

集成型快速主动淬灭 InGaAsP 近红外单光子探测器

刘俊良^{1,2,3}, 许伊宁¹, 董亚魁^{1,2}, 李永富^{1,2*}, 刘兆军^{1,3**}, 赵显^{1,2***}¹ 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;² 山东大学光学高等研究中心, 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 针对 1.06 μm 单光子探测应用, 研制了基于 InGaAsP/InP 单光子雪崩二极管 (SPAD) 的集成型快速主动淬灭近红外单光子探测器。在制冷封装中集成关键淬灭元件并优化 SPAD 驱动电路, 使得所研制的探测器具有极短的淬灭延迟, 同时实现了较低的功耗和紧凑的设计。探测器具有良好的综合性能, 在 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 、10% 探测效率、100 ns 死时间条件下, 后脉冲概率约为 10%, 暗计数率约为 1 kHz; 最短死时间低至 50 ns, 最大可用探测效率达 30%。所研制的探测器采用 105 μm /125 μm 多模光纤耦合, 尺寸仅为 63 mm \times 54 mm \times 44 mm, 且集成了门控、参数控制和时间相关单光子计数等功能, 适用于体积受限的单元和多波束激光雷达系统。

关键词 量子光学; 单光子探测器; 单光子雪崩二极管; 主动淬灭; 后脉冲; 近红外

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1212002

1 引言

相比于超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)^[1-2]、上转换单光子探测器^[3]等, 基于 InGaAs(P)/InP 单光子雪崩二极管 (SPAD) 的近红外单光子探测器具有小体积、低功耗、低成本等综合优势, 在光子计数激光测距^[4-5]、远距离单光子三维成像^[6-7]、量子信息^[8-9]等领域得到了广泛应用。

随着科技的发展, InGaAs(P)/InP SPAD 基单光子探测器的关键性能 (如暗计数率、探测效率、死时间等) 不断提升。日内瓦大学通过深度制冷 (制冷温度为 163 K), 将基于负反馈雪崩光电二极管 (NFAD) 的自由运转式近红外单光子探测器的暗计数率降至 1 Hz^[10]; 东芝欧洲研究院通过将门控的深度提高至 18 V (峰-峰值), 1 GHz 门控式单光子探测器的最高探测效率被提升至 55%^[11]; 中国科学技术大学与中国电子科技集团第 44 所联合, 通过优化器件结构, 将 1.25 GHz 门控式近红外单光子探测器的最高探测效率提升至 60%^[12]; 山东大学则通

过高速主动淬灭电路的优化以及关键部件的集成, 有效降低了自由运转式近红外单光子探测器的后脉冲概率, 并将其死时间降至 35 ns^[13]。

在实际工程应用中, 在保证单光子探测器关键性能的前提下, 为了满足无人平台等体积受限系统的集成化应用需求, 器件的微型化一直是研究者追求的目标。中国科学技术大学早在 2012 年就已经成功研制了体积为 250 mm \times 100 mm \times 330 mm 的小型正弦门控式近红外单光子探测器^[14], 并将其应用于高速量子密钥分发应用系统^[9]中, 其中探测器的体积占比达 60%^[15]。为了提高系统的集成度, 2018 年中国科学技术大学通过 SPAD 芯片的集成制冷与单片集成读出电路, 将探测器体积缩小至 130 mm \times 80 mm \times 40 mm^[15], 这是当时国际最小的高速正弦门控式近红外单光子探测器; 同年, 研究者采用 NFAD 器件, 通过驱动电路的优化, 成功研制了体积为 100 mm \times 150 mm \times 60 mm 的自由运转式近红外单光子探测器^[16]。2020 年, 瑞士 ID Quantique 公司连续推出了体积为 95 mm \times 95 mm \times

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (62075116)

* E-mail: yfli@sdu.edu.cn; ** E-mail: zhaojunliu@sdu.edu.cn; *** E-mail: zhaoxian@sdu.edu.cn

95 mm 的门控式及自由运转式近红外单光子探测器模块^[17]。

本文基于高速主动淬灭技术^[13,18],结合关键器件的集成化,成功研制了 63 mm × 54 mm × 44 mm 微型近红外单光子探测器模块,其体积是目前同类探测器中最小的。探测器具有低至 50 ns 的最短死时间,且兼容门控和自由运转模式,其典型性能如下:在 1.06 μm 处的最大探测效率为 30%,在 10%探测效率、100 ns 死时间条件下后脉冲概率约为 10%,暗计数约为 1 kHz。探测器采用 105 μm / 125 μm 多模光纤耦合,降低了光耦合难度。该探测器适用于对空间要求严格的紧凑型 1.06 μm 激光雷达系统。

2 微型单光子探测器设计

探测器采用 Princeton Lightwave 的 PGA-284 型 InGaAsP/InP SPAD。SPAD 受主动淬灭主动恢复电路控制,如图 1 所示。SPAD 阳极通过限流电阻 R_L 与可编程高精度低噪声负偏压电源相连。同时,SPAD 阳极还通过耦合电容 C_c 与高速比较器 CMP1 的同相输入端(In+)连接;CMP1 反相输入端(In-)通过电阻 R_{in} 连接至可编程的鉴别电平,实现了雪崩电流的鉴别。当检测到雪崩电流时,CMP1 的同相输出端(Out+)电压由低变高,该阶跃信号被 GaAs 增强型匹配高电子迁移率晶体管(E-pHEMT)放大器反相放大,SPAD 的阴极电压降低,雪崩淬灭。CMP1 的反相输出端(Out-)连接至锁存使能反相端(LE-),在雪崩到来时该输出端将锁存使能反相端电压拉低,CMP1 输出被锁定,实现了淬灭状态的保持。

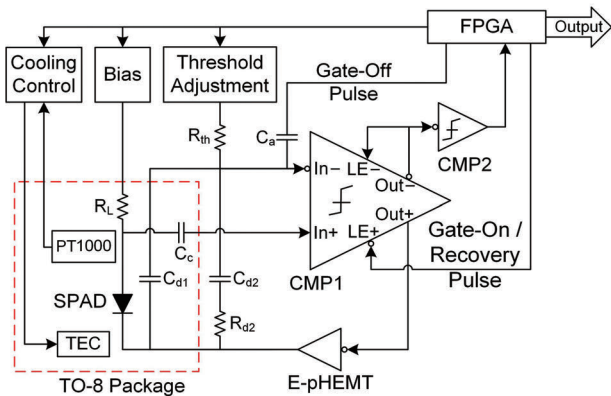


图 1 探测器设计原理图

Fig. 1 Schematic of detector design

同时,CMP1 的反相输出经另一个高速比较器 CMP2 缓冲后,被送至现场可编程门阵列(FPGA)

中用于时间相关单光子计数和死时间定时,死时间可调范围为 25 ns~300 μs。当死时间过后,FPGA 产生一个负向脉冲,暂时降低 CMP1 的锁存使能同相端(LE+)的电压,使 CMP1 的锁存得以解除;由于此时没有雪崩脉冲,CMP1 输出翻转,SPAD 的过偏压得以恢复。此外,比较器的反相输入端还通过 C_a 电容耦合连接了 FPGA 产生的伪雪崩脉冲信号,该信号可以触发淬灭过程,使 SPAD 停止单光子探测,但不产生计数。这一主动触发淬灭的功能与主动恢复功能相结合即可实现该探测器的门控模式运转。

在恢复 SPAD 探测时,SPAD 阴极的恢复阶跃信号会通过 SPAD 结电容耦合产生尖峰脉冲,该脉冲与 SPAD 产生的雪崩脉冲相似,称为尖峰脉冲噪声。常见的电容平衡降噪方法^[8,13,18]通过设置一个与 SPAD 结电容大小相同的平衡电容 C_{d1} ,比较器的同相和反相端存在的相同的尖峰脉冲噪声信号相互抵消。相对于 PGA-284 原来的非集成制冷封装管壳,一般 SPAD 的集成制冷封装体积大,内部引线长,分布参数大。主动淬灭电路对引线和分布参数十分敏感;较长的引线会引入外界电磁干扰,分布电感和引线自身的长度会引入较长的淬灭延迟,并使尖峰脉冲噪声的消除变得困难。

为了保证平衡电路的效果,设计了主动淬灭专用集成制冷封装,其内部结构如图 2 所示。将装有 SPAD 的陶瓷支架固定在两级热电致冷片(TEC)上,使用铂电阻 PT1000 测温。将限流电阻 R_L 、耦合电容 C_c 、平衡电容 C_{d1} 等元件安装在一个小电路板上,并与 SPAD 一起被封装在集成制冷封装的 TO-8 管壳内,使 SPAD 线路和平衡电容线路共享相似的电磁环境和分布参数,并将雪崩信号及平衡电容输出信号作为一对差分信号进行处理,使得这一对长引线上接收到的噪声尽可能接近,在比较器处作为共模信号可被消除。

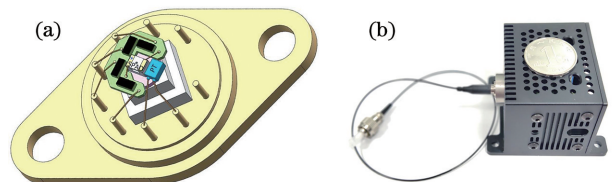


图 2 集成平衡电容和制冷的 SPAD 封装。(a)内部结构; (b)微型探测器实物图

Fig. 2 SPAD assembly with integrated cooling and balancing capacitor. (a) Internal structure; (b) physical picture of micro SPD

为了进一步提高性能和稳定性,在集成制冷封装的前提下,比较器的鉴别电平被降至极限且能稳定工作,并在平衡电容降噪电路的基础上,增加了串联的电阻 R_{d2} 和电容 C_{d2} ,与原平衡电容 C_{d1} 并联,成为 C-RC 过平衡电路,如图 1 所示。当 SPAD 恢复时,该电路使得到达 CMP1 反相输入端的尖峰脉冲的幅度和时长略微增加,相当于动态地、短暂地提高了鉴别电平。虽然该方法会使最小死时间略微增大,所设计的探测器最短死时间从 25 ns 上升至 50 ns,但整个电路对尖峰脉冲噪声残余的容限得到大幅提高。经过上述设计优化,雪崩的鉴别电平最低可降至 2.4 mV,接近所用比较器的内建迟滞的极限值(± 1 mV);淬灭延迟降至 400 ps,雪崩脉冲的半峰全宽(FWHM)仅为 250 ps 左右。

为了在不牺牲性能和功能的前提下实现最小的探测器体积,设计了多片层叠的电路板,包括纹波小于 1 mV 的超低噪声负高压产生电路、基于级联开关电源和低压差线性稳压器的高效率低噪声热电致冷片控制电路、基于 FPGA 的主控电路以及前述核心淬灭电路。上述电路的尺寸均不超过 33 mm \times 40 mm,共计堆叠四层,最终探测器的整体尺寸为 63 mm \times 54 mm \times 44 mm,如图 2 所示。其中,核心淬灭电路的尺寸不足 20 mm \times 20 mm,且为异形电路,这使得 SPAD 的管壳与具有导热结构的外壳有最大的接触面积,保证了良好的散热性能。

所设计的探测器在室温且散热良好的条件下,最低制冷温度可达 -35 $^{\circ}\text{C}$ 。基于 FPGA 的主控电路实现了基于异步串行通信(UART)的死时间、温度、鉴别电平和偏压等控制,还可产生或接收门控信号并对其进行延时。此外,FPGA 内部还集成了门控计数器和精度高达 36 ps、死时间仅为 3.75 ns 的时间数字转换器,使探测器可以通过低电压差分信号(LVDS)电平串行输出时间相关单光子计数数据。此外,还将 105 μm 芯径的多模光纤耦合至有效直径为 80 μm 的感光面上,使空间光与该模块的耦合更容易,提高了模块的实用性。

3 实验装置及测量方法

搭建的单光子探测器的探测性能测试平台如图 3 所示。测试光源为 PDL 800-B 型半导体脉冲激光器,波长为 1060 nm,脉冲激光的重复频率为 39 kHz,将其电同步信号(Sync)连接至 quTAG 型时间相关单光子计数器(TCSPC)并用作开始信号。激光脉冲经过分光(功率)比为 1 : 99 的光纤分束

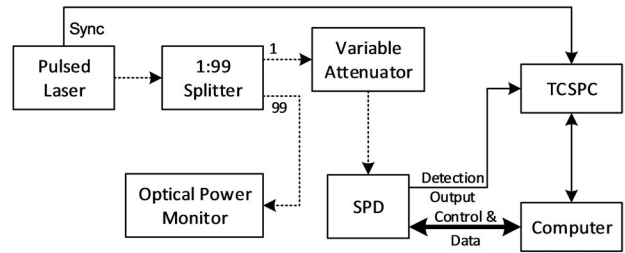


图 3 单光子探测器的性能测试系统

Fig. 3 System for performance test of single-photon detector

器,光功率百分比为 1% 的一路进入可调衰减器 FVA-3150,并输入至待测单光子探测器(SPD);光功率百分比为 99% 的一路接入光功率计 PM-1613,对光源进行监控以保持入射光子数的稳定。在进行探测效率测量时,调整衰减器,使得每脉冲平均包含的光子数为 0.1,避免了死时间对探测效率测量的影响;在进行后脉冲测量时,调整衰减器,使每脉冲平均包含的光子数为 1,提高了测量准确性。测试使用了探测器的雪崩脉冲输出,即将其连接至时间相关单光子计数器作为停止信号,并进行数据采集。整个测试过程在暗室内进行,并由计算机软件自动控制 and 采集数据。

实验主要对探测器的暗计数率、探测效率和总后脉冲概率进行测量。在考虑死时间的情况下,经补偿后暗计数率(C_d)为

$$C_d = \frac{C_{dr}}{1 - \tau_{ho} C_{dr}}, \quad (1)$$

式中: τ_{ho} 为死时间; C_{dr} 为原始暗计数率。

探测器的探测效率(P_{de})为

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

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。

探测器的总后脉冲概率定义为一个脉冲可引发的所有后脉冲计数,因此可以小于 1 也可以大于 1。在使用时间相关单光子计数法进行测量时,通过统计计数事件发生的时间,从统计得到的柱状图中容易区分光子计数和非光子计数,继而可获得光子探测事件后不同时刻 t 时发生后脉冲的概率密度(P_{ap})为

$$P_{ap}(t) = \frac{1}{\tau_b} \times \frac{C_{ni}(t) - C_d(t)}{C_i - C_{id}}, \quad (3)$$

式中: τ_b 为统计柱状图每柱的时间长度; C_i 为有光门内的光子计数率; $C_{ni}(t)$ 为时刻 t 处的非光子计

数率; C_{id} 为有光门内的暗计数率; $C_d(t)$ 为时刻 t 处的暗计数率, 暗计数率通过关闭光源测量得出。由于测量也是在自由运转模式下, 仅需对(3)式进行积分即可得到自由运转模式下的总后脉冲概率。一个典型的时间相关单光子计数统计柱状图如图 4 所示, 该柱状图是基于死时间为 120 ns 时采集的 100 s 计数数据获得的, 每个柱的宽度(即时长)为 36 ps。为了便于观察, 将时间轴坐标进行了平移, 并使用了对数形式。如图 4 所示, 可以明显看出, 计数率较大的峰值即光计数峰, 光计数存在的范围(即“有光门”)约为 26 个柱宽, 即圆点虚线圈出的部分, 该部分内所有计数柱之和即为 C_i 。由关闭光源条件下采集的数据得出, 平均每柱有 1.82 个计数, 该平均值即可用作 $C_d(t)$, 如图 4 中短横虚线所示; 而 $C_{id} = 1.82 \times 26 = 47.32$, 即为“有光门”内 26 个柱的暗计数总和。最后, 可以明显看到 120 ns 后的后脉冲计数, 根据(3)式对 120 ns 后各柱内的计数值进行计算, 即可得出后脉冲概率密度, 累加即可获得总后脉冲概率。

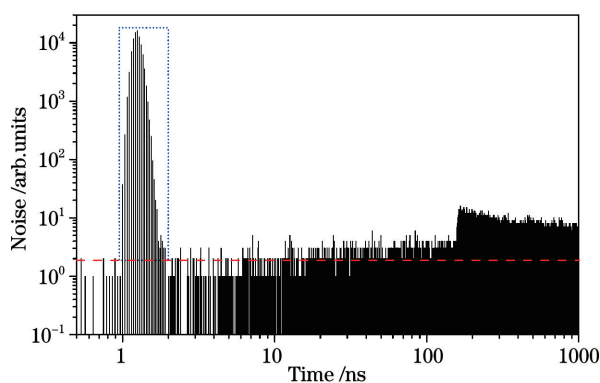


图 4 典型的时间相关单光子计数柱状图

Fig. 4 Typical histogram of time-correlated single-photon counting

4 实验结果及分析

设计的探测器在室温下的制冷温度最低可达 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 考虑到实际使用环境, 实验分别测试了探测器在 $-10, -20, -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下的性能。在良好的散热条件下, 探测器在三个温度条件下可保持正常稳定运转, 实测总功耗分别为 4.0, 4.8, 5.4 W, 其中不含 TEC 制冷的电路的功率约为 2.6 W。

探测效率和时间抖动的测量结果如图 5 所示。当波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$, 探测效率分别为 10%, 15%, 20%, 25% 和 30% 时, 对应的过偏压分别为 1.75, 2.35, 2.95, 3.65, 4.45 V, 对应的时间抖动(半峰

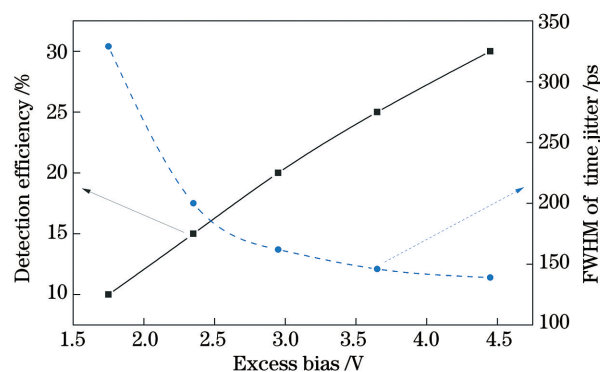


图 5 探测效率和时间抖动半峰全宽值随偏压的变化

Fig. 5 Detection efficiency and FWHM of time jitter versus excess bias

全宽值)分别为 329, 200, 162, 146, 139 ps。这里的时间抖动主要来源于激光脉宽、SPAD 雪崩电流、比较器 1、比较器 2、输出电平转换逻辑以及时间相关计数器, 而最终的测量结果是上述时间抖动的均方根。测试所用的激光脉冲半峰全宽为 44 ps, 比较器 1、比较器 2、输出电平转换逻辑、时间相关单光子计数器标称的时间抖动分别为 2.3, 10, 35, 10 ps。其中, 激光脉冲半峰全宽和时间相关单光子计数器的贡献已从测量结果中扣除。从图 5 的测量结果可以看出, 最终系统的时间抖动远大于主要电路元件的时间抖动。因此, 探测器时间抖动的主要来源为 SPAD 本身, 该时间抖动即为从光子入射至 SPAD 开始, 到 SPAD 雪崩电流上升至比较器鉴别电平的时间不确定性。对于自由运转式的探测器, 该性能的优化依赖于 SPAD 器件结构和工艺的优化、过偏压的提高以及鉴别电平的降低^[19]。由上文淬灭电路设计部分的内容可知, 比较器的鉴别电平已降至接近所用比较器的内建迟滞的极限, 没有更多的优化空间。因此, 对于时间抖动要求较高的系统, 在较高的过偏压下使用该探测器可以获得较小的时间抖动。

实验测试了 $-10, -20, -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的暗计数率, 如图 6(左)所示。此处设置的死时间为 $1\text{ }\mu\text{s}$, 可避免暗计数率测量中引入的大量后脉冲的影响, 而后脉冲对暗计数率测量的影响将在下文中结合图 6(右)进行分析。当温度为 $-10, -20, -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 暗计数率分别从 10% 探测效率时的 3.6, 1.8, 0.9 kHz 上升至 30% 探测效率时的 32, 16, 9.2 kHz, 即温度每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 暗计数率约增大一倍。探测器所使用的 InGaAsP/InP SPAD 器件的暗计数主要来源于陷阱辅助隧穿(TAT)载流子、热

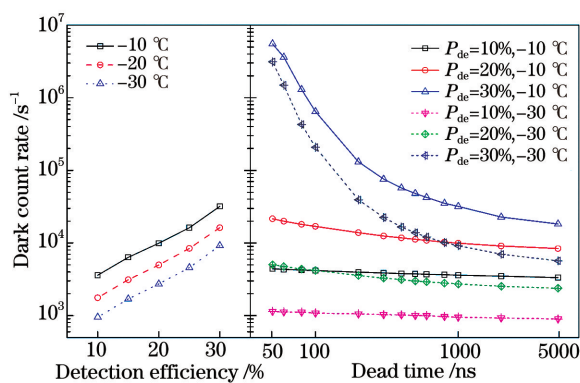


图 6 暗计数率(左)在不同温度下随探测效率的变化及(右)在不同探测效率和温度下随死时间的变化

Fig. 6 Dark count rate (left) versus detection efficiency at different temperatures and (right) versus dead time at different detection efficiencies and temperatures

生载流子以及暗计数引发的后脉冲^[19-20]。热生载流子主要在吸收层产生,其引发雪崩电流的机理与光子引发雪崩电流的机理相同,因此热生载流子引发的暗计数随探测效率的增加线性增加。然而,TAT载流子会随偏压的升高而急剧增大,呈指数增长的趋势。与更常见的InGaAs吸收层相比,针对1064 nm波长光子探测,优化的InGaAsP吸收层的禁带宽度更大,热生载流子相对较少,故即使在温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、器件有效探测直径为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下,暗计数率仍保持在较低水平。当室温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,过偏压为 4 V 以上时,TAT载流子开始在暗计数中占主导;当制冷温度为 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$,过偏压为 0.2 V 以上时,InP倍增层的TAT载流子量比InGaAsP吸收层的热生载流子量高一个数量级以上,TAT载流子引发的雪崩脉冲是该器件暗计数的主要来源^[20]。对于温度为 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、探测效率为 $10\%\sim 30\%$ 的工作区间,从图6(左)可以明显看出,暗计数率随着探测效率的增加基本呈指数增长而非线性增长,因此TAT效应仍是该区间暗计数的主要来源。此外,当探测效率为 30% 时,暗计数率的上升幅度甚至高于指数增长幅度,这是由于除两种载流子引发的暗计数外,探测效率为 30% 时暗计数包含了更多后脉冲。

温度分别为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,探测效率分别为 10% 、 20% 和 30% 时,暗计数率随死时间的变化曲线如图6(右)所示,可以看出,暗计数率随死时间的缩短而增加。由于计算时已经考虑了死时间的影响,死时间较短时增加的暗计数均为后脉冲的贡献。当探测效率为 30% 时,死时间较短时的后脉冲概率

暴增,且 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的增长速度比 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的快,逐渐逼近 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的结果,且死时间为 50 ns 时探测器的计数率已趋于饱和。当探测效率为 10% 时,暗计数率的上涨幅度较小,死时间为 50 ns 时的数值与死时间为 $5\text{ }\mu\text{s}$ 时的数值相比仅增加 30% 左右;当探测效率为 20% 时,暗计数率增大一倍。上述结果表明,在仅考虑暗计数率且所需探测效率不大于 20% 的情况下,探测器的死时间可低至 50 ns 。

实验测量了探测器在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度时不同探测效率下的总后脉冲概率随死时间的变化,如图7所示。总体来看,对于追求高探测效率的情形, $1\text{ }\mu\text{s}$ 以上的死时间是必要的,尤其是当探测效率为 30% 时, $2\text{ }\mu\text{s}$ 的死时间下才能获得 $15\%\sim 20\%$ 的后脉冲概率,这一结果与死时间为 50 ns 且探测效率为 10% 时的相近。但当探测效率为 10% 时,最短死时间为 50 ns 下的后脉冲概率约为 15% ,最短死时间为 100 ns 下的后脉冲概率约为 10% 。如果后脉冲效应可通过算法修正,则该模块在低于 100 ns 死时间下的探测能力尤其适用于激光雷达。由于探测效率和死时间均可实时调整,实际应用时可根据探测目标情况灵活设定。

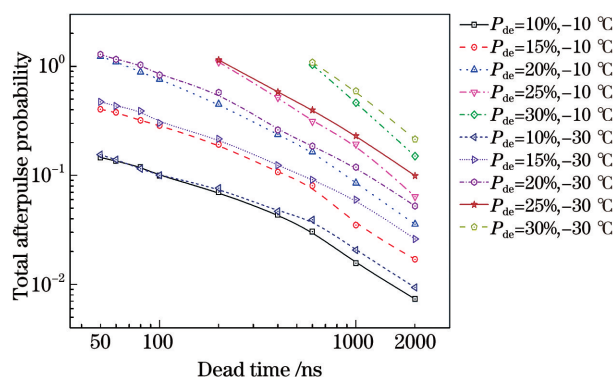


图 7 不同温度和不同探测效率下总后脉冲概率随死时间的变化

Fig. 7 Total afterpulse probability versus dead time at different temperatures and detection efficiencies

提高制冷温度有利于后脉冲概率的降低,特别是在死时间较长时,效果特别明显,但随着死时间的缩短,温度导致的后脉冲概率差异开始逐渐缩小。因此,在需要短死时间的应用中,应关注暗计数和后脉冲的共同影响,根据暗计数和后脉冲在总噪声计数中的比例及实际的环境温度,选择合适的制冷温度。对于一般的探测器,相对较高的暗计数率及其引发的死时间,使得探测器处于可探测状态的时间减少,尤其是在探测效率较高时,该问题会更加明显,实际的探测效率下降。然

而,对于本文中所研制的探测器,其在探测效率为 10% 时的最短可用死时间低至 50 ns,即使 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度时的暗计数率是 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 4 倍,计数率也

远远不会饱和。

综上所述,该探测器具有良好的综合性能,其关键指标总结于表 1 中。

表 1 所研制的单光子探测器的主要性能指标

Table 1 Main performance specifications of developed single-photon detector

Detection efficiency / %	FWHM of time jitter / ps	Dark count rate at dead time of 1 μs /kHz			Total afterpulse probability / %	
		$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	100 ns	1 μs
10	329	3.6	1.8	0.9	~10	~2
20	162	9.9	5.0	2.7	~80	~10
30	139	31.9	16.2	7.5		~50

5 结 论

采用低延迟主动淬灭及集成制冷和关键元件的方法,设计了短死时间、低后脉冲概率的微型近红外单光子探测器。通过对电路结构和鉴别电平进行优化,实现了紧凑的设计和极短的淬灭延迟,获得了较好的综合性能。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度、10% 探测效率条件下,所设计的探测器的死时间为 50 ns 和 100 ns 时的后脉冲概率分别约为 15% 和 10%,暗计数率约为 1 kHz,最大可用探测效率达 30%。探测器采用 $105\text{ }\mu\text{m}/125\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤耦合,体积不足同类探测器的一半,在环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、制冷温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且散热良好的条件下,电路和 TEC 制冷的总功耗约为 6 W,且集成了门控、参数控制和时间相关单光子计数等功能。所研制的探测器适用于系统体积受限环境下的单点和多波束激光雷达系统。

参 考 文 献

- [1] Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency [J]. Nature Photonics, 2013, 7(3): 210-214.
- [2] Zhou H, Zhang C J, Lü C L, et al. Recent progress of imaging applications based on superconducting nanowire single-photon detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011007. 周慧, 张成俊, 吕超林, 等. 基于超导纳米线单光子探测(SNSPD)技术的成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011007.
- [3] Shentu G L, Pelc J S, Wang X D, et al. Ultralow noise up-conversion detector and spectrometer for the telecom band [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 13986-13991.
- [4] Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1104003. 丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验 [J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003.
- [5] Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011006. 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011006.
- [6] Lin J X, Hu C Y, Wang P W, et al. Improvement of photon-counting correlated imaging quality by multi-channel parallel detection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0511001. 林俊秀, 胡晨昱, 王鹏威, 等. 多路并行探测提高光子计数关联成像质量研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511001.
- [7] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km [J]. Photonics Research, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [8] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(5): e286.
- [9] Mao Y Q, Wang B X, Zhao C X, et al. Integrating quantum key distribution with classical communications in backbone fiber network [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 6010-6020.
- [10] 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(8): 081108.
- [11] 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.
- [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] Liu J L, Xu Y N, Li Y F, et al. Ultra-low dead time free-running InGaAsP single-photon detector with active quenching [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(13): 1184-1189.
- [14] Liang X L, Liu J H, Wang Q, et al. Fully integrated InGaAs/InP single-photon detector module with gigahertz sine wave gating [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(8): 083111.
- [15] Jiang W H, Gao X J, Fang Y Q, et al. Miniaturized high-frequency sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(12): 123104.
- [16] Yu C, Qiu J W, Xia H Y, et al. Compact and lightweight 1.5 μm lidar with a multi-mode fiber coupling free-running InGaAs/InP single-photon detector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 103106.
- [17] IDQ. From single components to fully integrated solutions, IDQ offers a wide range of products [EB/OL]. [2021-02-25]. <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/products>.
- [18] Liu J L, Xu Y N, Wang Z, et al. Reducing afterpulsing in InGaAs (P) single-photon detectors with hybrid quenching [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4384.
- [19] Itzler M A, Jiang X D, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(3/4): 174-200.
- [20] Jiang X D, Itzler M A, Ben-Michael R, et al. InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 895-905.

Integrated InGaAsP Near-Infrared Single-Photon Detector with Fast Active Quenching

Liu Junliang^{1,2,3}, Xu Yining¹, Dong Yakui^{1,2}, Li Yongfu^{1,2*}, Liu Zhaojun^{1,3**}, Zhao Xian^{1,2***}

¹Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266237, China;

²Center for Optics Research and Engineering (CORE), Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

³School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract

Objective Compared with single-photon detectors (SPDs) based on superconducting nanowires or photon up-conversion, SPDs based on InGaAs(P)/InP single-photon avalanche diodes (SPADs) have shown advantages such as small size, low power consumption, and low cost. Therefore, they have been widely used in the fields of lidar, three-dimensional imaging, quantum information, etc. With the development of applications, the overall performance of InP-based SPDs has been gradually improved these years. However, striking a balance among detection efficiency, dark count rate, afterpulse probability, and dead time is still challenging. High afterpulse probability is found to be a bottleneck of the performance for InP-based free-running SPDs, and the dead time has to be set to a large value to suppress the severe after-pulsing effects. Besides, the requirement of compact SPDs for the use in unmanned platforms, vehicles and integrated systems is increasing. However, the integration of SPADs is often accompanied with a degradation in some of the performance specifications or parameter adjustment flexibility. In this contribution, an integrated SPD based on InGaAsP/InP SPAD with fast active quenching was developed for 1.06 μm , size-limited, and low-dead-time applications.

Methods A fast active-quenching circuit was proposed to cease the avalanche current of the SPAD quickly and actively, in order to reduce the number of avalanche carriers, and consequently the afterpulse probability. The circuit is essentially composed of only an ultra-high-speed Si-Ge comparator and a GaAs enhancement-mode pseudomorphic high electron mobility transistor within the feedback loop. The latch-enable function of the high-speed comparator acts as the hold-off logic, and hence the delay of the feed-back loop is minimized. An improved C-RC network is used to cancel the noise introduced by the quenching signal. By integrating the critical balancing capacitor in the C-RC network into the package of the SPAD, the discrimination threshold of the comparator can be set as low as 2.4 mV. With all the efforts above, the quenching delay is minimized, and hence the full width at half-maximum

of the avalanche current was only approximately 250 ps. In addition, the detector has integrated a negative-high voltage generation circuit, a thermo-electric cooler control circuit, an FPGA-based logic control circuit. All the printed circuit boards of the above circuits were smaller than 33 mm × 40 mm, and were stacked to achieve a small size. With the optimization of the quenching circuits and the integration of the thermal-electric cooler, the detector has achieved high performance, compact size, and low power consumption at the same time. It has a compact size of only 63 mm × 54 mm × 44 mm, with 105 μm / 125 μm pig-tailed multi-mode fiber for easy coupling, and has embedded gating, parameter control, and time-correlated single photon counting (TCSPC) features. Besides, a TCSPC system was built for performance evaluation of the proposed detector, including dark count rate, detection efficiency, total afterpulse probability, and time jitter.

Results and Discussions The proposed detector has good overall performance. The single-photon detection efficiency reached 30%, and the time jitter (FWHM) was 329, 200, 162, 146, and 139 ps at the detection efficiencies of 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%, respectively. As the discrimination threshold was close to the limit of the comparator, a lower time jitter can only be achieved by increasing the excess bias. The dark-count rate was generally low at -30 °C: the values at the detection efficiencies of 10%, 20%, and 30% were 0.9, 2.7, 7.5 kHz, respectively. The dark count rate was approximately doubled with every 10 °C increment of temperature. With the increase of the photon detection efficiency, the dark count rate rose exponentially, mainly contributed by trap-assisted tunneling at the InP multiplication layer in the SPAD. The dark counts increased even more quickly at lower dead time due to higher afterpulse probability. Most importantly, the minimum dead time of the detector was as low as 50 ns. At the temperature of -30 °C, the detection efficiency of 10%, and the dead time of 50 ns and 100 ns, the total afterpulse probability was measured to be approximately 15% and 10%, respectively. Such low dead time and low afterpulse probability at the detection efficiency of 10% enable its future use in practical lidar systems. As for the condition of the detection efficiency higher than 20%, the dead time was set above 1 μs to achieve sufficiently low afterpulse probability. For example, the afterpulse probability was 15%–20% at the detection efficiency of 30%, dead time of 2 μs. Higher cooling temperature could reduce the afterpulse probability at the cost of higher dark count rate. Besides, the detectors have demonstrated low power consumption. The total power consumption was 4.0, 4.8, and 5.4 W when cooling to -10, -20, -30 °C, respectively, where 2.6 W was contributed by the circuits excluding the cooling part.

Conclusions In this paper, an integrated InGaAsP SPD for 1.06 μm was presented. With the optimization of the quenching circuits and the integration of the thermal-electric cooler and key components for quenching, the detector has achieved ultra-low quenching delay, compact size, and low power consumption at the same time. The minimum dead time was as low as 50 ns, where the dark-count rate and afterpulse probability were approximately 1 kHz and 15%, respectively, at the photon detection efficiency of 10% and the temperature of -30 °C. The detector has 105 μm / 125 μm multi-mode fiber coupling and a compact size of only 63 mm × 54 mm × 44 mm. The low dead time, small size and easy-to-use features are making the detector especially suitable for use in size-limited single-spot and multi-beam lidar.

Key words quantum optics; single-photon detector; single-photon avalanche diode; active quenching; afterpulse; near infrared

OCIS codes 270.5570; 040.1345; 030.5260; 040.5570