

低噪声大光敏面 InGaAs 近红外单光子探测器

董亚魁^{1,2,1}, 刘俊良^{1,2*}, 孙林山², 李永富^{1,2}, 范书振^{1,2}, 刘兆军^{2,3}, 赵显^{1,2}

(1.山东大学光学高等研究中心, 山东青岛 266237; 2.山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东青岛 266237; 3.山东大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266237)

摘要: 随着单光子探测技术在激光雷达和量子信息领域的应用日渐深入, 单光子探测器的研制也受到了研究人员的更多关注。研制了基于国产单光子半导体雪崩二极管 (Single-Photon Avalanche Diode, SPAD) 的低噪声大光敏面铟镓砷 (InGaAs) 近红外单光子探测器。该 SPAD 有效光敏面直径为 50 μm , 为了同时保证大光敏面下的低暗计数水平和低死时间, 采用了在真空腔体内进行深制冷和主动淬灭的方案, 研制了低功耗的高速主动淬灭电路并使其在腔内与 SPAD 芯片直接互联, 降低暗计数的同时提高了 SPAD 的淬灭和恢复速度。针对腔内淬灭电路及 5 级热电制冷片 (Thermo-electric cooler, TEC) 的发热问题, 着重考虑了探测器的散热结构设计。结果表明, 所研制的探测器在 1550 nm 波长的最大可用探测效率约为 26%, 最低制冷温度为 201 K; 在 203 K、探测效率为 8%、最短死时间 40 ns 时, 后脉冲概率为 11.7%, 暗计数率为 1.3 kHz。上述结果表明, 这一低噪声计数、大光敏面的通信波段近红外单光子探测器适用于对性能和环境空间要求更严苛的应用场合。

关键词: 单光子雪崩二极管; 单光子探测; 近红外; 深制冷; 大光敏面

Low-noise InGaAs near-infrared single-photon detector with large photosensitive surface

Dong Yakui^{1,2}, Liu Junliang^{1,2*}, Sun Linshan², Li Yongfu^{1,2},
Fan Shuzhen^{1,2}, Liu Zhaojun^{2,3}, Zhao Xian^{1,2}

(1. Center for Optics Research and Engineering (CORE), Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China; 2. Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266237, China; 3. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China)

Abstract: With the increasing application of single-photon detection technology in the field of lidar and quantum information, the development of single-photon detectors has attracted more and

¹基金项目: 山东大学自研自制仪器设备培育项目 (zy202004);

more attention by researchers. In this paper, a low-noise InGaAs near-infrared single-photon detector with large photosensitive surface based on domestic SPAD is developed. The diameter of the effective photosensitive surface of the SPAD is 50 μm . In order to reduce the low dark count under the large photosensitive surface, the scheme of applying both deep cooling and active quenching in the vacuum chamber is adopted, and a high-speed active quenching circuit with low power consumption is developed. It can be directly interconnected with the SPAD chip in the chamber, which can reduce the dark count, simultaneously improve the quenching and recovery speed of the SPAD. In purpose to solve the heating problem of the quenching circuit in the chamber and the 5-stage TEC, the design of the heat dissipation structure of the detector is emphatically considered. The results show that the maximum usable detection efficiency of the detector is about 26% at 1550 nm, and the lowest cooling temperature is 201 K. At 203 K, when the detection efficiency is 8% and the shortest dead time is 40 ns, the afterpulse probability is 11.7 %, meanwhile the dark count rate is 1.3 kHz. The above results show that this low-noise count communication-band near-infrared single-photon detector with large photosensitive surface is suitable for applications with more stringent requirements on performance and environmental space.

Keywords: single-photon avalanche diode; single-photon detection; near infrared; deep cooling; large photosensitive surface

1 引言

随着单光子探测技术在远距离激光雷达、量子信息等领域的不断深入应用^[1], 其中的单光子探测器 (Single photon detector, SPD) 是不可或缺的核心器件^[2]。由于单光子探测器的性能与其工作模式和设置参数紧密相关, 研究针对不同场景下不同应用领域的单光子探测器的参数优化具有重要意义。

在近红外波段, 目前主流的单光子探测技术包括基于 InGaAs 阴极的光电倍增管 (Photomultiplier Tube, PMT)、半导体单光子雪崩二极管 (Single-Photon Avalanche Diode, SPAD)、基于光子上转换技术以及超导纳米线单光子探测器 (Superconducting Nanowire Single Photon detector, SNSPD) 等^[3]。PMT 技术具有光敏面大、响应快、成本低等特点^[4], 但是多数 PMT 仅对可见光响应, 对近红外特别是 1550 nm 响应的 PMT 制冷设备体积庞大, 探测

效率相对较低。上转换探测器利用光在铌酸锂(Periodically poled lithium niobate, PPLN)晶体中发生的参量上转换过程^[5], 利用高性能Si单光子探测器进行探测, 暗计数较低, 但需要激光泵浦, 成本较高, 系统体积相对较大。SNSPD性能十分优异, 探测效率极高^[6], 但是SNSPD通常体积庞大、成本较高。相比之下, 基于InGaAs SPAD的单光子探测器具有体积小、探测效率较高、成本低等特点, 适用于近红外波段的探测。

随着基于InGaAs SPAD的单光子探测器在紧凑型人眼安全激光雷达系统中的应用日益广泛, 其短板也逐渐凸显。由于InGaAs/InP SPAD与Si基器件相比具有更小的带隙, 且材料质量普遍低于Si材料, 其暗计数密度远高于Si基器件。因此, 为了获得更小的暗计数率和后脉冲概率, 目前常见的InGaAs SPAD的感光面通常仅约10 μm 至25 μm ^[7], 因此视场角较小, 限制了激光雷达应用中接收光学系统口径和接收效率的提高, 同时提高了光路的调试难度, 降低了机械稳定性。增大SPAD的光敏面, 同时降低SPAD的工作温度, 可以在增大视场角的同时实现降低暗计数的目标。然而, 在实际应用系统中, 更大的视场角和接收口径必然会引入更多的环境背景光噪声, 为了保证回波光子的死时间内, 需要尽可能降低死时间。因此, 实际应用需要在深制冷降低暗计数的同时保证SPAD的高速淬灭和恢复, 而此前基于InGaAs SPAD和NFAD的探测器均无法同时满足上述要求。

研究人员一直致力于降低InGaAs基单光子探测器的暗噪声, 主要通过提高材料质量, 优化SPAD结构设计(包括减小有源区面积), 以及降低SPAD的工作温度来实现。米兰理工大学在2021年发表的文章^[7]中设计了两种不同直径的SPAD, 在225 K和5 V过偏压下, 10 μm 器件和25 μm 器件的暗计数分别为1 kcps和4 kcps。Wu Wen等人^[8]在研制了1 GHz正弦门控自由运转InGaAs/InP APD, 在243 K、探测效率为5%时, 暗计数率为1.5 kHz, 后脉冲概率为11.5%。Li Bin等人^[9]通过合理设计SPAD的结构和低损伤的锌扩散技术研制了一款极低暗噪声的SPAD, 在233 K的工作环境、20%的探测效率下, 暗计数率(Dark count rate, DCR)仅有320 Hz。Liang Yan等人^[10]实现了一种重复频率可调的InGaAs/InP SPAD, 在20%的探测效率下, 暗计数率为 2.5×10^{-6} /门和4.1%的后脉冲概率。J. Wen等人^[11]在2018年讨论和分析了暗电流的来源机制, 在2020年该组实现了62.7%的探测效率, 在226 K下门控工作模式下, DCR为48 kHz, 后脉冲概率保持在2.2%以下。日内瓦大学早在2014年使用斯特林制冷机将NFAD制冷到163 K, 在10%探测效率时将暗计数率降至了1 Hz, 后脉冲概率仅2.2%, 但死时间长达20 μs , 且制冷机体积和功耗较大^[1]。

为了满足工程化应用的要求和无人平台等体积受限系统的需求, 器件的集成化、微型化一直是研究者追求的目标。这也是SPAD相较于SNSPD的较大优势。本文针对1550 nm激光

雷达对单光子探测器应用需求，设计了一种基于InGaAs的低噪声大光敏面单光子探测器，包括专用于SPAD的低功耗电路，并着重考虑了探测器的真空腔体设计和5级热电制冷片(Thermoelectric cooler, TEC)的散热设计。上述设计最终使得探测器在深制冷的工作环境下获得了短死时间时较低的暗计数和后脉冲概率水平。

2 探测器设计

2.1 结构设计

探测器设计外形尺寸为：154 mm×148.5 mm×139 mm，真空核心腔体尺寸为：77 mm×56 mm×25 mm。探测器主要包括前后面板、主体外壳结构、散热器、SPAD真空腔体、电源电路板、控制电路板、淬灭电路腔内板和腔外板等组成。真空腔体由5级TEC、SPAD、部分淬灭电路、PT1000热电阻、支撑结构、抽气阀门等组成，其结构设计图如图1所示。XSJ20C-5560-DSD型SPAD固定在5级TEC的冷面上，TEC与真空腔体外壳粘接，并通过导热硅脂填充缝隙。PT1000热电阻粘接在TEC冷面SPAD旁，用以测量当前SPAD的工作温度。同时，SPAD电极与淬灭电路板使用金丝键合，在空间上与SPAD的距离尽可能小，最大程度地降低干扰和淬灭延迟。淬灭电路板背面不盖油并镀金，具有良好的导热性能，其首先与导热不导电的陶瓷片粘接，然后固定在腔体内的支撑结构上，使淬灭电路的热量更容易传导至腔体底面。淬灭电路板通过90°弯插针与腔体外的另一部分淬灭电路连接。

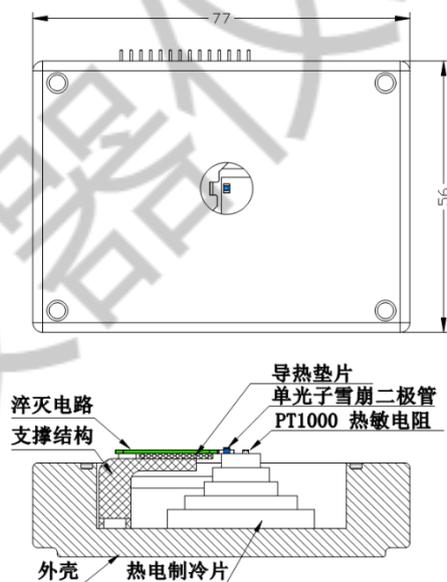


图1 探测器真空腔体结构设计图

Fig.1 Structure diagram of the vacuum chamber of the detector

5级TEC在使用过程中，由于Peltier效应会在TEC的热面产生热量堆积，而TEC热面已与

真空腔底部连接，在探测器设计时考虑了精细的导热结构，降低真空腔温度，保证SPAD的工作温度。在真空腔体内通过O型圈、气密阀门等措施，保证腔体的密封性。真空腔体通过真空泵抽取空气，经测量真空腔体在当前设计下能达到的相对真空度是-88 kPa，本文的实验结果也是在此真空度下测量和分析的。真空腔体通过导热胶与散热器的铜面粘接，通过螺丝固定在散热器上，减少腔体的机械受力。探测器侧面和顶面设计了出风口，侧面风口用于提高散热器的工作效率，顶面用于给控制电路和电源电路进行散热。探测器整机设计图如图2所示。经实验测量，室温298 K下腔体内TEC的最低制冷温度为201 K， ΔT 为97 K。



图2 探测器整机设计图

Fig.2 Illustration of the detector

2.2 电路设计

为了同时实现短死时间和低噪声计数，既需要保证淬灭电路的淬灭和恢复速度足够快，又要尽可能降低淬灭电路自身的发热，以及电路和外界向探测芯片的热传导。因此，课题组设计了低功耗的高速主动淬灭电路，并分为腔体内和腔体外两个部分，如图3所示。其中，设计以带锁存功能的SiGe异质结双极型晶体管（Heterojunction Bipolar Transistor, HBT）工艺的超高速比较器为核心构成主动淬灭电路，结合外部淬灭晶体管（GaAs增强型赝配高电子迁移率晶体管，GaAs Enhancement-mode Pseudomorphic High-Electron-Mobility Transistor, GaAs E-pHEMT）及其外围电阻电容等实现雪崩信号的提取、SPAD淬灭及淬灭状态保持，该部分电路与SPAD一起（图3深红色部分）位于真空腔内。以现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）为核心，结合运算放大器等部分外围电路实现SPAD淬灭后恢复控制，偏压、鉴别电平、死时间等参数的调整，以及雪崩信号的计时、计数和输出功能，这些电路（图3深蓝色部分）均位于真空腔体外。

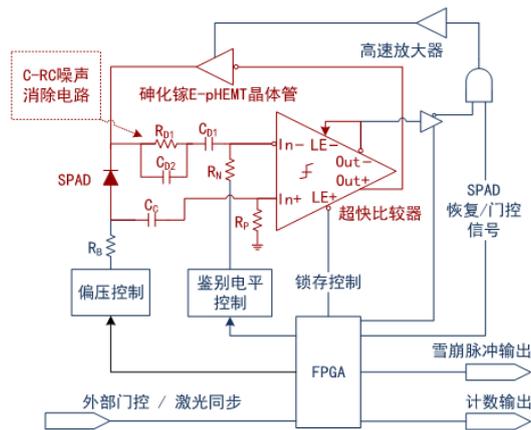


图3 低功耗高速主动淬灭电路设计图

Fig. 3 Schematics of low-power high-speed active quenching circuit

设计采用了深圳芯思杰的XSJ20C-5560-DSD型背照式SPAD，有效光敏面直径为 $50\ \mu\text{m}$ ，且芯片已安装在导热的陶瓷支架上，便于引线和向多级热电致冷片的冷面贴装，采用金线与腔内主动淬灭电路板键合。

主动淬灭电路的具体工作原理如下：SPAD阳极侧集成淬灭电阻后通过耦合电容 C_c 连接至比较器同相输入端；阴极通过由 C_{D1} 、 R_{D1} 和 C_{D2} 构成的C-RC平衡消噪网络连接至比较器反相端，用于消除SPAD恢复时电压突变导致的尖峰噪声。同时，反相端通过 R_N 连接至可变的鉴别电平。当雪崩信号被鉴别到时，比较器同相输出端反转驱动淬灭晶体管GaAs E-pHET输出翻转，降低阴极电压，SPAD雪崩淬灭；同时，比较器反相输出端反转，并通过锁存使能反相输入端（LE-）锁存该淬灭状态。雪崩淬灭的同时，与比较器输出缓冲器反相输出端相连的与门输入端反转，使与之相连的高速运算放大器输出在雪崩发生后 $2\ \text{ns}$ 内降至接近 $0\ \text{V}$ ，切断淬灭晶体管偏置，使其在淬灭保持期间无常态电流流过，以实现最低的功耗。雪崩淬灭后，FPGA通过LE+端解除比较器锁存状态，恢复其比较功能，并使淬灭晶体管恢复截止状态，但同时控制与门的另一输入端反转，即此时不恢复SPAD。等到设定的死时间过后，或门控“开”信号到达时，FPGA控制该信号恢复为高电平，从而恢复淬灭晶体管偏置，SPAD恢复工作。

探测器的主控FPGA除了实现上述淬灭和死时间控制等功能外，还集成了精度达 $48\ \text{ps}$ 的时间相关单光子计数（TCSPC）功能，并可实现直方图统计输出，在不显著增加功耗的情况下，极大地增加了探测器的实用性。

3 实验装置及测量方法

搭建了测试平台对单光子探测器进行了性能测试，包括单光子探测效率（ P_{de} ）、暗计数

率 (C_d) 和后脉冲概率 (P_{ap})。测试光源为PDL 800-B型半导体激光器, 波长为1550 nm, 脉冲激光的重复频率为19.5 kHz, 经衰减器衰减后由光纤准直器准直, 经10倍显微镜镜头汇聚至探测器感光面。在进行探测效率测量时, 由于窗口、镜头等均存在光衰减, 光耦合效率标定相对困难, 因此采用光敏芯片相同的XSJ20R-45EFP1-M型SPAD光纤耦合器件在相同电路驱动下进行探测效率和偏压关系的测量, 其数值作为本文中的深制冷器件在同偏压下的探测效率数值使用。测量光纤耦合型器件时, 调整衰减器使得每脉冲平均包含的光子数为0.1, 尽可能减少高计数率时死时间对探测效率测量的影响。性能参数测量使用了探测器主控FPGA内集成的时间相关单光子计数统计功能, 将其输出直接连接至计算机进行数据采集。

上述三个关键参数的计算公式^[12]如下: 考虑到死时间较长时对暗计数的影响, 暗计数率计算公式为

$$C_d = \frac{C_{dr}}{1 - \tau_d C_{dr}} \quad (1)$$

式中: τ_d 为死时间; C_{dr} 为无光照时FPGA内计数统计功能输出的每秒暗计数原始值。

探测效率为

$$P_{de} = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1 - \tau_w C_d}{1 - C_{ph}/f_L} \quad (2)$$

式中, μ 为每个入射光脉冲平均包含的光子数; τ_w 为统计光子计数时的时间窗口宽度; C_d 为暗计数率; C_{ph} 为光子计数率; f_L 为激光脉冲的重复频率。

死时间后的总后脉冲概率为

$$P_{ap} = \sum_{m=1}^n \frac{N(m) - N_d(m)}{N_i - N_{id}} \quad (3)$$

式中参数均来自时间相关单光子计数统计直方图, 其中 $N(m)$ 为有光照时死时间后第 m 个计数桶中的计数个数, $N_d(m)$ 为仅有同步信号但无光照时第 m 个计数桶中的暗计数个数, n 为死时间后光子计数统计桶的个数, N_i 为有光照时间范围(约1 ns)内的计数个数, N_{id} 为与统计 N_i 时有光照时间相同的时长内的暗计数个数。

4 实验结果及分析

探测性能方面, 实验首先测试了XSJ20R-45EFP1-M型多模光纤耦合的SPAD器件在自由运转模式下的性能参数。SPAD分别制冷到203 K和233 K, 探测器工作在自由运转模式, 死时间为100 ns时, 探测效率与过偏压的关系如图4所示。该SPAD在203 K的击穿电压约66.0 V。在过偏压为3 V、3.5 V、4 V、4.5 V、5 V、5.5 V和6 V时, 探测效率分别为8%、12%、15%、18%、20%、23%和26%。与Princeton Lightwave常见的PGA-300和北京润铭宇的PGA-314型SPAD相比, 其探测效率与过偏压之比偏小, 意味着其对淬灭电路的输出

电压动态范围要求更高：在过偏压 6 V 时，探测效率可达 26%，但由于电路中淬灭晶体管电压限制，无法进一步提高过偏压以测量探测效率变化。

在室温为 298 K 时，探测器最低可在制冷温度设置为 203 K 下稳定工作，为了更好地表征不同温度对探测器性能的影响，尤其是深制冷对探测器性能的影响，在同一测试环境下，测试了探测器在 203 K 和 233 K 环境下的暗计数率和总后脉冲概率分别如图 5 和图 6 所示。可以看出，在同一探测效率下，温度为 233 K 时的暗计数率是 203 K 时的 4 倍左右，因此通过深度制冷来降低器件探测时的噪声是十分有意义的。在 203 K 的条件下，当探测效率为 15% 以下时，短死时间使暗计数率上涨的程度较小。在探测效率为 12% 时，死时间为 100 ns 的数值与死时间为 10 μ s 的数值相比仅增加了 9.1% 左右；探测效率为 20% 时约为 38.2%。而在探测效率为 26% 时，暗计数率随死时间的降低迅速上升，这是由于在较短死时间内，后脉冲概率陡增，出现了大量由暗计数引发的后脉冲及次生高阶后脉冲。

实际应用中通常需将总后脉冲概率控制在 15% 以下，若要达到这个要求，探测器在 8%、15%、20%、26% 的探测效率下需要将死时间设置在 40 ns、200 ns、750 ns、2 μ s 即可，如图 6 所示。在 8% 的探测效率下，死时间为 40 ns 时，后脉冲概率为 11.7%；而当探测效率达到 20% 时，死时间为 750 ns 时，后脉冲概率为 14.7%，当死时间为 5 μ s 时，后脉冲概率为 4.9%。

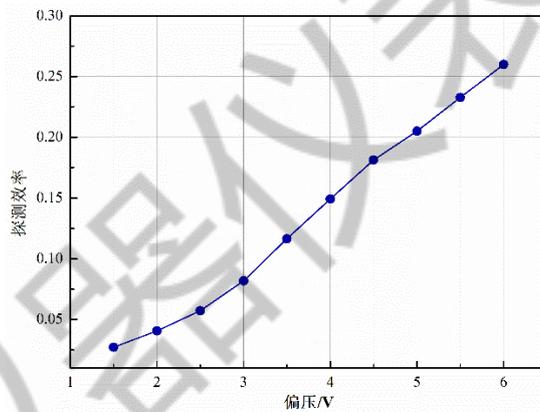


图4 探测效率随过偏压的变化曲线

Fig. 4 Detection efficiency (Pde) as a function of excess bias

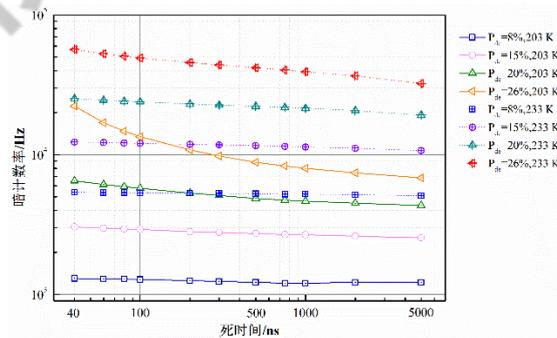


图5 暗计数率在不同温度和不同探测效率下随死时间的变化

Fig. 5 Dark count rate as a function of dead time at different temperature and detection efficiency

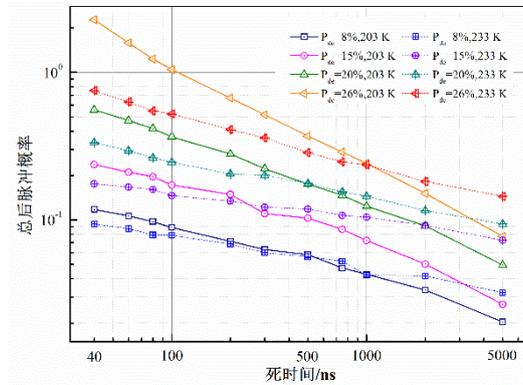


图6 总后脉冲概率在不同温度和不同探测效率下随死时间的变化

Fig. 6 Total afterpulse probability as a function of dead time at different temperature and detection efficiency

总体看来,在同一探测效率下,后脉冲概率随温度的升高而降低,暗计数率随温度的升高迅速增加。由于光敏面达到 $50\ \mu\text{m}$ 的SPAD与常用于量子通信的 $10\ \mu\text{m}$ 至 $25\ \mu\text{m}$ 器件相比在同温度时的暗计数大,制冷至203K时的暗计数率与小光敏面器件在243 K时的结果相近。在203 K的环境下,短死时间内的后脉冲概率也很低,实际应用于激光雷达等系统时,可根据环境背景噪声光子数对制冷温度和探测效率进行调整,以获得最佳的信噪比。

5 结论

本文针对 InGaAs 单光子探测器小型化、低噪声、大光敏面、低成本的应用需求,研制了基于国产 SPAD 的大光敏面近红外单光子探测器。针对大光敏面易产生大暗计数的问题,通过低功耗高速主动淬灭电路设计,结合深制冷密封腔体设计,实现了稳定工作。同时,对集成多级热电制冷片和高速淬灭电路自身高功耗、发热量较大的特点设计了散热方案。所研制的探测器最大可用探测效率约为 26%,最低制冷温度为 201 K;在 203 K 下可以稳定工作,此时当探测效率为 8%、最短死时间 40 ns 时,后脉冲概率为 11.7%,暗计数率为 1.3 kHz。203 K 时的暗计数率与小光敏面器件在 243 K 时的结果相近。综上所述,探测器的综合性能较为优异,可以在深制冷条件下稳定工作,非常适用于对大光敏面、低暗计数和低死时间同时具有苛刻要求的激光雷达等系统应用。

参考文献:

- [1]Korzh B, Walenta N, Lunghi T, *et al.* Free-running InGaAs single photon detector with 1 dark count per second at 10% efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104, 081108.
- [2]刘俊良. 基于 InGaAs(P)/In(P) APD 的单光子探测器的研制和性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018:12-26.
- [3]尤立星,张腊宝,史生才,等.高性能单光子探测技术研究进展[J].中国基础科学, 2020, 22(01): 25-29.
- [4]NIR(Near Infrared: 1.4 μm /1.7 μm) photomultiplier tubes R5509-43/R5509-73 and exclusive coolers.
https://www.hamamatsu.com.cn/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R5509-43_-73_TPMH1360E.pdf
- [5]Ma F, Zheng M Y, Yao Q, *et al.* 1.064- μm -band up-conversion single-photon detector [J]. Optics Express, 2017, 25: 14558-14564.
- [6]Reddy DV, Nerem RR, Nam SW, *et al.* Superconducting nanowire single-photon detectors with 98% system detection efficiency at 1550 nm [J]. Optica, 2020, 7: 1649-1653.
- [7]Signorelli F, Telesca F, Conca, E, *et al.* Low-Noise InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diodes for Fiber-Based and Free-Space Applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(2): 1-10.
- [8]Wen W, Shan X, Long Y Q, *et al.* Free-Running Single-Photon Detection via GHz Gated InGaAs/InP APD for High Time Resolution and Count Rate up to 500 Mcount/s [J]. Micromachines, 2023, 14(2): 437.
- [9]Li B, Niu Y X, Feng Y D, *et al.* Ultra-low dark count InGaAs/InP single photon avalanche diode [J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18, 647–650.
- [10]Liang Y, Fei Q L, Liu Z H, *et al.* Low-noise InGaAs/InP single-photon detector with widely tunable repetition rates [J]. Photonics Research, 2019, 7: A1-A6.
- [11]Wen J, Wang W J, Chen X R, *et al.* Origin of large dark current increase in InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123: 161530.
- [12]董亚魁,刘俊良,孙林山,等.基于 InGaAs NFAD 的集成型低噪声近红外单光子探测器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 20220907.