

GHz 重复频率可调 InGaAs/InP 单光子探测器

王天烨¹, 费起来^{1,2}, 徐博¹, 梁焰^{1*}, 曾和平^{1,2,3}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 华东师范大学重庆研究院, 重庆 401147;

3. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (avalanche photodiode APD) 可实现近红外波段的单光子检测, 具有集成度高功耗低等优势, 被广泛应用于量子信息科学、激光测绘、深空通信等领域。通常, 为了减小误计数, InGaAs/InP APD 工作在门控盖革模式, 其门控信号的重复频率直接决定了探测器的工作速率。基于此, 采用低通滤波方案, 结合集成了 GHz 正弦门控信号产生、雪崩信号采集、温度控制、偏置电压调节等功能的处理电路, 搭建了 GHz 重复频率可调的高性能 InGaAs/InP 单光子探测器。GHz 门控信号重复频率升高到 2 GHz, 其相位噪声仍优于 -70 dBc/Hz@10 kHz, 且尖峰噪声被抑制到热噪声水平, 当探测效率为 10% 时, 暗计数仅为 2.4×10^{-6} /门。此外, 还验证了该方案下探测器的长时间稳定性, 测试了工作速率、偏置电压等对 APD 关键性能参数的影响, 为 GHz InGaAs/InP APD 的进一步集成及推广奠定基础。

关键词: 单光子探测器; 雪崩光电二极管

中图分类号: TN247

文献标识码: A

GHz InGaAs/InP single-photon detector with tunable repetition frequencies

WANG Tian-Ye¹, FEI Qi-Lai^{1,2}, XU Bo¹, LIANG Yan^{1*}, ZENG He-Ping^{1,2,3}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401147, China;

3. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: InGaAs/InP avalanche photodiodes (InGaAs/InP APDs) are capable of detecting single photons in the near-infrared. With advantages of high integration and low-power consumption, they are widely used in quantum information science, laser mapping, deep space communication and other fields. In order to reduce error counts, InGaAs/InP APDs are generally operated in the gated Geiger mode, where the repetition frequency of the gating signal directly determines the detector's working rate. Thus, we adopt a low-pass filtering scheme to build a high-performance InGaAs/InP single-photon detector with adjustable GHz repeating frequency by integrating the processing circuit with GHz sine gating signal generation, avalanche signal acquisition, temperature control, bias voltage regulation and other functions. When the frequency of GHz gating signal increases to 2 GHz, its phase noise is still better than the -70 dBc/Hz@10 kHz, and the spike noise is suppressed to the level of thermal noise. When the detection efficiency is 10%, the dark count is only 2.4×10^{-6} /gate. In addition, we also verify the long-term stability of the detector under this scheme, and test the influence of working rate, bias voltage and other factors on the key performance parameters of APD, which lays a foundation for the further integration and promotion of GHz InGaAs/InP APDs.

Key words: single-photon detector, avalanche photodiode

收稿日期: 2020-11-12, 修回日期: 2021-04-21

Received date: 2020-11-12, Revised date: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(11604209), 上海市市级科技重大专项(2019SHZDZX01)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11604209), Shanghai Municipal Science and Technology Major Project (2019SHZDZX01)

作者简介 (Biography): 王天烨 (1995-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 主要研究领域为单光子探测器研制. E-mail: wty531653875@163.com

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yanliang@usst.edu.cn

引言

单光子探测,可实现极微弱光信号的有效检测^[1-2],在量子信息科学^[3]、激光雷达^[4]、深空通信^[5]、光学时域反射测量^[6-7]等众多领域有着极大的应用前景。常用的单光子探测器有InGaAs/InP雪崩光电二极管(APD)、光电倍增管(PMT)、超导纳米线单光子探测器(SNSPD)、超导相变边缘单光子探测器(TES)以及上转换单光子探测器(UCD)^[8]等。我们主要研究InGaAs/InP APD实现近红外单光子探测。通常来说,为了减少误计数,InGaAs/InP APD工作在门控盖革模式下,即通过直流电压结合门脉冲信号控制APD的偏置电压是否达到雪崩电压值,实现单光子信号的有效探测。门脉冲信号的重复频率即决定了InGaAs/InP APD的工作速率。然而,APD为容性器件,门脉冲信号加载时,会产生相应的尖峰噪声信号,将光生雪崩信号湮没。因此,需要引入后续处理电路提取雪崩信号。随着科技的进步,InGaAs/InP APD单光子探测器正朝着高速、高探测效率、低误计数等方向发展。在一些具体的应用中,例如远距离激光通信,为了达到最大信噪比,最常用的方法是调节接收器的速率来提高码率,这就需要探测器具备重复频率连续可调的功能^[9]。

迄今为止,实现高速InGaAs/InP APD单光子探测的方案有很多种,包括自差分平衡,正弦门方案及两种方案相结合等^[10-11]。自差分平衡方案是将信号等分成两路,将其中一路延时一个门的时钟周期然后将两路差分从而抵消尖峰噪声,该方案需要非常精确地保证两路信号的幅度和延时,很难要求其在带宽连续可调的情况下实现。正弦门方案有带阻和低通滤波两种方案,目的都是除去相应频谱的尖峰噪声信号而提取雪崩信号。正弦门带阻滤波方案随着门控信号重复频率提高,尖峰噪声信号分布的基频也随之提高,带阻滤波器也需要相应地更换以避免有效的雪崩噪声也被除去,破坏了信号完整性,导致时间特性变差^[12]。正弦门低通滤波方案是使用滤波器滤除高频的尖峰噪声,可以实现GHz以上重复频率的高速单光子探测^[13]。同时,该方案可以在高带宽的GHz重复频率下使用同一款低通滤波器,具有很好的器件复用性。基于此,本文采用该方案,集成实现了GHz重复频率可调的高性能InGaAs/InP APD单光子探测器。首先,我们分析测试了InGaAs/InP APD的响应带宽,在光脉冲宽度50 ps的情况下,使用带宽高达20 GHz的PicoScope

9300系列示波器在APD线性模式测得结果如图1所示,上升时间128.8 ps,计算可知APD带宽约为2.7 GHz。考虑到盖革模式的高增益,最终设计其门控信号频率在1~2 GHz连续可调。通过板级集成,实现了正弦门控信号产生及增益控制,偏置电压调节,延时调整,雪崩信号提取和采集,温度控制,同步时钟输出以及友好的用户操作界面等功能。基于此,我们测试了此单光子探测器的性能及长时间稳定性,改变门控频率对单光子探测器长时间稳定性几乎没有影响,当探测效率为10%,频率升高到2 GHz时,暗计数仅为 2.4×10^{-6} /门。在1 GHz时,调整直流偏压改变探测器探测效率并进行测试。随着探测效率从5%提高到20%,雪崩信号计数率稳定性逐渐下降,但整体的变化仍和暗计数处于同一水平。

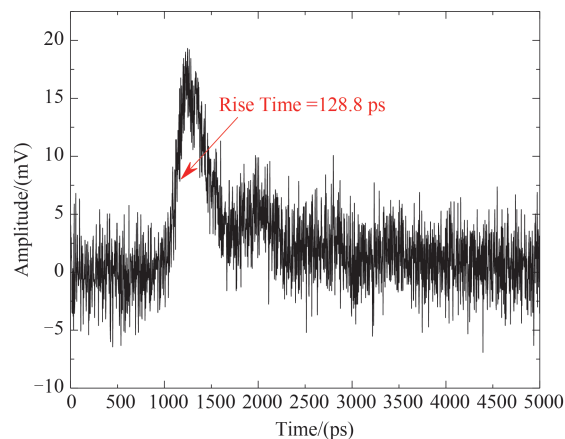


图1 APD在线性模式下测试图

Fig. 1 APD test chart in linear mode

1 重复频率可调单光子探测器设计

1.1 设计方案

GHz重复频率可调的单光子探测器装置图如图2所示,左侧为探测器的实物图,右侧为探测器的装置图。主要由具有芯片驱动和信号采集功能的主控板、给APD提供低温工作环境的制冷盒以及滤波器、放大器等组成。

整个探测器工作原理如下:由FPGA管脚输出10 MHz的方波信号作为单光子探测器的参考信号,将该10 MHz参考信号输入到锁相环频率(PLL)合成器芯片中。通过FPGA驱动PLL合成器,使PLL产生与10 MHz参考频率相位锁定且频率可调的GHz正弦信号。考虑到高频正弦电信号更容易产生及放大,频谱分布纯净等优势,将GHz正弦信号作

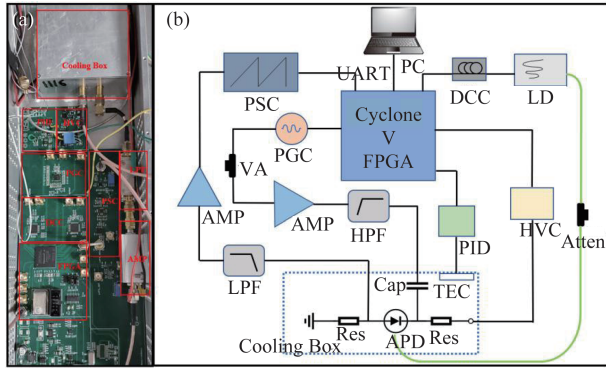


图2 (a) 探测器实物图, (b) 探测器装置图

注: FPGA: 现场可编程门阵列; PGC: 门控产生电路; DCC: 延时电路; HVC: 高压调节电路; PID: 温控调节电路; VA: 数字控制衰减器; AMP: 射频放大器; HPF: 高通滤波器; LD: 激光器; Atten: 光学衰减器; LPF: 低通滤波器; PSC: 脉冲整形电路

Fig. 2 (a) Physical image of the detector, (b) Schematic setup of the detector

Note: FPGA: Field programmable gate array, PGC: Pulse generating circuit, DCC: Delay chip circuit, HVC: High voltage circuit, PID: Temperature control circuit, VA: Voltage controlled attenuator, AMP: RF amplifier, HPF: High pass filter, LD: Laser, Atten: Optical attenuator, LPF: Low pass filter, PSC: Pulse shaping circuit

为APD的门控信号。在加载在APD之前,使用了一个40 dB高功率射频放大器对GHz信号放大。由于PLL芯片输出的信号幅度随着频率的改变而改变,放大器对不同重复频率的门控信号的增益也各不同,因此在信号放大之前先使用数字控制衰减器实现门控信号幅度调节,实现对门控信号幅度的灵活控制使雪崩信号质量达到最佳。此外,考虑到放大器带来的边带噪声、热噪声等,采用一个截止频率为900 MHz的高通滤波器滤除GHz以下增益噪声,随后将其作为控制APD偏置电压的门控信号。与之对应的,在APD的阴极还需要添加一个直流高压偏置电压,与门控信号一起作用在APD阴极,使APD工作在盖格模式。APD在工作时会产生尖峰噪声信号,其频率主要集中分布在GHz信号基频及其谐振频率上。因此,选用截止频率为700 MHz的低通滤波器来滤除噪声信号并将提取出来的雪崩信号经过30 dB增益的低噪声放大器放大后送入脉冲整形电路模块,将雪崩信号进行脉冲展宽,电平转换,最终得到可以被FPGA识别的信号从而实现雪崩信号脉冲计数的功能。

使用半导体制冷片将APD制冷到 -30°C ,选用PT1000铂电阻作为温敏探头,12 bit ADC芯片

AD7091读取PT1000铂电阻阻值,通过LabVIEW上位机与FPGA建立通讯,实时监测温度。GHz正弦门脉冲的峰峰值为12 V左右,通过调节加载在APD上的直流偏压来改变单光子探测器的探测效率,使用LabVIEW上位机软件,实时地监测并记录雪崩信号计数频率值,从而分析计数稳定性与工作速率、偏置电压的关系。

使用1550 nm半导体激光器,将激光器输出的脉冲光经过衰减的相干光作为准单光子源,该激光器与正弦门信号经过延时芯片(步进精度10 ps)延时后同步触发,入射在APD上。InGaAs/InP APD (GD5522-SM-FC/UPC, 中国电子科技集团公司第四十四研究所)感光直径为 $45\ \mu\text{m}$,单模光纤耦合入射光子。通过控制延时芯片来改变激光器脉冲信号与门控信号的延时,使探测器探测效率最大。

1.2 重复频率可调电路设计

为了产生重复频率可调的GHz正弦门信号并且要与参考信号同步,锁相环频率合成器芯片(PLL)是一个很好的选择。锁相环路是一种负反馈控制电路,内部由鉴相器、环路滤波器以及压控振荡器三部分组成,其特点是利用外部输入的参考信号去控制内部振荡信号的频率和相位。ADF4351是一款由ANALOG DEVICE公司推出的锁相环频率合成器,输出频率范围为35 MHz至4400 MHz,噪声基底为 $-220\ \text{dBc/Hz}$,芯片工作电压范围为3.0 V至3.6 V,具有输出带宽高、相位噪声基底低、性能好、使用简便等优点。

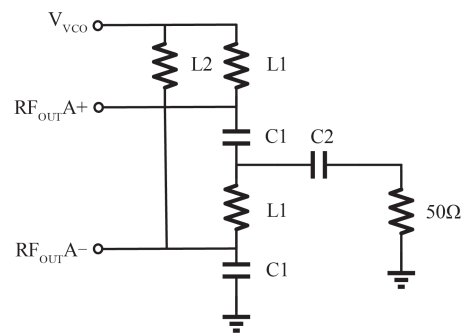


图3 ADF4351输出匹配电路方案

Fig. 3 ADF4351 output matching circuit scheme

ADF4351芯片电路设计的关键之处在于对输出匹配电路的优化,从而保证有高质量的信号输出。RF_OUT-A+和RF_OUT-A-引脚是ADF4351芯片的一对差分对输出引脚,外部需要添加输出匹配电路以获得更好的匹配性能。如图3所示,输出匹配电路

方案是利用巴伦将两路输出合并,元件L1和C1构成LC巴伦,L2为RF_{OUT}A-提供直流路径,电容C2用于隔直,由此获得更好地匹配性能和更高的功率,输出端添加50Ω阻抗匹配电阻以及隔直电容以优化信号质量。

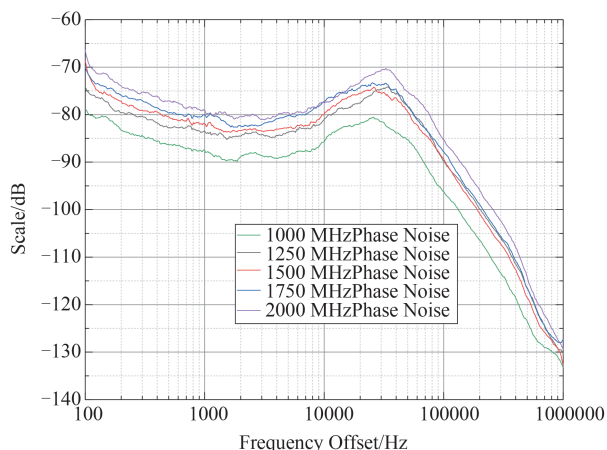


图4 各频点相位噪声测试图

Fig. 4 Phase noise test chart at each repetition frequency

表1 各频点相位噪声测试表

Table 1 Phase noise test table for each repetition frequency

频率 (GHz)	100 Hz (dBc/Hz)	1.00 kHz (dBc/Hz)	10.0 kHz (dBc/Hz)	100 kHz (dBc/Hz)	1.00 MHz (dBc/Hz)
1.00	-78.93	-87.49	-85.77	-96.19	-133.34
1.25	-74.25	-83.51	-80.97	-89.75	-130.50
1.50	-68.62	-81.93	-79.92	-89.39	-132.87
1.75	-69.82	-79.99	-77.50	-87.80	-127.31
2.00	-66.38	-79.02	-77.14	-85.23	-129.44

图4是使用PROSUND公司的频谱分析仪(SP926B, 10 Hz~26.5 GHz)测得的锁相环频率合成器拟合的相位噪声,表1是各频点相噪。结合这两幅图表可以看出ADF4351输出信号的相位噪声随着频率的增加而小幅增加,整体来看相噪都小于-70 dBc/Hz@10 kHz,信号质量较好,能够满足探测器

表2 各重复频率经过放大器和可调衰减器的幅度

Table 2 The amplitude of each repetition frequency through the amplifier and adjustable attenuator

频率/GHz	ADF4351输出门控 信号幅度/mV	经过放大器放大后的 幅度/V	衰减1dB后的幅度/V	衰减2dB后的幅度/V	衰减3dB后的幅度/V
1.00	239	14.7	13.2	11.5	10.5
1.25	201	12.2	11.3	10.3	9.4
1.50	220	15.0	14.1	12.3	11.2
1.75	256	11.0	10.3	8.5	7.7
2.00	289	13.5	12.1	10.6	9.8

系统的指标要求。

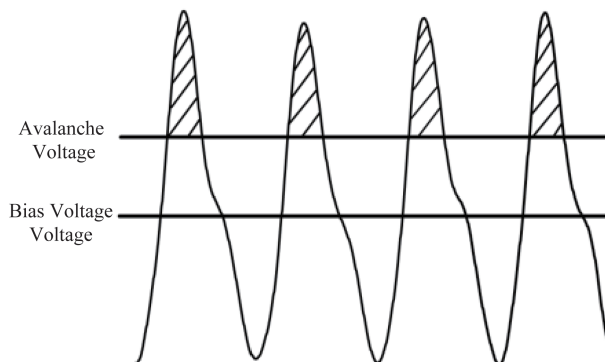


图5 偏置电压和门控信号共同作用的波形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the waveform of the combined action of the bias voltage and the gate signal

在实验过程中,经常需要调节门控信号的幅度和偏置直流电压的大小以使得探测器输出的雪崩信号质量达到最佳。偏置电压大小、门控信号幅度以及雪崩电压的关系如图5所示,阴影部分是InGaAs/InP雪崩光电二极管工作在雪崩电压之上的区域,只有在这个区域雪崩二极管才会发生雪崩。如果发生雪崩的区域越小,则会导致雪崩程度越小从而雪崩信号的幅度也会变小,增大有效信号的提取难度;而雪崩区域越大,则可能导致暗计数、后脉冲计数等误计数增大。因此,为达到一定的探测效率,我们需要设置合适的门信号宽度。此处,门控信号为正弦信号,重复频率改变时,门信号宽度随之改变,即随着重复频率的提升其宽度随之减小。因此,为了制作一台能适应各种重复频率门控信号的探测器,则需要对门控信号的幅度加以控制。表2是ADF4351输出门控信号幅度和经过放大器、可调衰减器之后的信号幅度,可见经放大及衰减后的门控信号幅度范围较大,可以满足设计要求。

2 探测效率与计数稳定性的关系

采用衰减后的准单光子源标定探测器的性能,

具体为使用一个重复频率为 10 MHz, 脉宽为 50 ps 的 1 550 nm 脉冲激光衰减后入射至 APD, 调节脉冲激光的延时使之与门脉冲信号频率同步。激光在耦合到 APD 之前衰减至平均 0.1 光子每脉冲, 门控信号设置为 1 GHz。调节偏置电压以改变 APD 的增益, 即可相应地改变了探测器的探测效率。通过 LabVIEW 精确地调节偏置电压(精度 1 μV), 将单光子探测器探测效率从 5% 逐步升高到 20% 并记录下长时间工作的输出信号以验证探测器工作在不同探测效率下是否都能够长时间稳定工作。探测器的探测效率 η 的公式为:

$$\eta = \frac{R_{\text{on}} - R_{\text{off}}}{R_{\text{incident}}} \quad (1)$$

式(1)中 R_{on} 是探测器有光子入射时的总计数, R_{off} 是探测器无光条件下的暗计数, R_{incident} 为入射光子数, 探测效率也称探测器相应入射光子的概率。在完成探测效率的标定后关闭激光光源, 保持其他设置不变, 此时 LabVIEW 上显示的计数即为每秒探测器的暗计数, 将暗计数除以门脉冲重复频率就可得到暗计数率。

表 3 各探测效率对应的偏置电压及暗计数率

Table 3 Bias voltage and dark count rate corresponding to each detection efficiency

探测效率/(%)	偏置电压/V	暗计数率/门 ⁻¹
5	60.728	0.50×10^{-6}
10	61.019	0.72×10^{-6}
15	61.448	1.50×10^{-6}
20	62.088	2.95×10^{-6}

表 3 是探测器工作在不同探测效率对应的偏置电压与暗计数率的关系, 可以看出为获得更高的探测效率, 直流偏置电压要提高。此外, 暗计数率也随着探测效率的上升而上升。例如, 探测效率为 5% 时, 暗计数率为 0.5×10^{-6} /门; 当探测效率上升到 20% 时, 暗计数率也增大到 2.95×10^{-6} /门。我们测试了不同探测效率下的单光子探测器输出信号来评估其稳定性, 如图 6 所示。图的左侧是有入射光子时的探测器工作 2 小时输出信号的记录, 右侧是探测器输出的暗计数, 可以大致看出在探测器工作在不同的探测效率下都可以稳定工作。我们分析计数的标准差(反映一个数据集的离散程度)来具体评估探测器输出信号的稳定性。探测效率从 5% 增大到 20%, 其计数标准差从 348 Hz 增大到 689 Hz。关掉入射光, 探测器输出的暗计数也有着同样的情

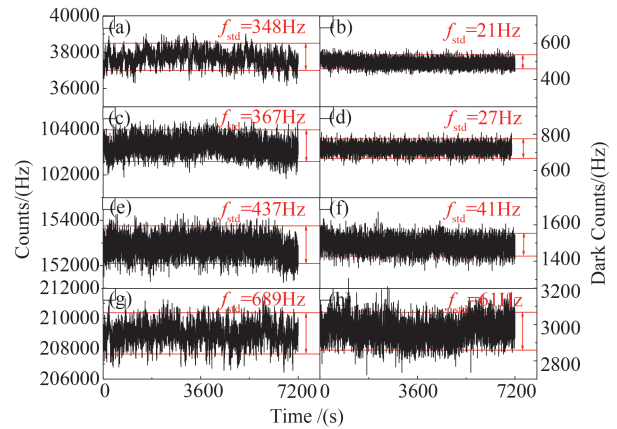


图 6 不同探测效率下的探测器输出信号

注: 重复频率为 1 GHz 的正弦门控信号 (a) 5% 探测效率总计数, (b) 5% 探测效率暗计数, (c) 10% 探测效率总计数, (d) 10% 探测效率暗计数, (e) 15% 探测效率总计数, (f) 15% 探测效率暗计数, (g) 20% 探测效率总计数, (h) 20% 探测效率暗计数

Fig. 6 Output counts of the detector at different detection efficiencies

Note: Sinusoidal gated signal with a repetition frequency of 1 GHz (a) 5% detection efficiency total counts, (b) 5% detection efficiency dark counts, (c) 10% detection efficiency total counts, (d) 10% detection efficiency dark counts, (e) 15% detection efficiency total counts, (f) 15% detection efficiency dark counts, (g) 20% detection efficiency total counts, (h) 20% detection efficiency dark counts

况。这一现象的原因可能与 APD 实现单光子探测的机理相关。APD 工作在盖格模式下, 即其两端的反向偏压大于其雪崩击穿电压, 光子在吸收层被吸收后会激发出载流子, 随后进入倍增层并在电场的作用下发生碰撞电离, 从而形成雪崩效应输出雪崩电流。为了获得更大的探测效率, 我们提高了偏置电压, 增强的电场作用使得光载流子碰撞电离系数增大, 光生载流子总数增多, 载流子碰撞电离次数的随机性就更大, 导致雪崩计数在偏置电压越高的情况下有了更大的计数抖动。为了获得更高的探测效率以及更低的计数抖动, 需要在降低 APD 内的倍增层电场强度的条件下保证雪崩信号的有效提取, 即提高探测器的信噪比。我们可以选取更高阶数的低通滤波器更好地滤除尖峰噪声信号从而实现雪崩信号有效检测。此外, 通过选用精度更高的延时电路调节光与门之间的延时达到最大计数率, 探索更高抑制比的噪声消除方案等也是提升探测器计数稳定的有效途径。

此外, InGaAs/InP APD 作为一种半导体器件, 温

度对其性能至关重要。考虑到探测器的集成度及功耗,我们减小制冷模块体积,选择了四级制冷半导体制冷片,最低可将APD制冷到 -42°C 左右,结合反馈电路,可实现 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的温度设置及调节。将APD制冷到 -40°C ,并调节偏置直流电压,测试其探测效率为10%时,暗计数率为 $0.56 \times 10^{-6}/\text{门}$;当探测效率上升到20%时,暗计数率增大到 $1.92 \times 10^{-6}/\text{门}$ 。与 -30°C 相比,SPAD的暗计数率下降并不明显,但是制冷功耗增加了 $\sim 10\text{ W}$ (接近50%)。基于此,将SPAD的工作温度设置在 -30°C 。

3 重复频率与计数稳定性的关系

为了进一步验证该InGaAs/InP SPD在不同重复频率下的探测性能,通过LabVIEW上位机控制并改变正弦门控重复频率,重复频率改变的范围为1~2 GHz,调节温度使APD工作在 -30°C ,并标定激光器输出的光功率衰减到0.1光子/脉冲水平。调整正弦门控信号幅度以及加载在APD阴极的偏置电压使探测器工作在10%探测效率,使用LabVIEW记录下探测器输出信号的长时间计数情况。

图7(a)展示的是门控重复频率设置为1 500 MHz时APD阳极直接输出的信号,可以发现雪崩信号被湮没在频率为GHz的尖峰噪声中。我们采用700 MHz的低通滤波器,其对1 000 MHz以上信号衰减可达40 dB,再经过放大器放大后输出的信号如

图7(b)所示,可以观察到高频的尖峰噪声被有效地滤除,获得了信噪比良好的雪崩信号。图7(d)展示的是改变重复频率并使探测器工作在10%探测效率时的计数输出情况。由该图可知,当探测器工作在1.25 GHz重复频率下,其输出的信号的抖动最低,标准差仅为331 Hz;当探测器工作在1.5 GHz时其输出信号抖动最高,标准差为495 Hz任属于稳定的计数输出。探测器重复频率的改变,其计数标准差相差不大,即验证了重复频率的变化与探测器计数稳定性没有必然的关系。由此,可以证明重复频率可调的单光子探测器工作在1~2GHz的门控频率下都可以长时间稳定地工作。探测器在无光照条件下的输出信号计数率如图7(c)所示,随着门控重复频率的升高,暗计数也会相应地增加。门控信号重复频率为1 GHz时,暗计数为 $0.8 \times 10^{-6}/\text{门}$,在升高到2 GHz时,暗计数为 $2.4 \times 10^{-6}/\text{门}$ 。探测器工作的重复频率超过1.5 GHz以后,暗计数率上升更为明显,但仍在稳定可控的范围内,即保持在 $10^{-6}/\text{门}$ 的水平,对探测器计数输出稳定性影响不大。

4 结论

本文设计了一种单通道重复频率可调的GHz正弦门控InGaAs/InP APD单光子探测器,并将其集成化以达到更好的性能和更小的体积。在1 GHz、1.25 GHz、1.5 GHz、1.75 GHz、2 GHz这几个具有代

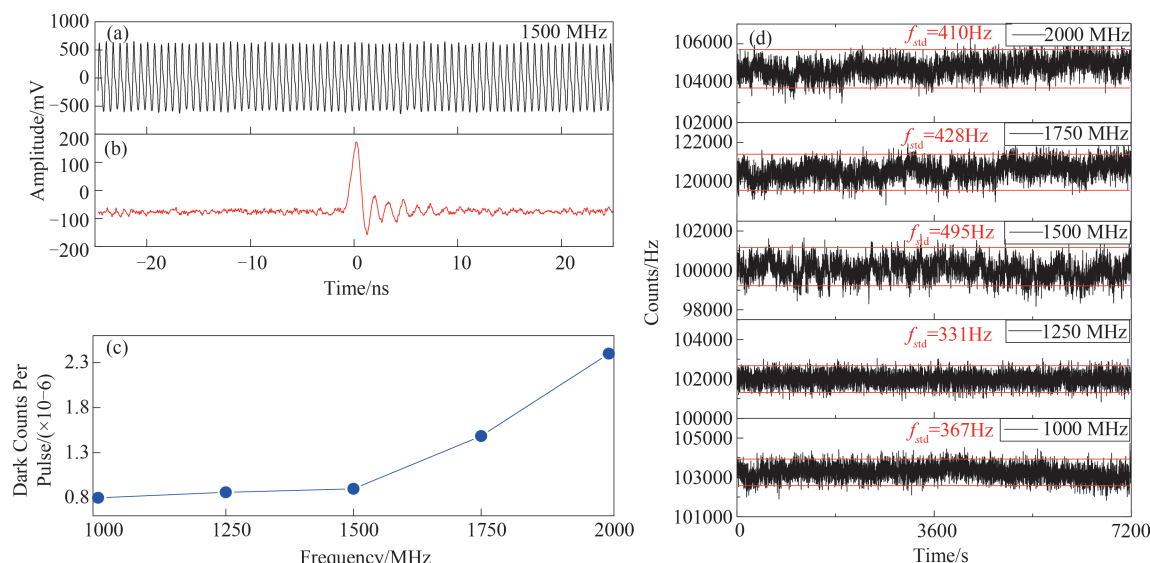


图7 (a) 1500 MHz门控频率下APD输出信号波形,(b)经过低通滤波器及放大后的雪崩信号,(c)不同重复频率无光照时的雪崩信号计数率,(d)探测器工作在各频点10%探测效率2 h计数情况

Fig. 7 (a) APD output signal waveform at 1500 MHz gate frequency, (b) avalanche signal after low-pass filter and amplification, (c) avalanche signal count rate under different repetition frequency without light, (d) detector working at each frequency with 10% detection efficiency for 2 hours

表性的门控重复频率下,探测器都可以长时间稳定工作,可为高速量子通信、量子计算等系统提供高性能的探测终端^[14]。随着探测效率的提升,探测器整体计数率抖动会略微增大,对探测器应用的推广有所限制。可以选取更高阶数的低通滤波器更好地滤除尖峰噪声信号,实现更高的信噪比来改善这一性能,从而为远程激光通信、激光遥感等系统提供高性能单光子探测器件。

References

- [1] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. *Nature photonics*, 2009, **3** (12): 696.
- [2] Eisaman M D, Fan J, Migdall A, *et al.* Invited review article: Single-photon sources and detectors [J]. *Review of scientific instruments*, 2011, **82**(7): 071101.
- [3] Gansen E J, Rowe M A, Greene M B, *et al.* Photon-number-discriminating detection using a quantum-dot, optically gated, field-effect transistor [J]. *Nature photonics*, 2007, **1**: 585-588.
- [4] Barity J G, Tapster P R. Experimental violation of Bell's inequality based on phase and momentum [J]. *Physical Review Letters*, 1990, **64**(21): 2495-2498.
- [5] Bender P L, Currie D G, Dicke R H, *et al.* The lunar laser ranging experiment [J]. *Science*, 1973, **182**: 229.
- [6] Lacaíta A L, Francese P A, Cova S D, *et al.* Single-photon optical-time-domain reflectometer at 1.3 micron with 5-cm resolution and high sensitivity [J]. *Optical Letters*, 1993, **18**(13): 1110-1112.
- [7] Eraerds P, Legre M, Zhang J, *et al.* Photon counting OTDR: advantages and limitations [J]. *Journal of Light wave Technology*, 2010, **28**(6): 952-964.
- [8] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, *et al.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. *Science & Application*, 2015, **4**: 1-13.
- [9] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C F, *et al.* Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5 μ m photon counting applications [J]. *Journal of modern optics*. 2007, **54**: 283-304.
- [10] LIU Min-Hong, CHEN Jie, LIANG Yanet *al.* Spike-noise balanced technique for high-speed detection of near-infrared single photons [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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。红外与毫米波学报) 2016, **35**(5): 564-568.
- [11] He D Y, Wang S, Chen W, *et al.* Sine-wave gating InGaAs/InP single photon detector with ultralow afterpulse [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**: 111104.
- [12] 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**: 041114.
- [13] Jiang W H, Liu J H, Liu Y L, *et al.* 1.25 GHz sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector with a monolithically integrated readout circuit [J]. *Optical Letters*, 2017, **42**(24): 5090-5093.
- [14] Peng C Z, Zhang J, Yang D, *et al.* Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding [J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**: 010505.