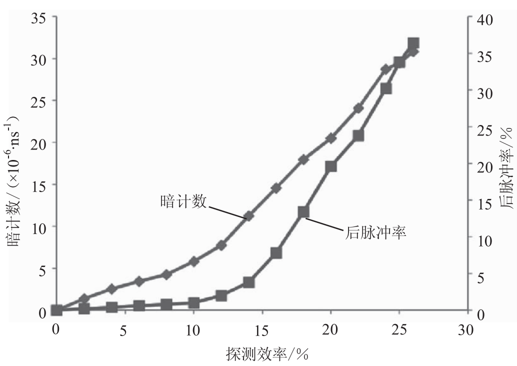


图 6 暗计数、后脉冲率与探测效率的关系

Fig. 6 Relationship between dark count, post-pulse rate and detection efficiency

由图 6 可以看出，当探测效率小于 12 % 时，暗计数率和后脉冲率随着探测效率增加而缓慢增加，此后，上升幅度明显增大；当探测效率为 10 % 时，暗计数约为 5.8×10^{-6}/ns，后脉冲率仅为 1 %；探测效率达到 25 % 时，暗计数增长至 2.9×10^{-5}/ns，后脉冲上升至 33.8 %。探测效率调整为 10 % 后，放入高低温试验箱中进行测试，实验结果如图 7 所示。

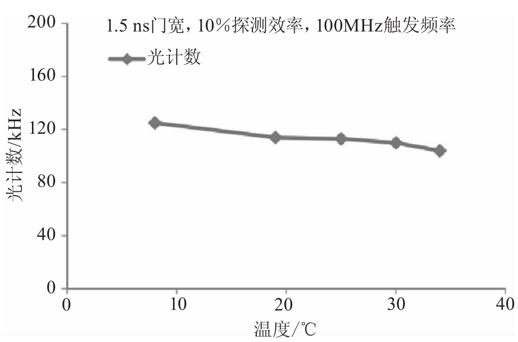


图 7 探测器的温度稳定性测试

Fig. 7 Temperature stability test of detector

从图 7 中可以看出，探测器在不同温度环境中，光计数的变化较小，稳定性高，满足国产化的稳定性要求。

5 总 结

本文基于国产元器件研制了能够初步满足 QKD 需求的 InGaAs/InP APD 单光子探测器，给出了探测器的技术方案，为提高我国量子仪器的国产化水平打下坚实基础。

目前研制的单光子探测器与国外先进水平还有一定的差距，在下一步工作中，将改善探测效率、后脉冲率、暗计数以及探测速率等指标，当然这些参数仍需要依赖于国产元器件性能的不断改进。

参考文献：

[1] Shuang Wang, DeYong He, ZhenQiang Yin, et al. Beating the fundamental rate-distance limit in a proof-of-principle quantum key distribution system[J]. Physical Review X, 2019, 9(2): 021046.

[2] Chaohan Cui, Zhen-Qiang Yin, Rong Wang, et al. Twin-field quantum key distribution without phase postselection [J]. Physical Review Applied, 2019, 11(3): 034053.

[3] R H Hadfield. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics. 2009, 3 (12): 696 - 705.

[4] Itzler M A, Jiang X, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photondetectors[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(3 - 4): 174 - 200.

[5] Liu Yun, Han Zhengfu, Wu Qinglin, et al. Single photon detector for telecom wavelengths[J]. Journal of Quantum Optics, 2007, 13(1): 61 - 65. (in Chinese)
刘云，韩正甫，吴青林，等. 通讯波段单光子探测器的研制[J]. 量子光学学报，2007, 13(1): 61 - 65.

[6] Liu Yun. Development of infrared single photon detector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
刘云. 红外单光子探测器的研制[D]. 合肥：中国科学技术大学，2007.

[7] Peng Qikang, Zhang Lei, Tong Shoufeng. Research progress of InGaAs/InP APD near-infrared single photon detection technology[J]. Science & Technology Information, 2017, (1): 3 - 7. (in Chinese)
彭启康，张磊，佟首峰. InGaAs/InP APD 近红外单光子探测技术的研究进展[J]. 科技资讯，2017, (1): 3 - 7.

[8] Gao Jiali, Wang Ke, Pan Hongxia. Hardware circuit design

of near-infrared single-photon detector at 1550 nm[J]. Laser & Infrared,2015,45(6):674 - 677.(in Chinese)
高家利,汪科,盘红霞.近红外1550nm单光子探测器硬件电路设计[J].激光与红外,2015,45(6):674 - 677.

[9] Bai Guomin,Liang Yan,Zeng Heping. High-speed single-photon detection based on domestic InGaAs/InP APD [J]. Electronic Measurement Technology,2017,40(6):175 - 179.(in Chinese)
白郭敏,梁焰,曾和平.基于国产InGaAs/InP APD的高速单光子探测[J].电子测量技术,2017,40(6):175 - 179.

[10] Li Shuifeng,Xiong Yuying,Wang Han,et al. Temperature characteristic for InGaAs/InP single-photon detector at infrared communication wavelengths[J]. Journal of Quantum Optics,2008,14(3):327 - 332.(in Chinese)
李水峰,熊予莹,王晗,等.红外InGaAs/InP单光子探测器的温度特性研究[J].量子光学学报,2008,14(3):327 - 332.

[11] Gan Linqiao, Gao Jiali. Research on signal extraction technology of semiconductor single photon detector[J]. Laser Journal,2018,39(5):15 - 17.(in Chinese)
甘林巧,高家利.半导体单光子探测器信号提取技术研究[J].激光杂志,2018,39(5):15 - 17.

[12] GigaDevice released multiple GD32F103 and GD32F101 series of high-capacity enhanced MCUs[J]. Electronic Engineering & Product World,2013,11:27.(in Chinese)
兆易创新发布多款GD32F103和GD32F101系列大容量增强型MCU[J].电子产品世界,2013,11:27.

[13] Liu Junliang. Development and performance study of single photon detector based on InGaAs(P)/InP APD[D]. Ji'nan:Shandong University,2018.(in Chinese)
刘俊良.基于InGaAs(P)/InP APD的单光子探测器的研制和性能研究[D].济南:山东大学,2018.