

文章编号: 1005-5630(2025)01-0079-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202402190022

基于 InGaAs/InP 的高效率 GHz 单光子探测器

马靖¹, 梁焰^{1,2}

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海量子科学研究中心, 上海 201315)

摘要: 作为量子信息系统的接收终端, 提高单光子探测器的探测效率与工作速率意义重大。基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 设计了 2 GHz 高探测效率单光子探测器, 采用正弦门控与低通滤波技术相结合的方法, 有效抑制了门控模式下 APD 的尖峰噪声并提取雪崩信号, 尖峰噪声抑制比达到了 41.5 dB。在通信波段 1310 nm、工作速率 2 GHz、工作温度 -10 °C 的条件下, 实现了探测效率 40.2%、暗计数率 7.75×10^{-6} /门、后脉冲概率 10.0%、时间抖动仅为 80 ps 的高性能单光子探测。此外, 还分析了不同幅度的门控信号与多个 APD 工作温度, 探究其对 APD 性能的影响, 探索进一步提升探测器性能的可能, 为实现远距离量子通信、量子计算等应用提供支撑。

关键词: 单光子探测器; 雪崩光电二极管; 低通滤波技术

中图分类号: TN 215 **文献标志码:** A

High-efficiency GHz single-photon detector based on InGaAs/InP

MA Jing¹, LIANG Yan^{1,2}

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

2. Shanghai Quantum Science Research Center, Shanghai 201315, China)

Abstract: As the receiving terminal for quantum information systems, improving the photon detection efficiency and working frequency of single-photon detectors holds great significance. In this paper, we present a 2 GHz high-detection-efficiency single-photon detector utilizing an InGaAs/InP avalanche photodiode (APD). By combining sinusoidally gated operation with the low-pass filtering technique, the spike noise of the APD was effectively suppressed, achieving a noise rejection ratio of 41.5 dB. With high-frequency gated operation, the detection efficiency reached 40.2% at a wavelength of 1310 nm. The afterpulse probability was 10.0%, and the dark count rate

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金 (61927813, 62175152); 上海市市级科技重大专项 (2019SHZDZX01)

第一作者: 马靖 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为量子探测。E-mail: 1016606206@qq.com

通信作者: 梁焰 (1986—), 女, 副教授, 研究方向为量子探测。E-mail: yanliangSPD@163.com

was 7.75×10^{-6} per gate when the APD was cooled to $-10\text{ }^\circ\text{C}$. The SPD also demonstrated excellent time resolution, with a time jitter of only 80 ps. To further improve the performance of the SPD, we adjust the amplitudes of the gate signal and operating temperatures. The presented SPD provides support for applications such as quantum communication and quantum computing.

Keywords: single-photon detectors; avalanche photodiode; low-pass filtering technique

引 言

单光子探测器(single-photon detector, SPD)是检测微弱光信号的核心器件,极高的灵敏度使其能检测光的最小能量单位——光子^[1]。在量子信息科学^[2]、深空通信^[3]、量子密钥分发^[4]等应用中,高光子探测效率(photon detection efficiency, PDE)的单光子探测器能够有效降低通信系统的误码率,提高量子计算的准确性和效率。目前常用的单光子探测器有超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)^[5]、光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)^[6]、雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)^[7]等,其中超导纳米线单光子探测器的探测效率已超过 90%。但它们需要在低于 4 K 的超低温下工作,导致较高的成本和功耗,并使得集成和维护更为困难。而 PMT 的工作电压高达上千伏,APD 相较于 PMT,其偏置电压较低,通常低于 300 V,结构也更为简单。APD 相较于超导纳米线单光子探测器体积更小,易于集成,功耗低,仅需热电制冷,可在室温下工作,成本也更低,基于这些优势 APD 逐渐成为单光子探测器的主流选择之一。

APD 通常工作在盖革模式下,即反向偏置电压高于雪崩电压的状态^[8],可以通过提高 APD 的偏置电压进而提高 APD 的探测效率,但同时也会带来更高的误计数:暗计数率与后脉冲概率。过高的误计数会限制 APD 探测效率的提升及 APD 应用的推广。降低 APD 的误计数并保证其探测效率具有一定的技术挑战。本文将 APD 运行在正弦门控模式下,在光子到来时才进行探测,这样能够有效降低误计数,提高探测效率。为了抑制由 APD 的容性效应带来的尖峰噪声,采用低通滤波级联的方法,使尖峰噪声抑

制比达到了 41.5 dB。由于 APD 是半导体器件,当 APD 的工作温度变化时,其性能也会改变,因此设置不同的工作温度,观察 APD 的性能变化情况。门控信号的幅度也是影响探测效率的重要因素之一,不同幅度的门控信号,其反向偏置电压也不尽相同。高幅值的门控信号,因其过雪崩电压更高,从而提高了探测效率,不同幅值的门控信号也会影响后脉冲概率。同样设置了不同幅度的门控信号进行对比实验。最终经过多组实验探究,当设置门控信号的幅度为 10 V、APD 的工作温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,APD 能够兼顾探测效率与误计数。最终实现了 40.2% 的高探测效率,暗计数率为 7.75×10^{-6} /门,后脉冲概率为 10.0%,而时间抖动仅为 80 ps,为未来构建新一代量子通信网络提供了高性能终端。

1 2 GHz 单光子探测方案设计

1.1 APD 的响应带宽

首先门控信号频率的选择需要在 APD 的响应带宽范围内,响应带宽是实现高速 APD 单光子通信的关键参数。令 APD(WOS-E-1320-75, Wooriro)工作在线性模式下,测量其响应带宽。APD 的响应带宽 W_B 可通过以下公式进行换算

$$W_B = \frac{0.35}{\tau_r} \quad (1)$$

式中, τ_r 为 APD 接收到调制光信号后,APD 输出的光电信号强度从 10% 上升到 90% 所需的上升时间。给 APD 施加一定的偏置电压,当波段为 1310 nm,光脉冲宽度为 50 ps 的脉冲激光通过单模光纤耦合到 APD 光敏面时,使用带宽 4 GHz 的高速示波器(DSA70404C, Tektronix)观

察其输出信号。如图 1 所示, 此时 APD 输出波形的上升时间 τ_r 约为 131.3 ps, 根据式(1)可得出此时 APD 的响应带宽约为 2.6 GHz。考虑到盖革模式下 APD 的增益远超过线性模式, 而增益的提升通常会导致带宽的缩减^[9], 最终将本实验中的正弦门控信号频率设定为 2.0 GHz。

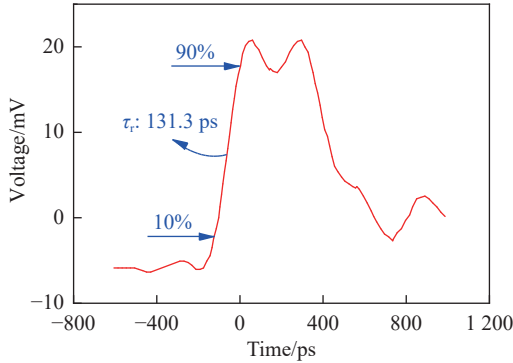
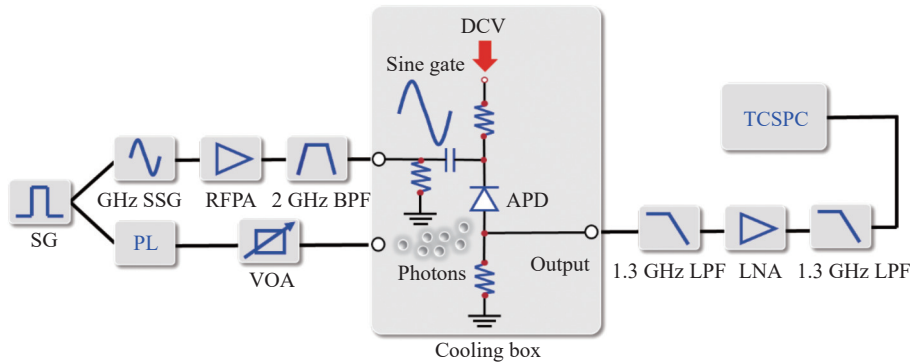


图 1 APD 在线性模式下的测试图

Fig. 1 Diagram of APD test in linear mode

1.2 2 GHz 单光子探测器探测原理

当 APD 两端的反向偏压高于雪崩电压时, APD 处于盖革模式, 在该模式下 APD 处于高增益状态, 单个光子被吸收后就会产生宏观电流信号。为了进行下一次单光子探测, 需要将 APD 两端的偏置电压降至雪崩电压以下^[10]。实验中采用正弦门控方案, 将高频正弦门控信号叠加到反向偏压上, 使 APD 在线性模式与盖革模式之间不断切换, 实现雪崩信号的快速淬灭, 降低误计数并提高工作速率。由于 APD 的容性特征, 当门控信号施加在 APD 两端时, APD 输出的尖峰噪声会淹没微弱的雪崩信号, 因此需要抑制尖峰噪声, 提取雪崩信号。目前, 门控方案下常用的尖峰噪声抑制方案有低通滤波、自差分平衡、带通滤波、等效电容平衡等方法^[11], 在本实验中选择低通滤波法抑制尖峰噪声, 实验装置如图 2 所示。



SG: 低频信号发生器; GHz SSG: GHz 正弦信号发生器; PL: 1310 nm 皮秒脉冲激光器; VOA: 可调光衰减器; RFA: 射频功率放大器; 2 GHz BPF: 2 GHz 带通滤波器; 1.3 GHz LPF: 1.3 GHz 低通滤波器; LNA: 低噪声放大器; TCSPC: 时间相关单光子计数器; Cooling box: 制冷盒

图 2 实验装置图

Fig. 2 Diagram of experimental device

首先低频信号发生器产生两路重复频率为 10 MHz 的触发信号, 分别作为皮秒脉冲激光器与 GHz 正弦信号发生器的触发。InGaAs/InP APD 在近红外波段响应度较高, 尤其是在长波长范围内, 因此选择波长为 1310 nm 的皮秒脉冲激光器作为光源。激光器触发后输出频率为 10 MHz、光脉冲宽度为 50 ps 的脉冲光。若光源的多光子概率较大, 多个光子同一时刻到来时, 探测器会将其误判为一次计数, 因此将光源经光衰减器衰减至每脉冲平均光子数为 0.1 后耦合到

APD 的光敏面上。激光为相干光, 根据泊松分布计算出此时单脉冲内多光子概率小于 0.52%, 有效避免了单光子探测器计数率上的误判, 使数据更加精准。GHz 正弦信号发生器生成频率为 2 GHz 的正弦信号, 由于其幅度较低, 需经过射频功率放大器进行放大, 而放大后的信号中夹杂着谐波噪声与边带噪声, 使用 2 GHz 带通滤波器滤除这些噪声, 最终形成了幅度为 10 V、频率为 2 GHz 的正弦门控信号, 如图 3(a)所示。为了抑制尖峰噪声并尽可能地保留雪崩信号中的

高频成分, 在 APD 的输出端将 2 个截止频率为 1.3 GHz 的低通滤波器级联, 经过电阻提取的雪崩信号较为微弱, 所以还需要加入低噪声放大器对雪崩信号进行放大。合适的工作温度对 APD 的性能稳定至关重要, 为了保持 APD 工作点的稳定性, 将 APD 置于制冷盒之中, 利用四级热电制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 对其制冷, 将 APD 的工作温度设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最终低通滤波放大后的雪崩信号幅度为 252 mV, 如图 3(c) 所示, 尖峰噪声的幅度为 774 mV, 如图 3(b) 所示, 图 3(c) 中低通滤波器级联抑制后的尖峰噪声峰值为 6.48 mV, 尖峰噪声抑制比达到了 41.5 dB, 实现了高信噪比, 证明了低通滤波技术的可行性。最终将雪崩信号输入时间相关单光子计数器 (time correlated single-photon counter, TCSPC) 中, 对实验数据进行采集, 使用的 TCSPC (HydraHarp 400, PicoQuant) 的单通道计数率低于 12.5 MHz, 因此将激光的重复频率设置为 10 MHz。

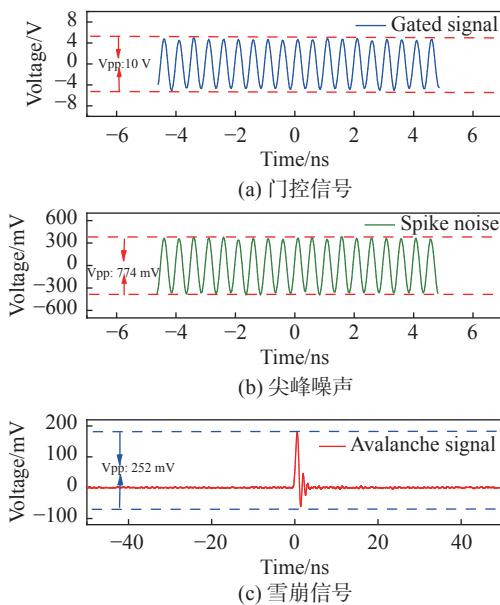


图 3 3 种信号的波形图

Fig. 3 Three signal waveforms

2 2 GHz 单光子探测器性能测试

2.1 时间抖动

时间抖动是单光子探测器的重要参数之一,

时间抖动特性决定了激光雷达等在测距领域的分辨率与测距精度。单光子探测器的时间抖动定义为: 从接收到光信号开始, 到输出光生电信号为止, 这一起止时间变化。使用 TCSPC 测量时间抖动的具体过程为: 将激光器的触发信号作为基准信号连接到 TCSPC 的起始 (start) 端, APD 输出的雪崩信号则接入终止 (stop) 端, 将时间分辨率设置为 2 ps, 对起始信号与终止信号之间的时间间隔进行多次测量, 并统计输出结果, 获得时间-雪崩计数的直方图, 即可分析时间抖动。图 4 为温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、门控信号幅度为 10 V、探测效率为 40% 的时间-雪崩计数直方图。通过测量, 此时的半峰全宽仅为 80 ps, 即认为它是此时探测器的时间抖动。

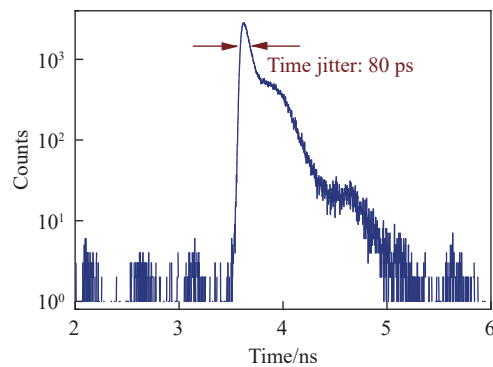


图 4 时间抖动测试图

Fig. 4 Diagram of time jitter test

2.2 光子探测效率、后脉冲概率与暗计数率

实验中通过调节激光信号与门控信号之间的延时, 使光子计数达到最大, 并使用 TCSPC 对光子探测效率、后脉冲概率与暗计数率进行标定。计算探测效率时, 首先要从时间-雪崩计数直方图中获得光计数峰在直方图中的位置, 并统计该光计数峰范围内的光计数和 C_{PH} , 如图 5 所示。

考虑到光脉冲中包含的光子数符合泊松分布, 最终的探测效率的计算公式为

$$P_{de} = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{1 - P_D}{1 - C_{PH}/f_L} \right) \quad (2)$$

$$P_D = \frac{C_D}{f_g} \quad (3)$$

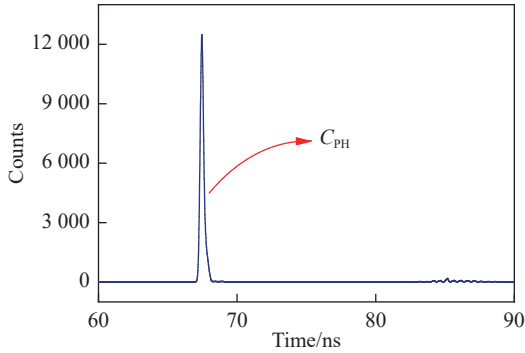


图 5 TCSPC 采集数据图

Fig. 5 Data acquired from TCSPC

式中: μ 为每脉冲平均光子数; f_L 为激光频率; C_D 为单位时间内的暗计数总和; f_g 为门控信号频率; P_D 为每门的暗计数概率。而计算后脉冲概率时不仅要获得光计数峰范围内的光子计数和, 还要计算光计数峰以外的计数。本实验的后脉冲的计算公式为

$$P_{ap} = \left(\frac{P_{NI} - P_D}{P_{PH} - P_{NI}} \right) \frac{f_g}{f_L} \quad (4)$$

$$P_{NI} = (C_T - C_{PH}) (f_g - f_L) \quad (5)$$

$$P_{PH} = C_{PH} / f_L \quad (6)$$

式中: P_{PH} 为光计数峰内每门发生计数的概率; P_{NI} 为光计数峰以外每个门内发生计数的概率; C_T 为单位时间内的计数总和。图 6 为根据上式计算出的光子探测效率、后脉冲概率、每门暗计数率随偏置电压的变化情况。由图 6 可以得出, 随着直流偏置电压的提高, 光子探测效率、暗计数率与后脉冲概率均呈现上升的趋势, 探测效率在 20.4% 前以近乎线性的方式增加, 后脉冲概率与暗计数率增长得也较为缓慢; 在探测效率 20.4% 后, 暗计数率与后脉冲概率急剧增长, 光子探测效率受到误计数的限制, 增长趋势越来越缓慢。在偏置电压 69.5 V 下, 探测效率为 40.2%, 此时后脉冲概率为 10.0%, 暗计数率为 7.75×10^{-6} 门。

我们将实验中的探测器性能指标与国内外器件进行相关参数的比较, 如表 1 所示, 以观察探测器性能处于何种水平。综合来看, 本设计兼顾了重复频率与探测器性能, 具有一定优势。

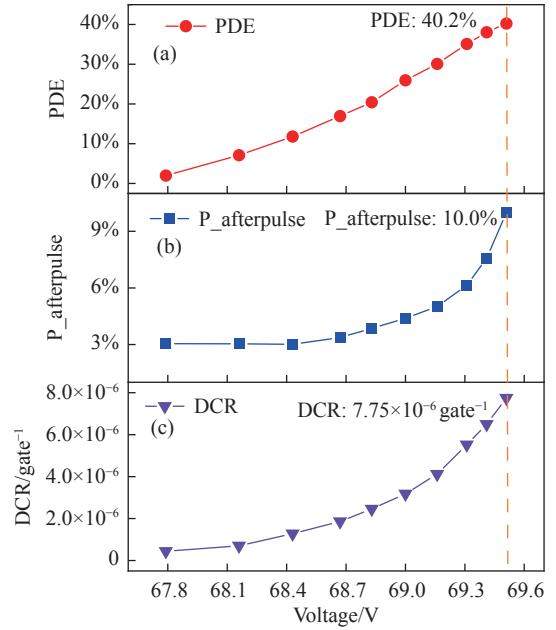


图 6 门控信号幅度为 10 V、工作温度为 -10°C 时 (a) 光子探测效率、(b) 后脉冲概率和 (c) 暗计数率与偏置电压的关系

Fig. 6 (a) Photon detection efficiency, (b) afterpulse probability, and (c) dark count rate and bias voltage for a gated signal amplitude of 10 V and an operating temperature of -10°C

表 1 国内外探测器与本设计的性能对比

Tab. 1 Comparison of detector performance at home and abroad with this design

机构	探测效率/%	暗计数率/gate ⁻¹	后脉冲概率/%	重复频率/GHz
本文设计	40.2	7.75×10^{-6}	10.0	2
中国科学技术大学 ^[12]	60	2.72×10^{-4}	14.8	1.25
日内瓦大学 ^[13]	10	4.8×10^{-7}	8.3	2.23
东芝公司欧洲研究院 ^[14]	55	3×10^{-4}	10.2	1

3 门控信号幅度、温度对 APD 性能的影响

3.1 温度对 APD 性能的影响

APD 的暗计数率与温度密切相关, 在一定的温度范围内, APD 的暗计数率主要由热激发这一物理机制产生, 适当降低温度会减少暗计数率^[15]。而后脉冲概率的影响因素同样离不开温度, 后脉冲概率的模型可以根据以下公式进行粗略描述

$$P_{ap} \propto (C_d + C_p) \cdot \int_0^\delta V_{ex}(t) dt \cdot e^{-\tau_d/\tau} \quad (7)$$

式中： C_d 为APD的结电容； C_p 为整个APD探测器电路的寄生电容； δ 为雪崩持续时间； V_{ex} 为APD的过雪崩电压； τ_d 为探测器的死时间； τ 为被捕获载流子的寿命。可以在一定范围内提高APD的工作温度，缩短被捕获载流子的寿命 τ ，即减小后脉冲概率^[16]。基于以上理论，通过改变TEC的电流，调节APD的工作温度，在第2节的基础上，加入了-30℃、25℃这两个温度工作点，保持门控信号的幅度都为10V，改变偏置电压，观察不同温度下后脉冲概率、暗计数率随探测效率的变化情况。

如图7(a)、(b)所示，在相同探测效率条件下，25℃工作温度的整体后脉冲概率低于-30℃和-10℃，同时，它在3组温度条件中饱和探测效率也是最高的，达到了45.1%。然而，在25℃条件下，探测效率17%后的暗计数率急剧增长，最高达到了 1.76×10^{-5} /门。在-30℃时，后脉冲概率仅能在12.1%探测效率前保持平稳，之后的后脉冲概率迅速提高，在探测效率达到25.0%后，继续提高偏压，虽然光计数增加，但有效计数，即图5中的光子峰范围内计数已达到饱和。相比之下，-10℃工作温度不仅能够维持较高的探测效率，其后脉冲概率在探测效率30.1%前都能保持较为平稳的增长趋势，且整体暗计数率相对于25℃更低，因此，-10℃是较为理想的温度工作点。

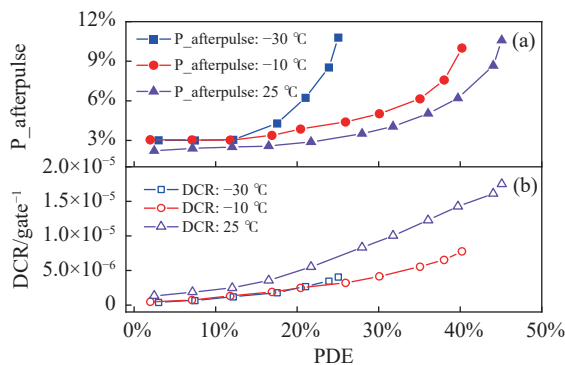


图 7 在不同温度下(a)后脉冲概率和(b)暗计数率与探测效率的关系

Fig. 7 (a) Afterpulse probability and (b) dark count rate as a function of photon detection efficiency at different temperatures

3.2 门控信号幅度对 APD 性能的影响

对于门控模式下的APD，门控信号的幅度至关重要，高幅值的门控信号，意味着更高的过雪崩电压，能够提高探测效率。此外，在一定范围内，增加门控信号的幅度，探测器的有效门宽也会随之减小，有效门宽越小意味着雪崩信号被淬灭的速度越快，APD的雪崩持续时间也就越短，APD内被固有的材料缺陷所捕获的载流子也就越少，这样一来后脉冲概率就会得到很大程度上的改善^[17]。因此设定了8V、10V、12V这三个不同幅度的门控信号，保持APD的工作温度不变，观察APD的性能随探测效率的变化情况。

如图8所示，在相同的探测效率条件下，观察到随着门控信号幅度的增加，后脉冲概率呈现下降趋势。当门控信号幅度设定为8V时，后脉冲概率高达15.0%，这一数值明显超过了在相同探测效率条件下，门控信号幅度为10V和12V时的后脉冲概率。由于误计数的影响，8V门控信号的饱和探测效率仅为21.7%，相比之下，门控信号幅度提高到12V时，饱和探测效率可达到43.1%，在所有测试组中表现最佳。然而，门控信号幅度的增加也导致暗计数率相应提高，在12V时，整体暗计数率超过了其他两组的数值，最高达到 1.74×10^{-5} /门。暗计数率显著增高可从以下两个方面分析。首先，门控信号幅度进一步提高，信号的功率增加，门控信号加载至

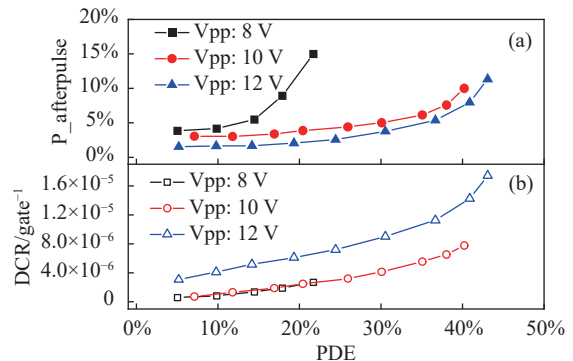


图 8 在不同门控幅度下(a)后脉冲概率和(b)暗计数率与探测效率的关系

Fig. 8 (a) Afterpulse probability and (b) dark count rate as a function of photon detection efficiency at different gate signal amplitudes

APD上由于信号反射,一部分信号会转化为热量附着在APD表面使温度升高,从而升高了暗计数。其次门控信号幅度提高,尖峰噪声的幅度也对应提高,低通滤波器对尖峰噪声的抑制能力则会降低,使得暗计数中尖峰噪声成分增加。综合考虑,10 V作为门控信号的幅度是一个较为合适的选择。

结合3.1节与3.2节,在选择门控信号的幅度与APD工作温度时,应在后脉冲概率满足条件的情况下,尽可能保持较低的暗计数,提高探测效率^[18]。综合比较后可得出,温度为-10℃、门控信号幅度为10 V的工作条件,不仅能让探测器保持较高的探测效率,同时暗计数率与后脉冲概率也优于其他对照组,因此实验中选择该工作点对APD进行测试。

4 结论

本文采用了正弦门控和低通滤波相结合的高速APD单光子探测方案,有效抑制了尖峰噪声,提取了雪崩信号,实现了41.5 dB的高信噪比。为尽可能提高单光子探测器的性能,设置了不同的门控信号幅度与APD工作温度进行对比实验,探究最佳的APD工作点,最终实现了探测效率为40.2%的高速单光子探测,并保持80 ps的低时间抖动,为量子通信领域提供了可靠的接收终端。

参考文献:

- [1] 黄梓楠,梁焰.超短脉冲门控高速InGaAs/InP APD单光子探测[J].光学仪器,2018,40(4):15-19.
- [2] WANG S, CHEN W, YIN Z Q, et al. Practical gigahertz quantum key distribution robust against channel disturbance[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2030-2033.
- [3] 邱家稳,王强,马继楠.深空探测技术[J].红外与激光工程,2020,49(5):20201001.
- [4] TAKEMOTO K, NAMBU Y, MIYAZAWA T, et al. Quantum key distribution over 120 km using ultrahigh purity single-photon source and superconducting single-photon detectors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14383.
- [5] 闫夏超.基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究[D].南京:南京大学,2018.
- [6] 杨川荣.基于单光子探测的光信息感知及应用研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [7] 申光跃.近红外单光子成像技术研究[D].上海:华东师范大学,2021.
- [8] 魏先政.高速InGaAs单光子探测器设计[D].济南:山东大学,2013.
- [9] 龙耀强,单晓,武文,等.基于InGaAs/InP低噪声GHz单光子探测器研究[J].红外与激光工程,2023,52(3):20220901.
- [10] 杨雄.基于伪随机码激光测距原理的数字SiPM芯片设计及应用[D].南京:南京大学,2021.
- [11] 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.
- [12] FANG Y Q, CHEN W, AO T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550 nm[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 083102.
- [13] ZHANG J, ERAERDS P, WALENTA N, et al. 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution[C]//Proceedings of SPIE, Advanced Photon Counting Techniques IV. Orlando: SPIE, 2010: 76810Z.
- [14] COMANDAR L C, FRÖHLICH B, DYNES J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8): 083109.
- [15] 方余强.半导体单光子探测器集成化研究[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
- [16] 蒋文浩.高性能半导体单光子探测器研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [17] SUZUKI S, NAMEKATA N, TSUJINO K, et al. Highly enhanced avalanche probability using sinusoidally-gated silicon avalanche photodiode[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4): 041105.
- [18] 梁焰.基于InGaAs/InP APD高速单光子探测方法及应用[D].上海:华东师范大学,2014.

(编辑:张磊)