

硅单光子探测器研制及其在高精度星地时间比对中应用 (特邀)

刘巧莉, 刘 畅, 王艺潼, 郝凌翔, 黄永清, 胡安琪, 郭 霞*

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 高精密度时频比对是实现全社会信息化系统高精度的时空一致性和时频稳定性的关键技术, 为国民经济发展的关键领域提供统一的时间保障。硅单光子探测器凭借其高探测效率、低噪声、低时间抖动、易于集成等优势, 成为高精度星地时间比对系统中的关键核心芯片。文中分析了硅单光子探测器探测效率、暗计数和时间抖动之间的相互制约关系, 在深入分析硅单光子探测器的最新研究进展的基础上, 有效地攻克了探测效率和时间抖动之间的相互制约矛盾, 研制出光敏面直径为 200 μm 、室温下探测效率达 50%、时间抖动仅为 46 ps 的硅单光子探测器芯片, 最后简单介绍了该芯片在星地时间比对中的应用效果。

关键词: 硅单光子探测器; 探测效率; 时间抖动; 星地时间比对

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211004

Development of silicon single photon detector and its application in high-precision satellite-to-ground time comparison (*Invited*)

Liu Qiaoli, Liu Chang, Wang Yitong, Hao Lingxiang, Huang Yongqing, Hu Anqi, Guo Xia*

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: High-precision comparison of time-frequency is an important technology to achieve high-precision time-space consistency and time-frequency stability of the whole society information system, and provides a unified time guarantee for key areas of national economic development. Owing to its high detection efficiency, low noise, low timing jitter, and easy integration, silicon single photon detector is the key core chip in the high-precision satellite-to-ground time comparison system. The interrelationship between photon detection efficiency, dark count rate and timing jitter of the silicon single photon detector was analyzed in this paper. Based on the in-depth review of the research of the silicon single photon detector, the relationship between photon detection efficiency and timing jitter was effectively overcome. A silicon single photon detector with a photosensitive diameter of 200 μm , photon detection efficiency of 50% at room temperature, and the timing jitter of 46 ps was developed. Its application in the satellite-to-ground time comparison was briefly introduced finally.

Key words: silicon single photon detector; photon detection efficiency; timing jitter; satellite-to-ground time comparison

收稿日期:2020-11-13; 修订日期:2020-12-21

基金项目:国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项 (2017YFF0104801)

0 引言

时间是目前七个基本物理量中测量精度最高的物理量,是现代信息系统、基础科学、精密定位等重大基础领域的基石。保障各个系统内部和各个系统之间时间统一的高精密时频系统从基础研究到工程技术领域被广泛应用,尤其是空间高技术领域,已经成为国家重要战略资源。作为我国高精密时频体系建设的基础和核心,守时系统的基本目标是实现高精度的时空一致性和时频稳定性,为全社会信息化系统提供基本支撑,为电力、电信、交通、金融、能源等国民经济发展的关键领域提供统一的时间保障。

相比于微波,由于光学波长短,基于激光测距原理的时频比对是目前精度最高的时频比对技术,国际上已经达到亚厘米精度。由于激光路径中光散射、吸收等效应,根据激光雷达方程, $P_R \propto \frac{1}{R^2}$, 返回探测器的光功率 P_R 与探测距离 R 的平方成反比。对于一定的激光功率,距离越远,返回的光功率越小,因此对探测器灵敏度提出了更高的要求^[1]。对于卫星和地面之间距离,能够接收到的光子数目有限,因此高精密星地时频比对系统中广泛采用的是具有极高灵敏度的单光子探测器。影响时间测量精度的主要因素是测量过程中的不确定性,通常用时间抖动 (Timing Jitter) 或时间分辨率 (Timing Resolution) 来表征。在实际的激光测距系统中,时间抖动通常主要由原子钟、激光器、计时器和光电探测器四部分引起,其中光电探测器是影响系统总时间抖动的主要因素,因此降低光电探测器的时间抖动是提高时频比对精度的关键。

目前较为成熟的单光子探测器主要有光电倍增管、超导纳米线单光子探测器和半导体单光子探测器 (Single-Photon Avalanche Photodiode, SPAD) 等。半导体单光子探测器具有体积小、效率高、噪声低、不需要复杂庞大的制冷装备等优势,而硅单光子探测器凭借其完整的晶格质量、高的电子空穴离化比、易形成二维面阵、易与 CMOS 电路集成、成本低等优异性能,展示了高探测效率、低噪声、低后脉冲等优越特性,成为可见和近红外波段单光子探测不二的选择^[2]。

文中首先分析评价硅单光子探测器性能的关键

参数,针对器件各性能之间存在的相互制约关系,提出量子能态电场调控方法,实现了大光敏面、低抖动的硅单光子探测器,最后简单介绍了研制的单光子探测器在星地时间比对中的应用效果。

1 硅单光子探测器关键参数

衡量硅单光子探测器的关键参数主要有光探测效率 (Photon Detection Efficiency, PDE)、暗计数 (Dark Count Rate, DCR) 和时间抖动是衡量硅单光子探测器的关键参数^[3]。光探测效率代表了光电转化概率,可以表示为量子效率和雪崩触发几率的乘积,与材料的吸收系数、器件结构、过偏压 (Excess Voltage, V_{ex}) 等因素有关,随着偏压、雪崩长度增加而增加;暗计数是指在无入射光信号条件下引起的计数信号,是探测器的主要噪声之一。通常,由中性区扩散至高场区的少子、耗尽区内热激发产生的载流子、隧道效应产生的载流子都存在触发雪崩的几率,是引起暗计数的主要因素。因此,降低器件工作温度、减小器件尺寸、降低过偏压等都可以降低暗计数水平。时间抖动是触发的雪崩载流子到达时间的统计,通常用信号输出时刻统计分布上的半高宽去表征,决定了入射光子到达时间的精度,在激光雷达应用中决定了测量距离的精度。时间抖动指光子到达的时刻与探测器计数信号输出时刻的时间差异,光子吸收位置、雪崩过程本身的随机性都是影响时间抖动的关键因素。为减小时间抖动,通常降低倍增区外低电场区厚度,从而减小由于扩散慢过程导致的时间抖动高的问题,或者提高外加偏压降低时间抖动。然而,现有实现低时间抖动的方法是以降低吸收区厚度从而降低光探测效率为代价,而提高工作偏压也同时提高了暗计数,无法有效地解决时间抖动、探测效率和暗计数之间的矛盾。

2 硅单光子探测器研究现状

表 1 给出的是两种不同吸收区厚度下的硅单光子探测器关键指标对比结果。其中, M. Ghioni 等人采用双外延结构以减少载流子的扩散效应,外延层总厚度约为 $5 \mu\text{m}$ ^[4]。光敏面直径 d 为 $200 \mu\text{m}$ 的器件在 550 nm 下的探测效率达到 52%,暗计数为 50 kHz。由于结构中薄的吸收区厚度降低了雪崩过程随机性,并且双外延结构减少了衬底载流子的扩散效应,器件时

间抖动低至 35 ps, 但薄的吸收区同时导致长波探测效率降低, 该结构在 820 nm 波长下探测效率仅为 15%。通过增加吸收区厚度可以使探测效率提高到 50% 以上, 并使得响应峰值向长波移动。例如 Excelitas Technologies 研制的 SPCM-AQ 硅单光子探测器^[5],

吸收区厚度在 30 μm 以上, 在 540~850 nm 范围内器件探测效率超过 50%, 由于采用吸杂工艺, 暗计数 <1 kHz。但较厚的吸收区同时也会增加器件的时间抖动, 此类结构的时间抖动通常在 300 ps, 无法在高精密时间测量领域中应用。

表 1 两种不同吸收区厚度的硅单光子探测器的关键指标对比结果

Tab.1 Comparison of key performance parameters of two kinds of SPADs with different thicknesses of absorption layer

Structure	M. Ghioni	SPCM-AQ
Thickness of absorption layer/μm	5	>30
Diameter/μm	200	100-500
Breakdown voltage/V	36	100-500
DCR/kHz	50 (20 °C)	<1
PDE	52% @550 nm 15% @820 nm	>50% @540 nm-850 nm
Timing jitter/ps	~35	~300

光敏面尺寸对后续应用具有重要意义, 光敏面尺寸大, 光学耦合相对容易, 否则将会由于光学耦合带来效率损失。然而, 硅单光子探测器的光探测效率、暗计数、时间抖动均强烈依赖于光敏面尺寸。图 1(a) 给出的是光探测效率、暗计数、时间抖动随着光敏面直径增加的实验结果^[6]。起初, 探测效率随着光敏面直径的增大而增大, 这主要是由于耦合效率提高引起的, 当光敏面尺寸进一步增大时, 探测效率逐渐趋于饱和之后下降, 这主要是由于光敏面直径增大导致暗计数增加速率更快引起的。暗计数随着光敏面直径的变化测试结果如图 1(b) 所示, 随着光敏面直径的增加, 暗计数拟合结果满足 $DCR = 0.002 \times d^{1.76}$ 。光敏面直径从 10 μm 增加到 500 μm, 光敏面积增加 2500 倍, 暗计数增加了 2 万倍, 而时间抖动由于倍增辅助横向扩散效应, 增加了 80 倍。因此, 光敏面尺寸、探测效率、暗计数和时间抖动之间相互制约。由于过小的光敏面积不利于光学耦合, 因此, 具有大感光面积、高探测效率、低时间抖动的硅单光子探测器在实际应用中至关重要。

针对这一问题, 1988 年, M. Ghioni 等人提出了外延结构, 在 n 型衬底上外延厚度 12 μm 的 p 型外延层, 并基于该外延层进行层结构设计^[7]。在 Haitz 的平

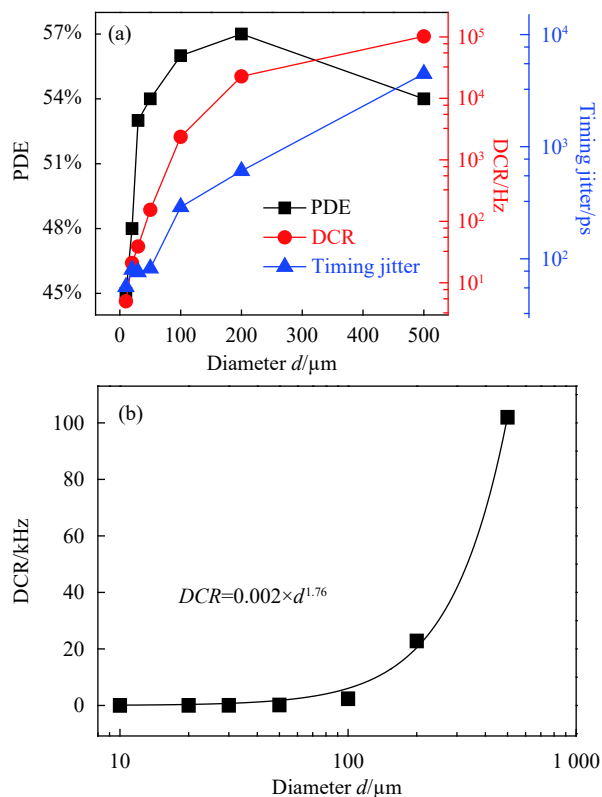


图 1 (a) 不同光敏面直径硅单光子探测器的探测效率、暗计数和时间抖动实验结果; (b) 暗计数与光敏面直径的拟合结果

Fig.1 (a) Measured PDE, DCR and timing jitter of SPADs with different photosensitive diameters; (b) Fitting results of DCR with photosensitive diameters

面结构基础上,该结构在有源区内引入 p^+ 层构建 n^+/p^+ 主结,有利于增强雪崩电场和调控击穿电压。该结构中薄的外延层一方面保证了输出信号,另一方面削弱了载流子的扩散效应。此外, n 型衬底和 p 型外延层之间处于反偏状态,一方面使得衬底中的载流子无法到达外延层,另一方面,这在某种程度上缩短了中性区厚度,最终器件的时间抖动缩短为 30 ps。2009 年, M. J. Hsu 等人采用浅沟槽隔离保护环代替 p 阱保护环结构,避免了扩散保护环导致的低场区域,有效阻止了载流子的横向漂移和扩散,消除了扩散尾^[8]。制备出的有源区尺寸为 $2\ \mu\text{m}\times 2\ \mu\text{m}$ 和 $14\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$ 器件的时间抖动分别为 26.7 ps 和 27.4 ps。该结构具有更短的死时间和更高的填充因子,但是由于在 SiO_2/Si 处引入的界面态,导致器件暗计数较大 ($10^4\sim 10^6$ Hz)。

针对探测效率和时间抖动的矛盾,2012 年, S. Cova 教授领导的研究小组在二次外延结构的基础上提出了近红外增强结构^[9]。一方面增加外延层吸收厚度,同时外延生长过程中在雪崩区和吸收区界面处通过扩散引入合适的掺杂区,进而调控雪崩区和吸收区的电场分布,降低吸收区额外的电场强度。最终,在过偏压 20 V 的条件下,800 nm 器件探测效率由 15% 提高到 40%,但时间抖动由 30 ps 增加到 90 ps。这一结构明显提高了近红外波长下的探测效率,但是需要在外延生长的过程中精准控制引入的电场调控区的掺杂分布,增加了工艺复杂度和成本。类似于上述外延结构,捷克技术大学 I. Prochazka 教授的研究小组提出了 K14 结构,器件时间抖动低至 ~ 40 ps,500~800 nm 波长范围内探测效率约为 40%, $-60\ ^\circ\text{C}$ 下器件暗计数低于 60 kHz^[10-11]。

为了完全消除扩散尾以获得更低的时间抖动, A. Spinelli 教授研究小组在二次外延结构的基础上又发展了双结 SPAD^[12]。图形化的埋层 p^+ 层位于器件有源区下方, n^+/p^+ 主结的耗尽区与 n 衬底/埋层 p^+ 层的耗尽区相连,消除了中性区,达到完全耗尽,消除了扩散尾。过偏压 21 V 的条件下,直径 $10\ \mu\text{m}$ 器件的时间抖动约为 35 ps,主要是由载流子在上层 n^+ 层中的扩散引起的。随着微纳技术的发展,2017 年,斯坦

福大学 K. Zang 等人引入倒金字塔状的微纳结构作为光俘获层^[13],将垂直光吸收衍射为水平光吸收,进而增加吸收长度,850 nm 下的探测效率由 13% 提高到 32%,同时,在 940 nm 下保持 25 ps 的低时间抖动基本不变。但是这类设计的工艺复杂,需要对微纳结构进行严格的理论计算,同时器件 40 MHz 的高暗计数也不利于高灵敏探测。

3 大光敏、低时间抖动硅单光子探测器

为此,提出了量子能态电场调控的机理,通过有效提高雪崩区电场强度,抑制加速电荷输运过程中的波动性和随机性,减少了雪崩建立时间,因此不仅能够有效的提高时间分辨率,而且还缓解了探测效率和时间抖动之间的矛盾。

图 2(a) 为器件结构示意图,高场区主要集中在中心主结区域,单个入射光子被吸收转换成光生载流子,并在高场作用下触发雪崩,引起电流增加。图 2(b) 为器件的暗电流 (黑色实线)、532 nm 下的光电流 (红色虚线) 及增益曲线 (红色方形)。击穿前器件暗电流低于 0.1 nA,增益高于 10^5 。插图给出的是不同雪崩区掺杂浓度下器件的击穿电压分布,击穿电压随掺杂水平的升高而减小。图 2(c) 给出的是制备的光敏面直径分别为 $200\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 器件在 532 nm 下的探测效率随过偏压的变化曲线。探测效率首先随着过偏压 V_{ex} 的增大而增加,在过偏压为 1.35 V 的条件下, $200\ \mu\text{m}$ 器件的探测效率达到 40.7%,之后由于暗计数随过偏压的增加速率较快,导致探测效率降低。而对于光敏面直径为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的器件,可能是由于光学耦合效率低导致的探测效率低。图 2(d) 给出的是光敏面直径分别为 $200\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的器件分别在过偏压为 0.3 V、0.6 V 和 0.9 V 下的暗计数测试结果,在相同过偏压下,暗计数随光敏面直径的增大而增加,在过偏压为 0.3 V、0.6 V 和 0.9 V 下分别满足 $DCR = 16.13 \times d^{1.52}$ 、 $DCR = 13.43 \times d^{1.45}$ 、 $DCR = 9.48 \times d^{1.41}$ 。三种尺寸的器件暗计数均随过偏压的增加而增加,并且大尺寸器件的增加速率更明显,原因可能在于大尺寸器件缺陷存在的几率更大,额外引起暗计数。

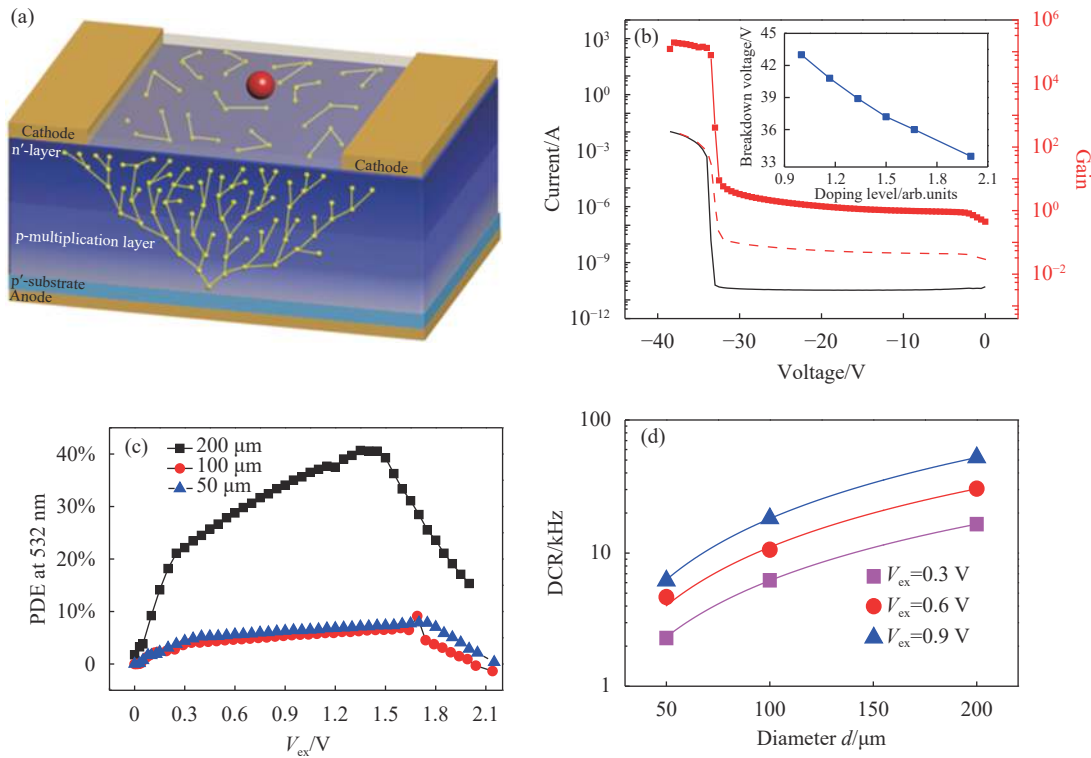


图 2 (a) 器件结构示意图; (b) 器件的暗电流、光电流及增益测试结果 (插图: 不同雪崩区掺杂浓度下器件的击穿电压); (c) 532 nm 下不同光敏面直径器件的探测效率; (d) 不同光敏面直径器件在不同过偏压下的暗计数测试结果

Fig.2 (a) Cross section of the proposed device structure; (b) Measured dark current, photocurrents and the corresponding gain versus reverse bias voltage (Inset shows the breakdown voltage characteristics of the device under different doping level); (c) PDE as a function of V_{ex} at 532 nm; (d) DCR of SPADs at different V_{ex} as a function of photosensitive diameters

表 2 给出的是笔者所在课题组研制的器件测试结果与部分商业化硅单光子探测器关键指标对比, 可

以看出, 研制的器件具有明显的大光敏面、低时间抖动的特点。

表 2 笔者所在课题组研制的器件与商业化器件指标对比

Tab.2 Performance comparison between commercialized devices and device developed by our group

	Diameter/ μm	DCR/Hz	PDE	Timing jitter/ps
This work	200	3 k (13.7%@709 nm)	52.2%@709 nm 38.2%@532 nm	46 ($V_{ex}=1.07$ V)
Politecnico di MilanoK14 ^[11]	200	~ 2.5 k ($T=-60$ °C, $V_{ex}=1$ V)	$\geq 40\%$ (500-800 nm)	~ 47 ($T=-60$ °C, $V_{ex}=3.8$ V)
MPDPDM series ^[14]	20-100	5-1 000	24%@400 nm 49%@550 nm 37%@650 nm	~ 30 ($V_{ex}=5$ V)
Laser components COUNT-T-100 ^[15]	100	≤ 100 ($V_{ex}=12$ V)	40%@405 nm 75%@670 nm 60%@810 nm	350 ($V_{ex}=12$ V)
Excelitas SPCM-AQRH-XX-TR ^[16]	180	10-1 500 ($V_{ex}=5.5$ V)	75%@650 nm 50%@830 nm	225 ($V_{ex}=5.5$ V)

4 结 论

高精度时频传输技术是时频系统中一把“标尺”，标定各个时频系统的时间，提高“标尺”的精度是其关键科学问题，低时间抖动的硅单光子探测器是实现高精度时频传输的核心芯片。文中针对硅单光子探测器的关键参数间相互制约关系，通过电场调控载流子的能态占据行为，有效缩短了雪崩建立时间从而降低了时间抖动性能，对于 200 μm 的硅单光子探测器，探测效率达 50%，时间抖动为 46 ps。目前，该芯片在电路的支持下，在天文台多次顺利完成了星地时间比对测试，与国际上通用的单光子探测器相比，展示了更高的激光回波率和测量精度。在 2020 年 10 月 28 日紫金山天文台德令哈青海观测站进行示范应用实验中，德令哈青海观测站首次成功实现对低轨到同步轨道带有合作目标卫星激光观测，最远测量距离超过四万公里。该芯片的研制成功，不仅提高了我国单光子探测器在国际上的研究地位，也为增强我国激光测距网观测能力和目标覆盖范围提供有力的技术支持。

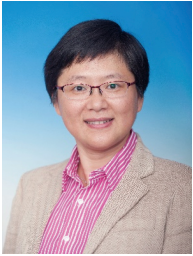
致 谢 感谢华东师范大学吴光教授和中国科学院上海天文台张忠萍研究员在硅单光子探测器芯片测试及应用方面的合作。

参考文献：

- [1] Zhang Haifeng, Cheng Zhien, Long Mingliang, et al. Applications of satellite laser ranging and laser time transfer in BeiDou navigation satellite system [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 188: 251-262.
- [2] Liu Qiaoli, Zhang Haiyan, Hao Lingxiang, et al. Total dose test with gamma-ray for silicon single photon avalanche diodes [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(8): 088501.
- [3] Bronzi Danilo, Villa Federica, Tisa Simone, et al. SPAD figures of merit for photon-counting, photon-timing, and imaging applications: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 16(1): 3-12.
- [4] Ghioni Massimo, Gulinatti Angelo, Rech Ivan, et al. Large-area low-jitter silicon single photon avalanche diodes[C]// Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2008, 6900: 69001D.
- [5] Gulinatti Angelo, Rech Ivan, Maccagnani Piera, et al. Improving the performance of Silicon Single Photon Avalanche Diodes[C]// Proceedings of SPIE, 2011, 8033: 803302.
- [6] Villa Federica, Bronzi Danilo, Zou Yu, et al. CMOS SPADs with up to 500 μm diameter and 55% detection efficiency at 420 nm [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(2): 102-115.
- [7] Ghioni Massimo, Cova Sergio, Lacaita Andrea L, et al. New silicon epitaxial avalanche diode for single-photon timing at room temperature [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(24): 1476-1477.
- [8] Hsu Mark J, Finkelstein Hod, Esener Sadik C. A CMOS STI-bound single-photon avalanche diode with 27 ps timing resolution and a reduced diffusion tail [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(6): 641-643.
- [9] Lacaita Andrea L, Ghioni Massimo, Cova Sergio. Double epitaxy improves single-photon avalanche diode performance [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(13): 841-843.
- [10] Prochazka I, Hamal K, Sopko B. Recent achievements in single photon detectors and their applications [J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(9-10): 1289-1313.
- [11] Prochazka Ivan, Kodet Jan, Blazej Josef. Note: Solid state photon counters with sub-picosecond timing stability [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 046107.
- [12] Spinelli Alessandro, Ghioni Massimo, Cova Sergio, et al. Avalanche detector with ultraclean response for time-resolved photon counting [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(5): 817-821.
- [13] Zang Kai, Jiang Xiao, Huo Yijie, et al. Silicon single-photon avalanche diodes with nano-structured light trapping [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-6.
- [14] Datasheet of PDM Series. Micro Photon Devices[EB/OL].[2019-11]<http://www.micro-photon-devices.com/MPD/media/Datasheet/PDM.pdf>.
- [15] Single Photon Counter-Timing Module COUNT[®] T Series [EB/OL].https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lcp/count-t.pdf.
- [16] SPCM-AQRH-TR.Excelitas[EB/OL].<https://www.excelitas.com/product/spcm-aqrh-tr>.



第一作者简介：刘巧莉(1990-),女,博士。2014年毕业于青岛大学微电子专业并获学士学位。2020年毕业于北京工业大学电子科学与技术专业并获博士学位。主要从事高灵敏硅单光子探测器方面的研究,在 *Adv. Opt. Mater.*、*IEEE Electron Device Lett.*等重要学术期刊上发表论文 10 余篇。Email: liuqiaoli@bupt.edu.cn



通讯作者简介：郭霞(1974-),女,教授,博士生导师,长江学者特聘教授。长期从事半导体光电子材料与器件的研究,取得了一系列有一定国际影响的创新研究成果。先后主持国家自然科学基金重点项目、科技部重点研发计划等省部级科研项目 20 余项,在 *Adv. Func. Mater.*、*ACS Nano* 等学术刊物上发表 SCI 收录学术论文 80 余篇,他引 600 多次,授权国家发明专利 30 项。Email: guox@bupt.edu.cn