

大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器

刘红敏, 龙金燕, 代雷, 张鑫淦, 梁琨, 杨茹, 韩德俊

引用本文:

刘红敏, 龙金燕, 代雷, 等. 大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 535–541.

LIU Hong-min, LONG Jin-yan, DAI Lei, et al. Large dynamic range silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 535–541.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0535>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

强脉冲激光作用下碲镉汞光伏探测器的反常行为

Abnormal behaviors of photovoltaic HgCdTe detectors under intense pulse laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 50–56 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0050>

基于强度-相位级联调制的微波光子下变频法

Microwave photonic down-conversion method using intensity-phase cascaded modulation

光学精密工程. 2017, 25(4): 827–834 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172504.0827>

低相噪大面积平衡光电探测器

Balanced amplified photodetector with low phase noise and large area

光学精密工程. 2018, 26(2): 284–292 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182602.0284>

X射线脉冲星导航探测器的微通道板甄选

Selection of MCP for array X-ray pulsar navigation detector

光学精密工程. 2015, 23(2): 402–407 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152302.0402>

高速空间相干光平衡探测器结构优化

Structure optimization of high speed space coherent optical balance detectors

光学精密工程. 2017, 25(10): 2736–2743 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172510.2736>

文章编号 1004-924X(2020)03-0535-07

大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器

刘红敏¹, 龙金燕¹, 代雷¹, 张鑫淦¹, 梁琨^{1,2*}, 杨茹¹, 韩德俊¹

(1. 北京师范大学核科学与技术学院新器件实验室, 北京 100875;

2. 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:外延电阻淬灭型硅光电倍增器(EQR SiPM)的特点是利用硅衬底外延层来制作器件淬灭电阻。为了进一步提高大动态范围 EQR SiPM 的光子探测效率,并且解决填充因子较低和增益较小等问题,在前期研究工作的基础上研制出微单元尺寸分别为 15 μm 和 7 μm 的 EQR SiPM,有源区面积均是 1 mm \times 1 mm。通过改变 EQR SiPM 的微单元尺寸优化填充因子,有效提高了探测效率与增益;其微单元密度分别是 4 400 个/mm² 和 23 200 个/mm²,依然保持着较大的动态范围。室温条件下(20 $^{\circ}\text{C}$),工作在 5 V 过偏压的 EQR SiPM 至少可分辨 13 个光电子;15 μm 和 7 μm EQR SiPM 的增益分别为 5.1 \times 10⁵ 和 1.1 \times 10⁵,在 400 nm 波长下的峰值光探测效率分别达到 40% 和 34%。

关键词:硅光电倍增器;外延淬灭电阻;单光子;高探测效率;高增益;大动态范围

中图分类号: TN152 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20202803.0535

Large dynamic range silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor

LIU Hong-min¹, LONG Jin-yan¹, DAI Lei¹, ZHANG Xin-gan¹,
LIANG Kun^{1,2*}, YANG Ru¹, HAN De-jun¹

(1. *Novel Device Laboratory, College of Nuclear Science and Technology,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2. *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Beijing 100083, China*)

** Corresponding author, E-mail: lk@bnu.edu.cn*

Abstract: Silicon photomultipliers with epitaxial quenching resistors (EQR SiPM) are the bulk resistors under each microcell in the epitaxial layer that are used as the quenching resistors. To enhance the photon detection efficiency and solve the problems of lower fill factor and smaller gain for the large dynamic range of EQR SiPM, Novel Device Laboratory (NDL) has changed the size of microcells and newly developed SiPMs with microcell sizes of 15 μm and 7 μm and an active area of 1 mm \times 1 mm based on its previous work. By changing the size of the microcell, the filling factor of the device is effectively increased, thus, improving the photon detection and gain efficiency. The microcell densities of the 15 μm and 7 μm devices are 4 400/mm² and 23 200/mm², respectively, which still maintain a large dynamic range. EQR SiPMs can distinguish at least 13 p. e. and the gain

收稿日期:2019-10-16;修订日期:2019-11-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11875089, No. 61534005);集成光电子学国家重点实验室开放课题(No. IOSKL2019KF14)

values are 5.1×10^5 and 1.1×10^5 under 5 V overvoltage. Moreover, the peak photon detection efficiencies at a 400 nm wavelength can reach 40% and 34%.

Key words: Silicon Photomultiplier (SiPM); Epitaxial Quenching Resistance (EQR); single photon detection; high detection efficiency; high gain; large dynamic range

1 引言

硅光电倍增器 (Silicon Photomultiplier, SiPM) 具有优异的单光子分辨能力和时间分辨能力, 其工作电压低、动态范围大、光探测效率 (Photon Detection Efficiency, PDE) 高, 可以有效探测极弱光。另外, SiPM 还具有体积小、结构紧凑、易于集成、对磁场不敏感等优点, 不仅可以替代光电倍增管应用在高能物理、天体物理、核医学成像以及荧光测量等弱光探测领域, 也可用于水下三维测深^[1]。国际上 SiPM 产品器件结构一般采用多晶硅或金属条在器件表面作为淬灭电阻, 如 FBK 研制的 RGB-UHD-SiPM 和 NUV-HD-SiPM^[2-3]、滨松报道的 S13361-3050AS-08^[4] 以及 SensL 发布的 C 系列 SiPM^[5] 等, 这样的器件死区面积较大, 尤其对于高密度 SiPM, 其高探测效率与大动态范围不可兼容。

为了缓解高探测效率与大动态范围不兼容的矛盾, 北京师范大学新器件实验室 (Novel Device Laboratory, NDL) 利用外延电阻淬灭技术, 将衬底外延层作为 SiPM 的淬灭电阻研制出外延电阻淬灭型硅光电倍增器 (Silicon Photomultiplier with Epitaxial Quenching Resistor, EQR SiPM), 有效减小了 SiPM 的死区面积, 在保持较大动态范围的同时可以维持较高的 PDE。近年来, NDL 已成功研制并生产出有效面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 和 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 微单元尺寸分别是 $10 \mu\text{m}$ 和 $12.5 \mu\text{m}$ 的 P-on-N 型 EQR SiPM 和 $7 \mu\text{m}$ 的 N-on-P 型 EQR SiPM, 它们均表现出优异的特性^[6-8]。

在医疗 PET 成像、天体物理以及高能物理等领域的应用中, SiPM 的 PDE 要求尽可能高。高能物理实验中使用的 SiPM 阵列一般采用 ASIC 读出大批量输出信号, 许多商用 ASIC 不能读取增益低的 SiPM 输出信号^[9], 因而在保持 NDL EQR SiPM 大动态范围优势的同时适当增大微

单元尺寸可进一步提高其探测效率及增益, 有利于拓展 EQR SiPM 的应用范围。强子量能器对大动态范围的要求更高^[10]。本文详细介绍了 NDL 最新研制的 EQR SiPM, 该器件的光敏区面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, APD 微单元尺寸分别是 $15 \mu\text{m}$ 和 $7 \mu\text{m}$ 。它同时具有较大动态范围和较高探测效率, 在高能物理和强子量能器等应用中具有明显的优势。

2 器件结构与实验装置

EQR SiPM 的典型结构如图 1 所示。在 N 型外延硅片上通过离子注入形成 N-enrich 区, 它与表层的 P++ 层形成 P-N 结结构, 再串联外延层淬灭电阻可构成 APD 微单元。微单元尺寸影响器件填充因子, 因此 SiPM 的探测效率与微单元尺寸密切相关; 同时, APD 微单元大小决定微单元密度, 从而影响器件的动态范围。Gap 区的掺杂浓度低于 N-enrich 区, 其 P-N 结耗尽区形成电学隔离, 因而降低了相邻微单元之间光学串扰的概率。器件表面连续的 P++ 层作为 APD 微单元的阳极, 直接从每个 APD 微单元收集雪崩信号, 而外延层的高电阻可以作为淬灭雪崩过程、恢复微单元初始状态的淬灭电阻。

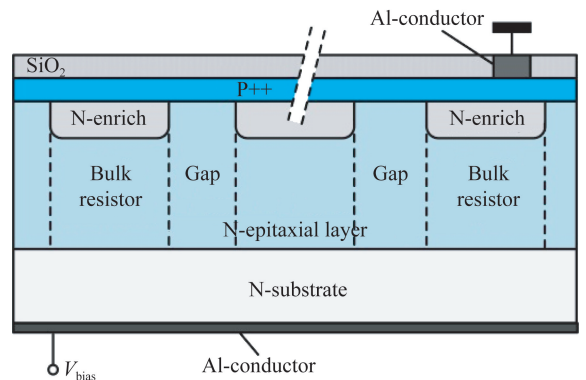


图 1 EQR SiPM 的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of EQR SiPM

SiPM 管芯通过银浆贴片、压焊金丝等手段封装在 TO 管壳的中间位置,其实物照片如图 2 所示。

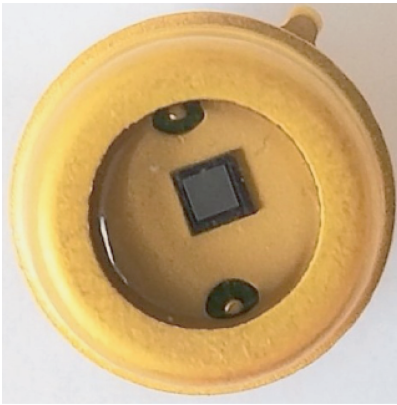


图 2 EQR SiPM 的实物图

Fig. 2 Picture of EQR SiPM

图 3 是表征 SiPM 各项参数的基本实验装置。除温度系数以外,其他参数表征的实验环境温度均为 20 °C。

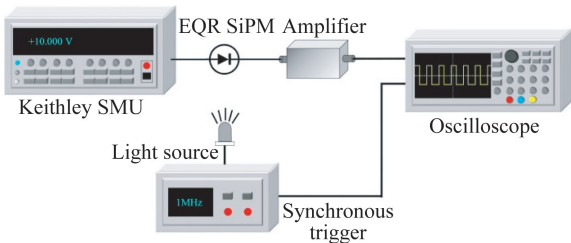


图 3 EQR SiPM 特性表征的实验装置

Fig. 3 Experimental setup for EQR SiPM characterization

Keithley SMU 为 SiPM 提供反向工作电压,同时作为电流表测量反向电流,最终得到 SiPM 的电流-电压关系 ($I-V$ 曲线)。无光照环境中, SiPM 的输出信号经过 NDL-AMP-40-1 型号 100 倍放大器放大后被泰克示波器接收,并由 Labview 程序控制电脑采集示波器显示的输出信号,从而得到暗计数率(Dark Count Rate, DCR)和光学串话随过偏压的关系。对于关联噪声以及微单元的恢复时间则是通过数字示波器(LeCroy WaveRunner 640Zi)采集 1 ms 时间序列上的信号,根据关联噪声与初始暗计数产生机制的不同导致其时间分布上的差异,利用 Matlab 程序进行噪声分析得到的^[11-12]。另外,重频为 1 MHz、脉宽为 100 ps 的超连续谱光源经 532 nm 滤光片入射在 EQR SiPM 的表面,并输出同步触发信号,

利用力科示波器对 SiPM 响应输出信号进行统计分析,从而得到输出信号的面积分布谱,可以表征 SiPM 的单光子分辨能力,进一步计算得到 SiPM 的增益。利用光子计数法测量 PDE,是将氙灯光源输出的光束经过单色仪通入到积分球中,经过积分球输出两路强度和光斑大小相同的单色光,分别入射到用于定标的 PIN 和 EQR SiPM 表面,并根据器件的光响应计算其探测效率。

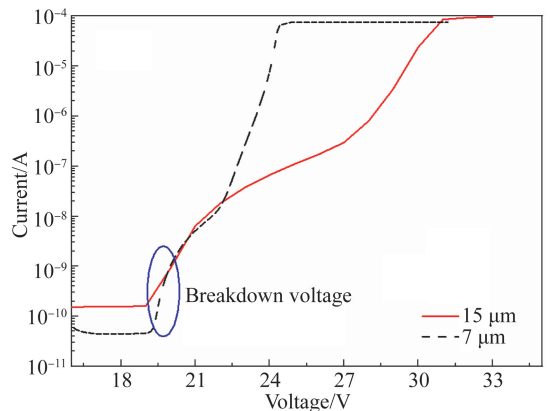
3 特性表征

该部分实验主要表征了 EQR SiPM 的暗特性(如 $I-V$ 曲线、DCR、光学串话、关联噪声和恢复时间)以及光特性(如单光子分辨谱、增益和探测效率)。

3.1 EQR SiPM 暗特性表征

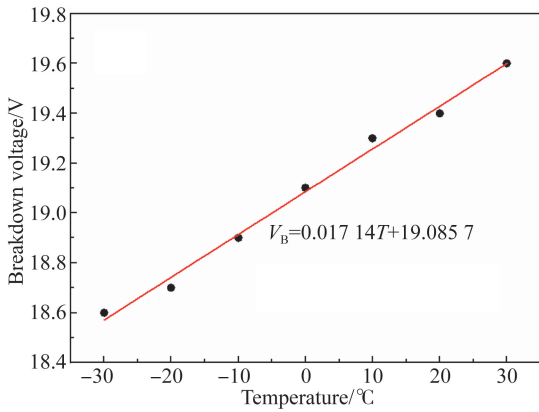
在没有光照及放射性物质照射的条件下, 15 μm 及 7 μm 微单元 EQR SiPM 的反向电流随反向电压的变化曲线($I-V$ 特性)如图 4 所示。通过对 $I-V$ 曲线求导确定击穿电压^[13],得到室温下这两种 SiPM 的击穿电压都是 19.5 V。此外, 15 μm 微单元 SiPM 的最大过偏压(最大可工作电压与击穿电压的差值)约为 8 V, 7 μm 微单元 SiPM 的最大过偏压约为 2.5 V。

图 4(b)示意了 15 μm 微单元 EQR SiPM 在 $-30 \sim 30$ °C 的击穿电压变化,圆点表示实际测量的击穿电压,直线表示对不同温度下击穿电压的线性拟合。结果表明,该器件击穿电压的温度系数约为 17.1 mV/°C。较低的温度依赖性对于 EQR SiPM 的实际应用具有重要意义。



(a)EQR SiPMs 的 $I-V$ 曲线

(a) $I-V$ curves of EQR SiPMs



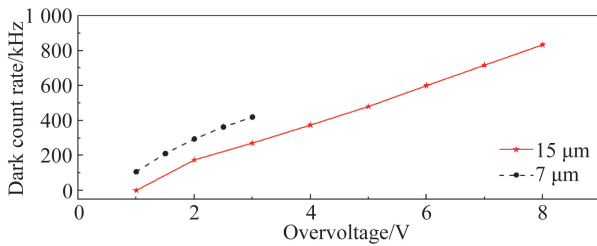
(b) 15 μm 器件击穿电压随温度的变化

(b) Breakdown voltage depending on ambient temperature for 15 μm SiPM

图 4 EQR SiPM 的 I-V 曲线以及击穿电压

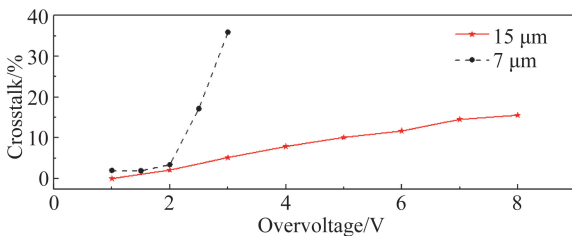
Fig. 4 I-V curves and breakdown voltage of EQR SiPM

SiPM 的 DCR 和光学串话率是衡量其特性优劣的重要参数。图 5 表示两种 EQR SiPM 的 DCR 和光学串话率随过偏压变化的曲线, 7 μm 器件的光学串话率过高, 导致它在相同过偏压下的 DCR 比 15 μm 更高。



(a) 暗计数率

(a) DCR



(b) 光学串话率

(b) Crosstalk ratio

图 5 EQR SiPM 的暗计数率和光学串话率随过偏压的变化曲线

Fig. 5 DCR and crosstalk ratio of EQR SiPM as a function of overvoltage

关联噪声与初始暗计数产生机制的不同导致它们在时间分布上存在差异。图 6 中通过噪声分析法区分暗脉冲结果, 并拟合得到 5 V 过偏压时, 微单元尺寸为 15 μm 的 SiPM 器件的单元恢复时间约为 3.7 ns。

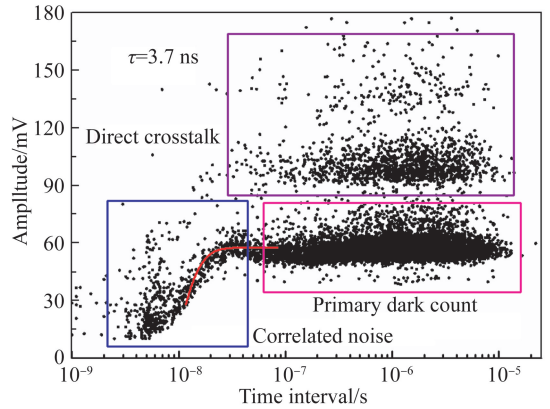


图 6 在 5 V 过偏压下 15 μm EQR SiPM 的暗脉冲散点 (曲线是拟合所得的恢复时间曲线)

Fig. 6 Scatter plot for the dark pulse amplitude of EQR SiPM with microcell size of 15 μm versus its time interval, and the curve is fitting recovery result for single microcell at 5 V overvoltage

3.2 EQR SiPM 的光响应特性

3.2.1 单光子分辨谱及增益

光照射到 SiPM 表面, 将会激发 APD 微单元发生雪崩倍增。由于微单元形状和制备条件一致, 因此每个微单元激活一次产生的信号应该完全相同, 而 SiPM 输出信号是所有响应单元信号的总和, 所以其幅值和面积呈现出整数倍的关系, 并且这些响应事件遵循泊松统计分布。

15 μm 微单元 EQR SiPM 进行光响应测量, 对器件大量输出脉冲的面积统计, 结果如图 7 所示。图中分立的峰代表着相应的光子数, 左边第一个峰对应于基线 (即 0 p. e.), 第二个峰对应 1 个光电子 (即 1 p. e.), SiPM 输出信号面积分布谱的峰谷比越好, 表示其信噪比越高, 可清晰区分的谱峰数目越多表示光子分辨能力越强。由图可知, 器件在 5 V 过偏压下至少可分辨 13 个光电子, 具有良好的单光子分辨能力。

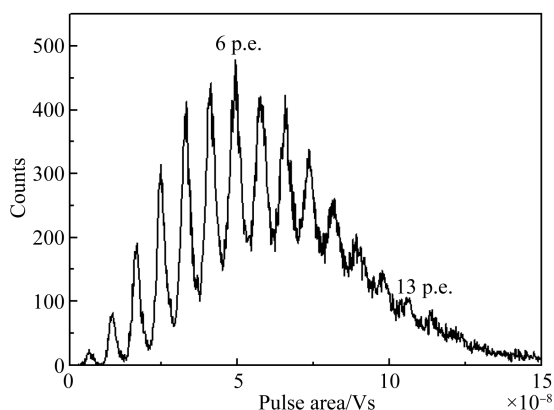


图 7 15 μm EQR SiPM 工作在 5 V 过偏压下的面积分布谱

Fig. 7 Pulse area distribution spectrum for EQR SiPM with microcell size of 15 μm

SiPM 的增益被定义为微单元发生一次雪崩倍增所释放的载流子数目,根据输出信号面积分布谱的相邻谱峰之间的间距与单元增益成正比的规律,可计算 SiPM 的单元增益。通过重复采集不同过偏压下的面积分布谱,得到图 8 所示的增益随过偏压的线性变化关系,微单元尺寸为 15 μm 的 1 mm×1 mm EQR SiPM 在 5 V 过偏压下的增益为 5.1×10^5 ,7 μm 的 1 mm×1 mm EQR SiPM 在 2 V 过偏压下的增益为 1.1×10^5 。

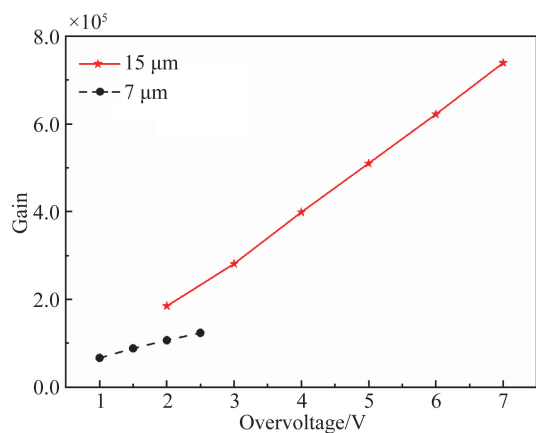


图 8 EQR SiPM 增益随过偏压的变化

Fig. 8 Variation of gain with overvoltage of EQR SiPM

3.2.2 光子探测效率

PDE 是衡量 SiPM 特性的主要参数之一,它是指一定时间内探测器探测到的光子数和入射的

光子数之间的百分比。图 9 是利用光子计数法测量有效面积为 1 mm×1 mm,然后利用泊松分布法扣除关联噪声影响,修正后两种微单元尺寸 EQR SiPM 的 PDE 随入射光波长的变化。峰值波长 400 nm 处,15 μm 器件在 5 V 过偏压时的 PDE 为 40%,7 μm 器件在 2 V 过偏压时的 PDE 为 34%。

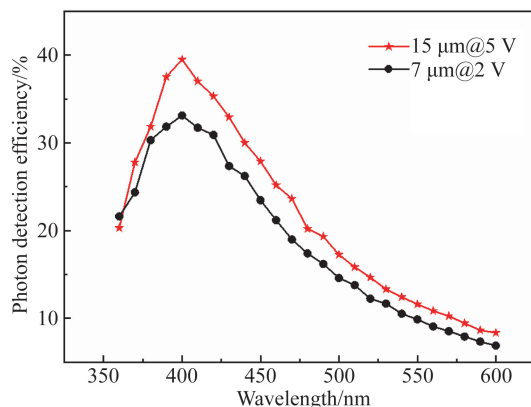


图 9 微单元尺寸为 15 μm 和 7 μm 的 1 mm×1 mm EQR SiPM 的光探测效率与入射波长的关系

Fig. 9 Photon detection efficient (PDE) versus wavelength of 1 mm×1 mm EQR SiPM with cell size of 15 μm and 7 μm

4 结果讨论

4.1 不同微单元 NDL EQR SiPM 特性对比

根据公式 $Gain = C \times \frac{V_{biar} - V_b}{e}$,增益与结电容以及过偏压成正比。随着 EQR SiPM 微单元尺寸的增大,微单元的结电容随之变大,相同过偏压下器件增益越高。

PDE 由量子效率、盖革触发效率和填充因子共同决定,其计算公式为 $PDE = \eta_0 \times \epsilon \times P_{trigger}$ 。当制备工艺、掺杂浓度及其它结构保持一致,器件的量子效率和盖革触发效率基本相同,PDE 差别来源于填充因子。增大微单元的尺寸可以提高 SiPM 的填充因子,因而可以提高 PDE。

表 1 中对比了具有 7,10,12.5 和 15 μm 4 种不同微单元尺寸,有效面积为 1 mm×1 mm EQR SiPM 器件的特性。结果表明,增大微单元尺寸

可以明显提高增益,而且随着填充因子增大,探测效率也增加。较小微单元尺寸器件则具有较高的微单元密度,因此在探测光子时的动态范围特性更有优势。

表 1 不同微单元尺寸 1 mm×1 mm EQR SiPM 的特性

Tab.1 Characteristics of 1 mm×1 mm EQR SiPM with different microcell sizes

| 微单元尺寸/ μm | PDE% | 填充因子/% | Gain | 微单元密度/ mm^{-2} |
|----------------------|-----------|--------|---------------------------------|-------------------------|
| 7 | 34@400 nm | 46 | $1.0 \times 10^5 @ 2 \text{ V}$ | 23 200 |
| 10 | 31@400 nm | 42 | $1.1 \times 10^5 @ 5 \text{ V}$ | 10 000 |
| 12.5 | 36@400 nm | 52 | $3.5 \times 10^5 @ 5 \text{ V}$ | 6 400 |
| 15 | 40@400 nm | 54 | $5.1 \times 10^5 @ 5 \text{ V}$ | 4 400 |

4.2 NDL EQR SiPM 与 MPPC 特性对比

表 2 中示意了 NDL 研制的 EQR SiPM 与日本滨松公司 MPPC 的部分特性参数,器件的微单元尺寸为 15 μm ,有效面积为 1 mm×1 mm。结果显示,EQR SiPM 的工作电压比 MPPC 低,最大过偏压比 MPPC 高,而且击穿电压的温度依赖性明显更好,11-1010C-T 的击穿电压温度系数仅为 17.1 mV/ $^{\circ}\text{C}$,S12571-015P 的击穿电压温度系数是 65 mV/ $^{\circ}\text{C}$ 。因为 EQR SiPM 采用外延硅作为淬灭电阻,减小了死区面积,因而有利于提高光子探测效率。在 NDL 11-1010C-T 的峰值波长 400 nm 处以及滨松 S12571-015P 的峰值波长 460 nm 处,NDL EQR SiPM 都具有更高的光子探测效率。

参考文献:

- [1] 聂瑞杰,徐智勇,张启衡,等. SiPM 阵列电子特性建模和三维测深仪前端电子学优化 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1661-1668.
- NIE R J, XU ZH Y, ZHANG Q H, *et al.*. NIE Model of electrical characteristics of SiPM array and optimization of front-end design for three-dimensional depth sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1661-1668. (in Chinese)
- [2] ACERBI F, DAVINI S, FERRI A, *et al.*. Cryogenic characterization of FBK HD near-UV sensitive SiPMs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(2): 521-526.
- [3] AALSETH C E, *et al.*. Cryogenic characterization

表 2 NDL 和滨松的 SiPM 的特性参数对比

Tab.2 Comparison of performance between NDL EQR SiPM and Hamamatsu MPPC

| 机构特性参数 | NDL EQR SiPM | Hamamatsu MPPC |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| | 11-1010C-T | S12571-015P |
| 微单元尺寸/ μm | 15 | 15 |
| 微单元数/ mm^{-2} | 4 400 | 4 489 |
| 击穿电压/V | 19.5 | 65±1 |
| 最大可工作电压/V | $V_{\text{BR}}+8$ | $V_{\text{BR}}+4$ |
| 暗计数/(kHz· mm^{-2}) | 470 | <200 |
| 电容/PF | 12 | 35 |
| 增益 | 5.1×10^5 | 2.3×10^5 |
| PDE | 40%@400 nm (peak) | 24%@400 nm |
| | 26%@460 nm | 25%@460 nm (peak) |
| 温度系数/(mV· $^{\circ}\text{C}^{-1}$) | 17.1 | 65 |

5 结 论

NDL 最新研制出有源区面积为 1 mm×1 mm、微单元尺寸分别为 15 μm 和 7 μm 的大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器,器件具有良好的单光子分辨能力,可分辨光子数大于 13。与以往微单元尺寸为 10 μm 和 12.5 μm 的 EQR SiPM 相比,15 μm 器件增大了微单元尺寸,虽然动态范围稍降,但是光子探测效率和增益明显提高;7 μm 器件在减小微单元尺寸和增大动态范围的同时还能保持高探测效率。该 EQR SiPM 预计可以满足高能物理实验等领域对高探测效率和高增益的应用需求,拓展了 SiPM 的使用范围。

- of FBK RGB-HD SiPMs [J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(9): P09030-P09030.
- [4] RENSCHLER M, *et al.*. Characterization of Hamamatsu 64-channel TSV SiPMs [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2018, 888: 257-267.
- [5] JACKSON C, HERBERT D. Ultra-low noise and exceptional uniformity of SensL C-series SiPM sensors [C]. *Optical Components & Materials XII. Optical Components and Materials XII*, 2015:9359.
- [6] LIU H K L, *et al.*. High-density silicon photomultipliers with epitaxial quenching resistors at novel device laboratory [J]. *JPS Conf. Proc.*, 2019, 27: 011002.
- [7] JIA J Q, JIANG J L, LIANG K, *et al.*. EQR SiPM with P-on-N diode configuration [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(8): 119.

- [8] 贾建权,江加丽,李佰成,等. 高密度外延电阻淬灭硅光电倍增器研究 [J]. 光子学报, 2017, 46(4): 74-80. JIA J Q, JIANG J L, LI B CH, *et al.*. Research on high micro element density silicon photomultiplier based on epitaxial quenching resistance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 74-80. (in Chinese)
- [9] ADLOFF C, KARYOTAKIS Y, REPOND J, *et al.*. Construction and commissioning of the CALICE analog hadron calorimeter prototype [J]. *Journal of Instrumentation*, 2010, 5(5): 05004.
- [10] HEERING A, MUSIENKO Y, RUCHTI R, *et al.*. Parameters of the preproduction series SiPMs for the CMS HCAL phase I upgrade [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*

Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 824:115-118.

- [11] DU Y, RETIÈRE F. After-pulsing and cross-talk in multi-pixel photon counters [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 596(3):396-401.
- [12] OSTROVSKIY I, RETIERE F, AUTY D, *et al.*. Characterization of silicon photomultipliers for nEXO [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(4): 1825-1836.
- [13] BOCCONE V, *et al.*. Characterization of new hexagonal large area MPPCs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(3): 1474-1482.

作者简介:



刘红敏(1994—),女,甘肃白银人,硕士研究生,2017年于东北大学获得学士学位,主要从事半导体器件物理方面的研究。E-mail: 1844598711@qq.com

通讯作者:



梁 琨(1975—),女,广西南宁人,副教授,1997年于武汉大学获得学士学位,2003年于中科院半导体所获得博士学位,主要从事半导体光电器件相关技术的研究。E-mail: lk@bnu.edu.cn