光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023013101

面向 SNSPD 系统的可拓展时间抖动测量模块

赵明豪[1]，张兴雨[2,3]，张成俊[3]，吕超林[3]，陈　岱[3]，万旭骁[3]，巫君杰[1,4]*

（1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院，南京 210044；
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室，上海 200050；
3. 赋同量子科技(浙江)有限公司，浙江 嘉兴 314100；4. 无锡学院 电子信息工程学院，江苏 无锡 214105）

摘　要： 针对超导纳米线单光子探测器(SNSPD)应用需求的多样化，设计了一款面向SNSPD的可拓展时间抖动测量模块。基于对SNSPD系统时间抖动测量原理的分析，设计了数字化单元、时间数字转换(TDC)单元和现场可编程门阵列(FPGA)单元，实现对SNSPD输出信号的数字化、时间信息测量以及数据读取。对该模块TDC单元的分辨率、线性度和时间精度分别标定，测试结果表明TDC单元的分辨率好于55 ps，测量数据呈线性，100 ns以内时间精度低于36 ps。通过结合实用化SNSPD系统，实现了100 ps左右的时间抖动表征，并与商用时间相关单光子计数(TCSPC)模块进行对比，验证了该模块对于SNSPD系统时间抖动测量的可行性。

关键词： 超导纳米线单光子探测器；时间抖动；时间数字转换；现场可编程门阵列

中图分类号： TN202　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0376－06

Scalable Time Jitter Measurement Module for SNSPD System

ZHAO Minghao[1], ZHANG Xingyu[2,3], ZHANG Chengjun[3], Lü Chaolin[3], CHEN Dai[3], WAN Xuxiao[3], WU Junjie[1,4]

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, CHN; 2. State Key Laboratory of Functional Material for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, CHN; 3. Photon Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Jiaxing 314100, CHN; 4. School of Electronics Information Engineering, Wuxi University, Wuxi 214105, CHN)

Abstract: A scalable time jitter measurement module for SNSPDs was designed to address the diverse application requirements of superconducting nanowire single photon detectors (SNSPDs). Based on the analysis of the time jitter measurement principle of the SNSPD system, a digitization unit, a time-to-digital conversion (TDC) unit and a field-programmable gate array (FPGA) unit were designed to digitize the SNSPD output signal, measure the time information and read out the data. The resolution, linearity and time accuracy of the TDC unit of the module were calibrated. The test results show that the resolution of the TDC unit is better than 55 ps, the measurement data is linear and the time accuracy within 100 ns is less than 36 ps. By combining the practical SNSPD system, a time jitter characterization of about 100 ps is achieved. The feasibility of this module for time jitter measurements in SNSPD systems is verified by comparison with a commercial time-correlated single photon counting (TCSPC) module.

Key words: superconducting nanowire single photon detector; time jitter; time-to-digital conversion; field-programmable gate array

收稿日期：2023－01－31.

* **通信作者：**巫君杰　**E-mail：**wjj@cwxu.edu.cn.

0　引言

超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector，SNSPD)相比半导体探测器具有高探测效率[1]、低暗计数[2]、低时间抖动[3-4]等优点，已被广泛应用于量子密钥分发[5-6]、单光子成像[7-8]、高精度激光测距[9-10]等领域。而随着应用需求的不断提升，如单光子成像系统需要更大的焦平面感光区域以缩短成像时间，SNSPD 逐渐由单像元向多像元阵列化发展。在此背景下，实验室中常采用的示波器和时间相关单光子计数(Time-Correlated Single Photon Counting，TCSPC)模块虽然具有极高精度的性能优势，但在 SNSPD 阵列器件的时间抖动表征中暴露出功能单一难拓展、笨重不易集成、价格昂贵等问题。因此，研发一款面向多通道 SNSPD 的功能易拓展、时间精度适中、体积轻便易集成的时间抖动测量模块对阵列化器件的实际应用具有重要意义。

目前，研究者多用专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit，ASIC)来设计时间抖动测量模块。2019 年 Sahu 等使用高频时钟计数器(40.96 GHz)面向 SNSPD 系统设计了一款高精度(RMS：25 ps)的数字读出 ASIC[11]；2021 年中国科学院大学的刘煦等用 0.18 μm CMOS 工艺流片，250 MHz 参考时钟下设计了一款面向单光子探测器的时间数字转换(TDC)电路，结合系统实测分辨率为 0.5 ns[12]；2022 年章琪文等采用 CMOS 工艺流片，设计了一款面向雪崩光电二极管的游标型 TDC，在 120 MHz 的主频和 77 K 的温度下测得了 236.28 ps 的分辨率[13]。使用 ASIC 来设计高频率时间抖动测量模块，虽然能取得较高的时间精度，不过设计周期长，且难度和成本都大大提高。相比之下使用商用 TDC 芯片更具优势。

本文报道了一种基于商用化芯片的 SNSPD 系统时间抖动测量模块，用现场可编程门阵列(FPGA)作为控制和数据传输单元，FPGA 良好的可开发性，为后续功能拓展提供了可能。较传统的时间抖动测量方式而言，本模块有可扩展性强、设计难度低、精度高、成本低等优点。

1　SNSPD 系统时间抖动测量原理

超导纳米线电压偏置在接近临界电流的状态下，光子照射在纳米线上被吸收后，产生的“热点”会使纳米线失超而呈现有阻态，读出此时的电信号，即 SNSPD 响应信号[14]。SNSPD 的时间抖动一般被定义为响应信号边沿到来时刻与理想时刻之间时间差的不确定性。由于 SNSPD 本征响应、微弱信号放大噪声、光纤色散等因素，SNSPD 的响应信号较同步信号存在一定偏差，其中各部分的贡献呈高斯分布。我们通常定义高斯分布半高宽(Full-Width-at-Half-Maximum，FWHM)对应的时间间隔为 SNSPD 系统的时间抖动。记 SNSPD 的系统抖动为 J_{system}，由于各部分引入的抖动相互独立，SNSPD 的系统抖动为各部分抖动的平方和再开根号，即：

$$J_{\text{system}}=\sqrt{(J_{\text{SNSPD}})^2+(J_{\text{amplifier}})^2+(J_{\text{fiber}})^2+\cdots} \tag{1}$$

式中，J_{SNSPD} 为 SNSPD 器件本征抖动，$J_{\text{amplifier}}$ 为放大器引入的抖动，J_{fiber} 为光纤色散引入的抖动。

SNSPD 系统时间抖动测量原理如图 1 所示。飞秒激光器发出两路光信号，一路光信号经光电二极管转化为电脉冲信号，该信号作为 START 信号使时间抖动测量模块开始工作。另一路光信号经衰减器衰减后入射到 SNSPD 器件，SNSPD 光响应产生微弱信号，经室温放大器放大后作为 STOP 信号使时间抖动测量模块停止工作。时间抖动测量模块用于测量 START 和 STOP 之间的时间延迟，并通过 RS232 总线将数据传输给上位机，进行数据统计分布和高斯函数拟合，最后得到拟合结果的 FWHM 值即为 SNSPD 的系统时间抖动。

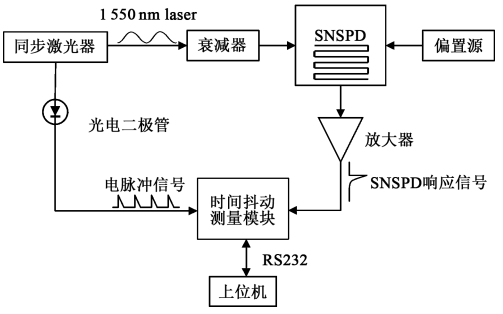


图 1　SNSPD 系统抖动测量示意图

2　时间抖动测量模块

时间抖动测量模块由数字化单元、TDC 单元和 FPGA 单元组成，如图 2 所示。数字化单元负责将 SNSPD 响应信号和电脉冲信号转化为 TDC 单元可检测的 START 信号和 STOP 信号；TDC 单元负责将 START 和 STOP 两路模拟信号转化为以时间表示的数字信号；FPGA 单元负责整个模块的控制、

数据处理和数据传输。

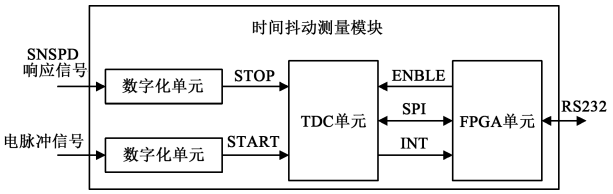


图 2 时间抖动测量模块内部架构

2.1 数字化单元

SNSPD 光响应产生的原始信号经放大器放大后幅度为：

$$V \approx I_{\text{bias}} \times Z_0 \times G \tag{2}$$

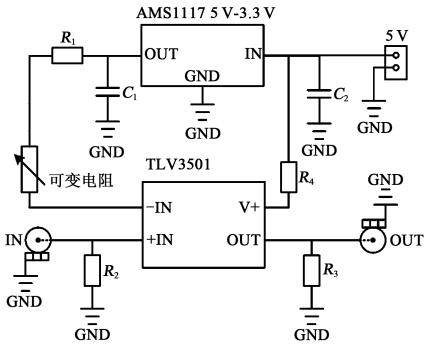
式中，电路负载 Z_0 通常为 50 Ω，器件的偏置电流 I_{bias} 通常约为 10 μA，室温放大器增益 G 约为 300。由公式(2)计算可得，输出信号幅度约为 150 mV。SNSPD 的响应过程可以近似成一个数字化过程，响应时对应高电平，而受限于器件动态电感和电热反馈机制，响应信号并不是一个标准的数字化信号，而是一个上升沿笔直的三角波形状，不适用于后续处理电路。因此，引入如图 3(a)所示的数字化模块将 SNSPD 响应信号和同步信号转化为标准的数字化电平，其由 Texas Instruments 公司的高速比较器芯片 TLV3501、调节触发电平 V_{tr} 的可变电阻和电源电路构成。TLV3501 轨到轨输入输出保障了单元的稳定性；Shutdown 模式、低电源电流(3.2 mA)和宽供电电压(2.7～5.5 V)，降低了功耗和增强了耐用性；1.5 ns 的快速上升沿和 4.5 ns 的传播延迟保证了测量的精度。

2.2 TDC 单元

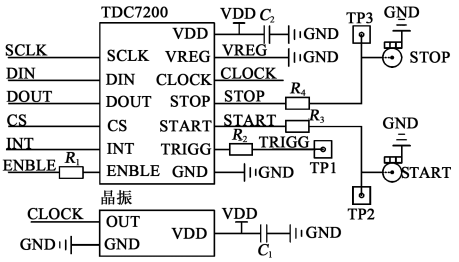
时间数字转换模块是 SNSPD 时间抖动测量的核心，选用 Texas Instruments 公司的商用 TDC7200 芯片，该芯片可将模拟信号转换成以时间表示的数字信号，芯片内部主要由施密特触发比较器、环形振荡器、计数器、配置与结果寄存器和 SPI 接口组成，具有高分辨率(55 ps)、低功耗(0.5 μA)和高集成度(封装：TSSOP(14)，尺寸：5.00 mm×4.40 mm)等优点。TDC7200 外围电路如图 3(b)所示，START 信号和 STOP 信号通过 SMA 接口进入 TDC 芯片，8 MHz 时钟晶振用于实时校准和在工作模式 2 中作为计时单元，ENBLE 引脚为 TDC 的初始化引脚，INT 为 TDC 测量状态引脚，SCLK，DIN，DOUT 和 CS 作为 SPI 接口和 FPGA 连接，图 3(a)和(b)构成单通道抖动测量模块，尺寸为 7.5 cm×5.5 cm。

TDC7200 主要有 2 种工作模式。工作模式 1，适用于高精度时间测量，采用内部环形振荡器为计时单元，测量范围为 12～500 ns；工作模式 2，适用于大范围时间测量，计时单元分为内部振荡器和外部时钟，测量范围为 250 ns～8 ms。

针对实验室应用场景，采用工作模式 1 进行系统时间抖动的表征及演示，对应时序图如图 4。外部 8 MHz 时钟用于实时校准 TDC 的分辨率，检测到 START 的上升沿，内部环形振荡器开始计数，检测到 STOP 上升沿停止计数，校准结果和计数结果分别存在对应的寄存器中。



(a) 数字化单元



(b) TDC 单元

图 3 两种单元原理图

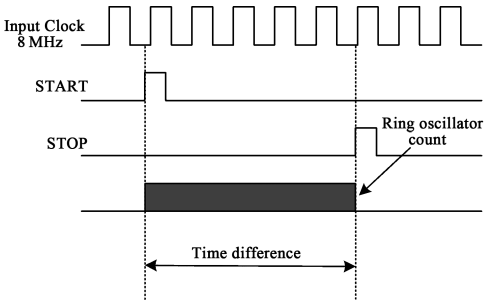


图 4 TDC7200 工作模式 1 时序图

2.3 FPGA 单元

为了实现 TDC 单元的控制和数据传输，使用 FPGA(Altera Cyclone IV EP4CE10F17)作为数据交互核心，FPGA 具有较好的可开发性，利于后续功能拓展。用硬件描述语言 Verilog 实现该单元的设

计，主要包括 TDC 初始化模块、TDC 控制模块、数据存储模块、计算模块和 UART 串口驱动模块，整体设计流程图如图 5 所示。系统上电后，FPGA 进行初始化，FPGA 完成初始化之后，发送拉低 EN 引脚命令，使得 TDC 完成初始化。初始化完成后，通过 SPI 时序配置 TDC 寄存器以确定其工作模式、中断方式、触发沿、是否校准等参数。TDC 配置完成，等待 START 和 STOP 信号，TDC 转换完成，发出中断信号，读取结果寄存器中的值，计算结果，最终通过 RS232 总线传输到上位机的串口调试助手，将串口中的数据导出为 XLSX 值，进行数据分析。

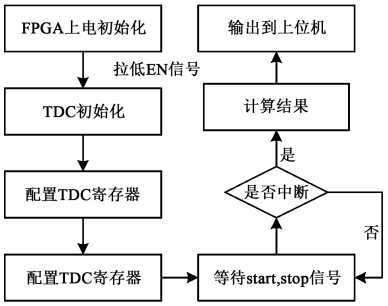


图 5　FPGA 设计流程图

3　测试与实验结果分析

为了验证时间抖动模块的可行性，先对 TDC 单元性能进行标定，然后再结合实用化 SNSPD 系统进行表征和功能验证，并将测试结果与商用高精度时间相关单光子计数器 Time Tagger 进行对比。

3.1　TDC 单元性能标定

3.1.1　分辨率

在实际应用中，TDC 单元的时间分辨率易受环境变量（温度、噪声等）影响，从而引入明显的测量误差。为了补偿这些误差并计算实际分辨率值，首先对 TDC 单元进行校准。利用内部环形振荡器对外部时钟测量进行校准，主要分为两个部分，第一部分是对外部时钟单个时钟周期的测量；第二部分是对外部时钟 N 个时钟周期的测量（N 的值由配置寄存器 CONFIG2 中的 CALIBRATION2_PERDIOS 决定，设置 $N=40$）。校准测量结果存储在 CALIBRATION1 和 CALIBRATION2 寄存器中。实际分辨率可表示为：

$$calCount=\frac{CALIBRATION2-CALIBRATION1}{CALIBRATION2_PERDIOS} \tag{3}$$

$$LSB=\frac{CLOCK_{\text{period}}}{calCount} \tag{4}$$

式中，LSB 为分辨率，$CLOCK_{\text{period}}$ 为外部 8 M 时钟的周期，即 125 ns。

同时，TDC7200 提供多周期平均模式，该模式可以降低外部时钟的时间抖动对测量值造成的影响，不过设置的平均周期数越大数据交互速度就越慢，为保证测量精度，设置平均周期数为最大值 128。

使用信号发生器（Tektronix-AFG3252C）发出两路延迟 500 ns 的信号（幅度：1.6 V，周期：1 μs，上升沿时间：1.5 ns），校准和非校准分别测量，未校准的 RMS＝578.9 ps，校准后的 RMS＝112.4 ps，测量结果如图 6。读取对应寄存器的值，由公式（3）和公式（4），计算得 LSB＝54.8 ps。

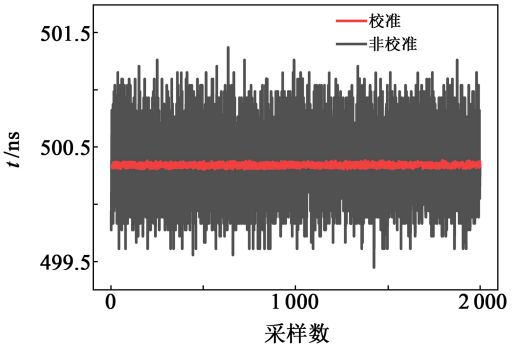
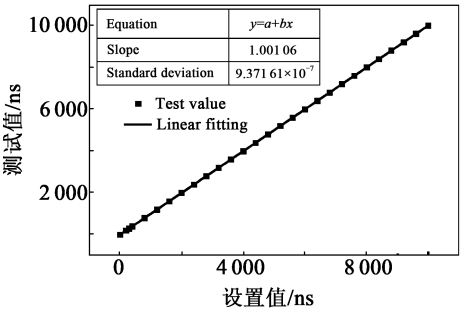


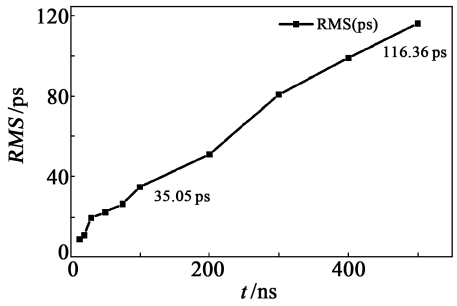
图 6　是否校准测量结果图

3.1.2　线性度和 RMS 时间精度

线性度和 RMS 时间精度是 TDC 单元的关键指标。在室温恒定，配置 TDC 和信号发生器相同参数的情况下，用两根长度均为 1 m 的同轴线，一端与 TDC 单元的 START 和 STOP 相连，另一端与信号发生器的两个输出通道相连，设置不同的时间延迟，记录设定值和测试值，分别标定线性度和 RMS 时间精度。在 10 ns～10 μs 范围内的 28 时间点，每个时间点进行 2 000 次测量，并对测量值取平均，然后进行线性拟合，拟合结果如图 7(a)所示，拟合后的斜率为 1，标准偏差为 9.37×10^{-7}。



(a) 线性拟合图



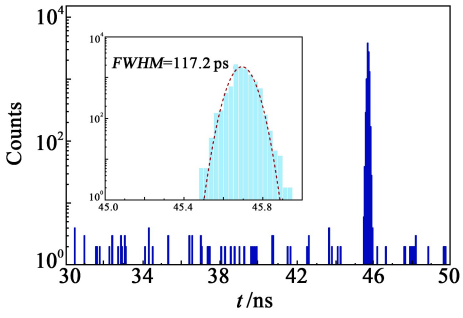
(b) RMS 时间精度图

图 7 线性度图和 RMS 时间精度图

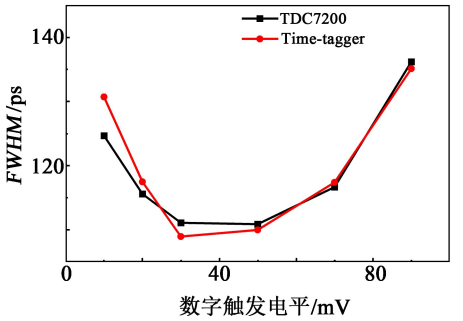
对 TDC 工作模式 1 范围内(12～500 ns)的多个时间点进行 2 000 次测量,对每个点的测量结果进行平均值与标准差分析,得到 RMS 时间精度曲线如图 7(b)所示,由图可知在 100 ns 以内的时间精度低于 36 ps。

3.2 验证 SNSPD 系统

图 8(a)为系统互联结果,从图中可以看出本模块能够对光计数和暗计数明显区分,测得系统的抖动为 117.2 ps。Swabian Instruments 是位于德国斯图加特的一家专注测量技术的高科技公司,该公司的 Time Tagger 系列产品在 TCSPC 仪器开发领域占据领导地位。调整数字化触发电平,测试 SNSPD 系统时间抖动,将测试数据在上位机进行高斯拟合,分别记录本模块和 Time Tagger 数据拟合后的FWHM值,画折线图,结果如图8(b)所示。



(a) 互联结果图



(b) 不同数字化触发电平抖动测量结果图

图 8 SNSPD 系统互联结果图和抖动测量结果图

由图可知,不同数字化触发电平系统抖动不同,30～50 mV 系统抖动最小,低于 30 mV 或高于 50 mV 抖动逐渐增大,这是由于触发电平高低引起触发位置斜率不同,30～50 mV 之间斜率最大,噪声引起抖动最小,最终呈现两边抖动大,中间抖动小的分布,本模块与 Time Tagger 测试结果相近,能够满足 SNSPD 系统时间抖动测试需求。

4 结论

本文在分析 SNSPD 时间抖动测量原理的基础上,设计了一款基于 TDC7200 的时间抖动测量模块,对该模块的每个单元进行了详细的分析和设计。实验结果表明该模块的 TDC 单元测试数据具有良好的线性、较高的分辨率和时间精度。最后,与 Time Tagger 进行对比,验证了该模块在实际 SNSPD 系统时间抖动测量的可行性,该模块为其他类型探测器时间抖动测量提供了思路。

参考文献:

[1] Chang J, Los J, Tenorio-Pearl J O, et al. Detecting telecom single photons with 99.52.07+0.5% system detection efficiency and high time resolution[J]. APL Photonics, 2021, 6(3): 036114.

[2] Zhang C, Zhang W, You L, et al. Suppressing dark counts of multimode-fiber-coupled superconducting nanowire single-photon detector[J]. IEEE Photon. J., 2019, 11(5): 1-8.

[3] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R, et al. A single-photon detector with high efficiency and sub-10 ps time resolution [EB/OL]. 2018-1-19 [2023-5-30]. https://arxiv.org/pdf/1801.06574.pdf.

[4] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, et al. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. Nature Photonics, 2020, 14(4): 250-255.

[5] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Twin-field quantum key distribution over a 511 km optical fibre linking two distant metropolitan areas[J]. Nature Photonics, 2021, 15(8): 570-575.

[6] Hadfield R H, Habif J L, Schlafer J, et al. Quantum key distribution at 1 550 nm with twin superconducting single-photon detectors[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(24): 175.

[7] Zhou H, He Y, You L, et al. Few-photon imaging at 1 550 nm using a low-timing-jitter superconducting nanowire single-photon detector[J]. Opt. Express, 2015, 23(11): 14603-14611.

[8] Gerrits T, Allman S, Lum D J, et al. Progress toward a high-resolution single-photon camera based on superconducting

single photon detector arrays and compressive sensing[C]// 2015 Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2015: 1-2.

[9] Li H, Chen S, You L, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging[J]. Opt. Express, 2016, 24(4): 3535-3542.

[10] Xue L, Li Z, Zhang L, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1 064 nm wavelength[J]. Opt. Lett., 2016, 41(16): 3848-3851.

[11] Sahu A, Celik M E, Kirichenko D E, et al. Low-power digital readout circuit for superconductor nanowire single-photon detectors [J]. IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, 2019, 29(5): 1-6.

[12] 刘　煦, 李云铎, 叶联华, 等. 单光子探测 InGaAs 雪崩焦平面像素级高分辨率低误码时间数字转换电路[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210009.

Liu Xu, Li Yunduo, Ye Lianhua, et al. Single-photon detection of InGaAs avalanche focal plane pixel-level high-resolution low-error time digital conversion circuit[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210009.

[13] 章琪文, 陈洪雷, 丁瑞军. 77 K 下碲镉汞 APD 探测器的高精度时间数字转换电路[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 2021084.

Zhang Qiwen, Chen Honglei, Ding Ruijun. A high-precision time-to-digital conversion circuit for cadmium mercury telluride APD detectors at 77 K[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 2021084.

[14] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(6): 705-707.

作者简介：

巫君杰(1991—)，男，江苏省无锡市人，博士，讲师，研究方向：超导纳米线单光子探测器、二维材料光电传感器；

赵明豪(1997—)，男，江苏省宿迁市人，硕士研究生，研究方向：基于 FPGA 的时间数字转换电路设计。