

外延电阻淬灭型硅光电倍增器的最新研究进展

张琳, 谢港, 刘宇霄, 张慧霞, 梁琨*, 杨茹, 韩德俊

(北京师范大学核科学与技术学院新器件实验室, 北京 100875)

摘要: 北京师范大学新器件实验室 (NDL) 一直致力于研制结构紧凑、工艺相对简单的外延电阻淬灭型硅光电倍增器 (silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor, EQR SiPM)。近期为了满足硅光电倍增器 (silicon photomultiplier, SiPM) 在核医学成像方面的需要, NDL 通过优化器件设计和制作工艺, 成功研制出微单元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 、有效面积为 $9\ \text{mm}^2$ 的 EQR SiPM。相较以往同类型器件, 实现了器件暗计数率 (dark count rate, DCR) 的进一步降低同时保持了较高的光子探测效率 (photon detection efficiency, PDE), 在环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 、过偏压为 $7\ \text{V}$ 时, DCR 的典型值为 $226\ \text{kHz}/\text{mm}^2$ 、峰值 PDE 为 46% 。另外, 为了进一步提升 EQR SiPM 的动态范围, NDL 还研制出微单元尺寸为 $6\ \mu\text{m}$ 、有效面积为 $9\ \text{mm}^2$ 、微单元数目为 244720 的 EQR SiPM, 在环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 、过偏压为 $7\ \text{V}$ 时, DCR 的典型值为 $240\ \text{kHz}/\text{mm}^2$ 、峰值 PDE 为 28% , 其较大的动态范围特别适合高能宇宙射线的测量、强子量能器等应用。

关键词: 硅光电倍增器; 外延淬灭电阻; 光子探测效率; 暗计数率; 动态范围
中图分类号: O469 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210587

Recent research progress of silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor

Zhang Lin, Xie Gang, Liu Yuxiao, Zhang Huixia, Liang Kun*, Yang Ru, Han Dejun

(Novel Device Laboratory, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Novel Device Laboratory (NDL) of Beijing Normal University has been developing a silicon photomultiplier with an epitaxial quenching resistor (EQR SiPM), which has a compact structure and a relatively simple fabrication process. Recently, to meet the requirements of nuclear medicine imaging, NDL has successfully developed an EQR SiPM with a microcell size of $15\ \mu\text{m}$ and an active area of $9\ \text{mm}^2$ by optimizing the device structure and fabrication technology. Compared to previous devices of the same type, the dark count rate (DCR) of the EQR SiPM is further reduced while still maintaining high photon detection efficiency (PDE). At an ambient temperature of $20\ ^\circ\text{C}$ and an operating overvoltage of $7\ \text{V}$, the typical DCR is $226\ \text{kHz}/\text{mm}^2$, and the peak PDE is 46% . In addition, to further increase the dynamic range of the EQR SiPM, NDL has developed an EQR SiPM with a microcell size of $6\ \mu\text{m}$, an active area of $9\ \text{mm}^2$ and a microcell number of 244720. At an ambient temperature of $20\ ^\circ\text{C}$ and an operating overvoltage of $7\ \text{V}$, the typical DCR is $240\ \text{kHz}/\text{mm}^2$, and the peak PDE is 28% . It has large dynamic range that is very suitable for the measurement of high-energy cosmic rays and other applications in hadron calorimeters.

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-09-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC01220001)

作者简介: 张琳, 女, 硕士生, 主要从事半导体器件物理方面的研究。

导师简介: 梁琨, 女, 教授, 博士, 主要从事半导体器件物理方面的研究。

Key words: silicon photomultiplier; epitaxial quenching resistor; photon detection efficiency; dark count rate; dynamic range

0 引言

SiPM 是具有光子数分辨能力的单光子探测器。它是由一系列工作于盖革模式的雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 微单元并联而成, 微单元间相互独立并与各自的淬灭电阻串联, 所有微单元通过公共电极输出信号, 信号大小正比于处于激发状态的微单元数目, 即正比于探测到的光子数。与传统的光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 相比, SiPM 工作于非真空环境, 因此不易损坏, SiPM 体积小、不受磁场影响、功耗低、单光子分辨能力强, 这些优势使得 SiPM 逐渐替代 PMT 成为具有广阔发展前景的单光子探测器, 目前已广泛应用于天文物理、高能物理、激光雷达、核医学成像等方面^[1-2]。

为了提升信噪比及线性响应范围, SiPM 目前都是朝着低 DCR、高增益 (gain)、高 PDE、高动态范围的方向改进, 但不同应用对 SiPM 的特性关注点有所不同。在正电子发射断层扫描成像 (positron emission tomography, PET) 等高定时性能的应用中, 低 DCR 有助于减少 DCR 带来的随机符合事件, 提高定时性能^[3]。另外, 量能器对动态范围的要求促使 SiPM 朝着小微单元尺寸的方向发展^[4]。目前, 滨松发展了具有低 DCR 的 S14160-3015 PS, 在其推荐偏压下的典型 DCR 低于 100 kHz/mm²^[5]。FBK 发展了具有大动态范围的 UHD SiPM, 微单元密度高达 46 190 个/mm²^[6]。

SiPM 的淬灭电阻既可以在器件表面集成, 也可以做在 APD 微单元下方, 目前按淬灭电阻划分 SiPM 的结构主要有以下两种。表面多晶硅淬灭电阻型 SiPM 是最为普遍的结构^[7], 在器件表面集成分立的淬灭电阻条然后与 APD 单元相连, 滨松、ON、FBK 等均采用此结构, 该结构由于淬灭电阻做在器件表面, 限制了几何填充因子, 具有一定的局限性。2010 年, 北京师范大学的 NDL 研制出利用 P 型硅外延层作淬灭电阻的 N on P 型 SiPM^[8], 由于淬灭电阻不在器件表面, 因此能够达到相对较大的几何填充因子, 很好地兼顾了高 PDE 与大动态范围。

文中介绍了 NDL 9 mm² EQR SiPM 的最新研究成果: 微单元尺寸为 15 μm 的器件 EQR15, 通过优化

器件设计和改进制作工艺, 相较以往微单元尺寸为 15 μm、有效面积为 1 mm² 的 EQR SiPM^[9], 实现了 DCR 的明显降低同时保持较高的 PDE, 更有利于 PET 等核医学诊疗技术的应用; 另外, 新研制出的微单元尺寸为 6 μm 的器件 EQR06, 较以往 EQR SiPM 动态范围更大, 同时保持了高 PDE 和较低的光学串扰率, 特别适合应用于高能射线的探测。

1 器件结构与实验原理

1.1 器件结构与工艺改进

EQR SiPM 的器件结构如图 1 所示, SiPM 在反向偏置下工作, 由少数子触发雪崩事件, 短波长光在硅中的吸收深度较浅, 且因硅材料中电子的碰撞电离系数及迁移率均大于空穴, 因此采用 P on N 的结构设计以

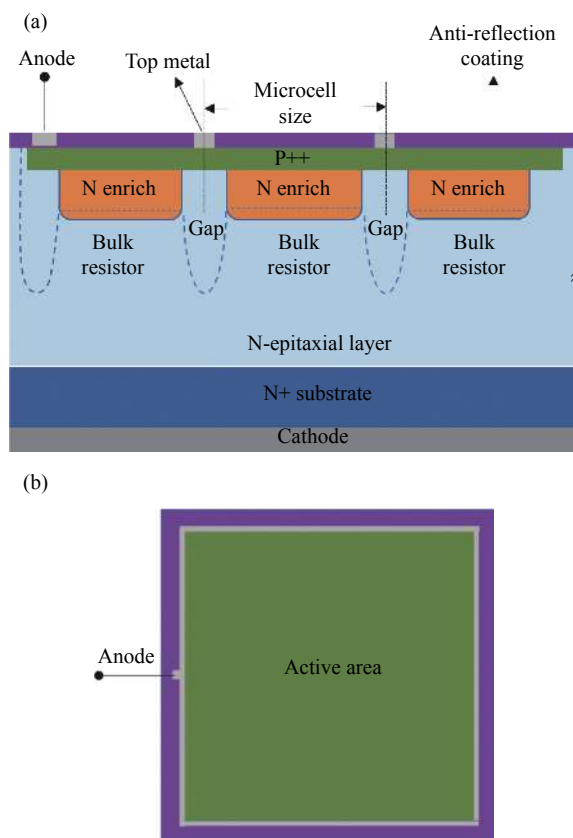


图 1 P on N 型 EQR SiPM 的结构示意图。(a) 剖面结构; (b) 平面结构

Fig.1 Structure diagram of P on N type EQR SiPM. (a) Profile structure; (b) Planer structure

增强器件对蓝紫光的探测灵敏度。器件表面重掺杂层 P++与分区注入的 N enrich 区形成微单元 PN 结, 结下方的 N 型外延层构成微单元淬灭电阻。由于外延层的掺杂浓度低于 enrich 区, 微单元间 Gap 区的耗尽区深度大于微单元 PN 结的耗尽区深度, 雪崩载流子将被限制在各自的微单元区域内, Gap 区形成微单元间的电学隔离, 最终信号通过公共电极输出。

EQR06 与 EQR15 结构的不同之处在于: 微单元尺寸分别为 6 μm 和 15 μm。两类器件微单元尺寸不同, 理论上特性的差别主要体现在直接串扰率 (direct crosstalk probability, P_{DICT})、PDE、增益。

EQR15-HE 与 EQR15-LE 的唯一区别在于 PN 结的峰值电场强度。为了降低 EQR15 SiPM 的 DCR, NDL 优化器件设计和制作工艺, 通过降低掺杂浓度降低 PN 结的峰值电场强度, 有效抑制了场致隧穿引起的暗噪声成分, 由 EQR15-HE 发展到 EQR15-LE, 从而降低了 EQR15 SiPM 的 DCR, 其他性能也获得优化。

1.2 实验装置及实验原理

SiPM 主要表征 I-V 特性、DCR、 P_{DICT} 、PDE、单光子分辨谱、增益, 以下特性无特殊说明外均为在 20 °C 下的实验结果。

Keithley SMU 对 SiPM 施加偏压, 暗条件下测电流得 I-V 曲线, 确定器件击穿电压 V_b 及最大过偏压 OV_{max} 。暗条件下, Keithley SMU 作为 SiPM 的偏置电源, 其输出信号经过跨阻放大器 (NDL AMP-40-1) 输入示波器, Labview 程序通过改变阈值测量计数率得到计数率随阈值的关系, 由阈值为 0.5 p.e. 处的计数率得到 DCR, 由阈值为 1.5 p.e. 处的计数率与阈值为 0.5 p.e. 处的计数率之比得到 P_{DICT} ^[10], 其中 1 p.e. 代表 SiPM 中单个微单元发生雪崩时的输出信号幅度。

PDE 是指一段时间内器件探测到的光子数与入射到器件表面的光子数之比。图 2 所示为 PDE 测试实验装置。图 2(a) 中采用函数发生器驱动 LED 产生脉冲光经窄带滤光片射入积分球, 积分球出射光分别照射在已定标响应度的 PIN 和待测 SiPM 上, SiPM 一端可通过加入衰减片以补偿 PIN 与 SiPM 的探测灵敏度差异, 采集 SiPM 输出信号, 根据泊松分布理论计算单次脉冲 SiPM 响应的平均光电子数 μ ^[11], 测量 PIN 的平均光电流 I_{PIN} , 根据公式 (1) 得到单次脉冲入射至 SiPM 表面的光子数 N_{in} :

$$N_{\text{in}} = \frac{I_{\text{PIN}} \cdot \lambda \cdot P_{\text{SiPM-PIN}}}{R \cdot h \cdot c \cdot f} \quad (1)$$

式中: λ 为光波长; R 为 PIN 的响应度; f 为入射光频率; h 为普朗克常量; c 为光速; $P_{\text{SiPM-PIN}}$ 反映 SiPM 与 PIN 位置处入射光功率的比例因子。 μ 与 N_{in} 的比值为器件在该波长下的绝对 PDE。

图 2(b) 中采用氙灯作光源经单色仪射入积分球, 采集 SiPM 的平均光响应计数率 N_L 、平均暗计数率 N_D 及 PIN 的平均光电流 I_{PIN} , 由此可得 PDE 随波长的相对变化关系为^[12]:

$$\text{PDE} = \frac{(N_L - N_D) \cdot R \cdot h \cdot c}{I_{\text{PIN}} \cdot \lambda \cdot P_{\text{SiPM-PIN}}} \quad (2)$$

将 PDE 随波长的相对变化关系归一化到基于泊松分布理论的某一波长下的绝对 PDE, 以此扣除关联噪声的影响, 修正后得到 PDE 随波长的变化关系^[11]。

采用脉宽为 100 ps 的激光器光源, 用示波器统计 SiPM 响应信号, 由此获得脉冲面积直方图即为单光子分辨谱, 通过相邻光子峰的平均面积差求得增益。

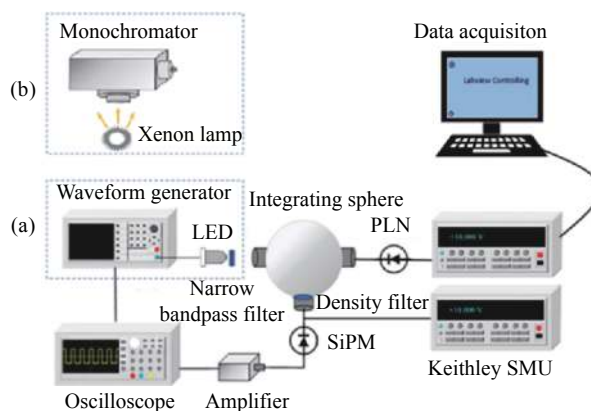


图 2 PDE 测试实验装置示意图

Fig.2 Experimental setup diagram of PDE measurement

2 器件特性与分析

2.1 I-V 特性

图 3 为以 EQR15-LE 为例的 EQR SiPM 的反向 I-V 曲线, 由直线拟合求交点得到击穿电压 V_b 及最大过偏压 OV_{max} ($OV_{\text{max}} = V_{\text{max}} - V_b$)。EQR15-HE、EQR15-LE、EQR06 的击穿电压分别为: 20.2、28、24.5 V, 最大过偏压分别为 7、10、10 V。

温度升高, 载流子的平均自由程变小, 击穿时的临界电场增大, 因此温度升高, V_b 增大, SiPM 偏置电

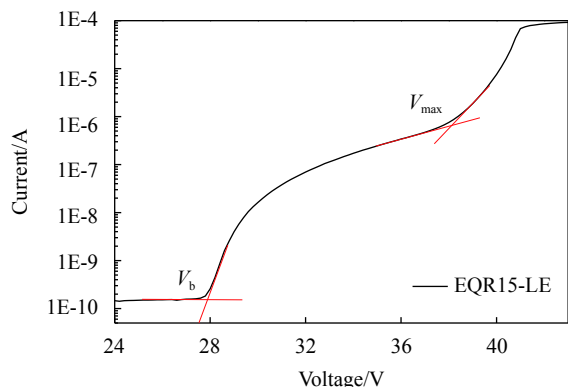


图 3 EQR SiPM 的反向 I-V 曲线
Fig.3 Reverse I-V curve of EQR SiPM

压不变的情况下过偏压降低,使得 SiPM 的特性发生改变。选取 $-30\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为温度区间,测试了 SiPM V_b 随温度的变化关系,通过拟合求斜率得到 V_b 的温度系数,EQR15-HE、EQR15-LE、EQR06 的温度系数分别为 16、28、23 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 DCR 与 P_{DiCT}

DCR 是指单位时间内非待测粒子触发的雪崩脉冲计数,很大程度上反映了 SiPM 的噪声水平,按照 DCR 的产生机制分成初始 DCR 及延迟关联 DCR。初始 DCR 主要来源于热激发、场致隧穿和中性区少子扩散^[13]。禁带中的产生复合中心辅助载流子实现带间跃迁,此为热激发部分 DCR 的产生机制,主要由器件中的杂质密度及温度高低决定。当耗尽区内电场很强时,载流子可以直接隧穿实现带间跃迁,此为场致隧穿部分 DCR 的产生机制,主要由耗尽区内电场决定。中性区少子扩散部分 DCR 的大小则与耗尽区边界的载流子浓度梯度有关。

如图 4(a) 所示为 DCR 随过偏压变化的关系图,对于 EQR15 来说,从 EQR15-HE~EQR15-LE,DCR 随过偏压的斜率降低,过偏压 $OV=7\text{ V}$ 时,DCR 由 $596\text{ kHz}/\text{mm}^2$ (EQR15-HE)降低到 $226\text{ kHz}/\text{mm}^2$ (EQR15-LE),DCR 得到显著降低。对于 EQR06,综合考虑器件整体信噪比,调制内部场强使得其在过偏压为 7 V 时,DCR 为 $240\text{ kHz}/\text{mm}^2$ 。

P_{DiCT} 反映了器件的光学串扰概率。如图 4(b) 所示为 P_{DiCT} 随过偏压变化的关系图,EQR15-LE 与 EQR15-HE 的 P_{DiCT} 随过偏压的变化趋势略有不同,EQR15-LE 在过偏压为 7 V 时, P_{DiCT} 为 11%。EQR06 相比 EQR15 器件的微单元面积小增益低,因此单次

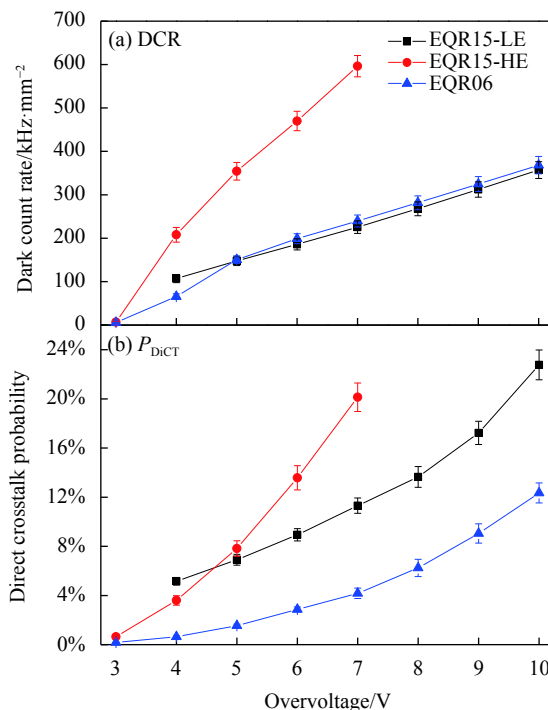


图 4 DCR 及 P_{DiCT} 随过偏压的关系
Fig.4 DCR and P_{DiCT} as a function of overvoltage

雪崩事件产生的平均串话光子少,DCR 几乎相同的情况下, P_{DiCT} 低,过偏压为 7 V 时,其 P_{DiCT} 仅为 4%。

2.3 PDE

如图 5 所示,首先测试 LED 由不同频率脉冲驱动下 PIN 与 SiPM 的响应光电流,以此确定探测器保持线性响应的实验条件。另外,为了防止由上一个 LED 周期内引发的 SiPM 的后脉冲被误认为下一个

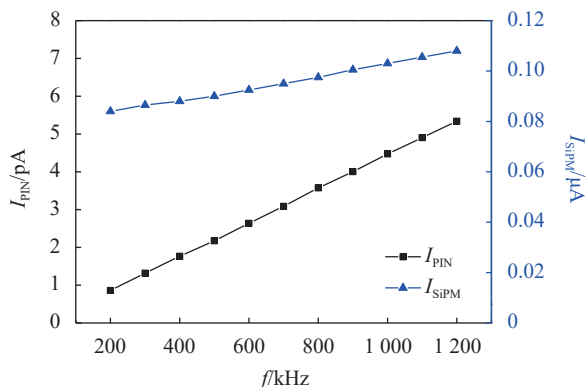


图 5 固定驱动电压及脉宽,PIN 及 SiPM 的光电流随 LED 驱动频率的关系 (SiPM 以 EQR15-LE @4 V 为例)
Fig.5 Fix driving voltage and pulse width, photocurrent of PIN and SiPM as a function of LED driving frequency, with EQR15-LE @4 V as an example

LED 周期的光响应事件^[12], 驱动频率的选取既要保证两器件的线性响应, 同时 LED 的脉冲驱动周期应大于 SiPM 的后脉冲时间常数。综合考虑, 文中实验选取驱动 LED 的脉冲频率为 1 MHz, 脉宽为 16 ns。

如图 6 所示是 EQR SiPM 在 420 nm 处基于泊松理论的 PDE 实验结果。EQR15-LE 的 PDE 稍低于 EQR15-HE, 过偏压为 7 V 时, PDE 为 46%。由于 EQR06 的几何填充因子比 EQR15 小, PDE 相对较低, 过偏压为 7 V 时, PDE 为 28%。

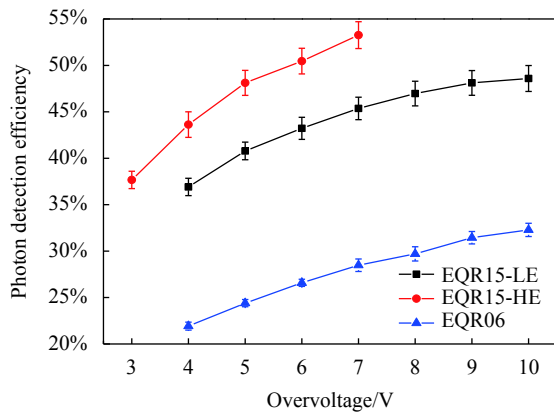


图 6 420 nm 处, PDE 与过偏压的关系

Fig.6 PDE as a function of overvoltage at 420 nm

随着偏压的增大, PDE 逐渐趋于饱和, 但 DCR 仍线性增加, 图 7 示出了器件在各自最佳推荐过偏压下, PDE 随波长的变化关系。如 1.2 节所述方式, 图中曲线为 PDE 随波长的相对变化关系归一化到 420 nm 的绝对 PDE 得到的 PDE 随波长的变化关系, 另外, 图中的散点为器件在 420、532 nm 处利用泊松统计理论

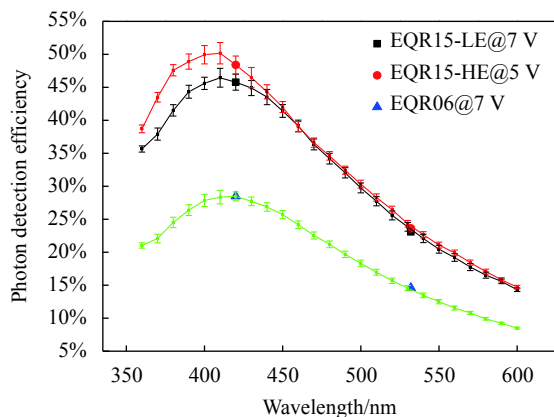


图 7 PDE 随波长的变化关系

Fig.7 PDE as a function of wavelength

测得的绝对 PDE。可看出利用此方式得到的 PDE 随波长变化关系在 532 nm 的 PDE 与在该波长下采用泊松统计得到的绝对 PDE 基本一致。峰值波长处, EQR15-LE 的 PDE 稍低于 EQR15-HE, 但是 450 nm 以上波段 PDE 差异很小。在 7 V 过偏压下, EQR06 峰值波长处 PDE 为 28%。

2.4 单光子分辨谱及增益

单光子分辨谱中第一个峰是指系统噪声贡献的基线峰, 第 n 个峰代表器件探测到 $n-1$ 个光子。SiPM 的输出信号正比于探测到的粒子数, 理想情况下, 器件发生一次雪崩倍增释放的电荷量是固定的, 因此相邻光子峰之间的差值为定值。事实上, 受增益的统计涨落及后脉冲等延迟关联噪声的影响, 每个峰都有一定的半高宽, 对于单光子谱而言, 峰谷比越好说明器件的信噪比越好, 光子数分辨能力越强。如图 8 所示, 在 83% OV_{max} 处, EQR15-LE 能够分辨 30 个光子,

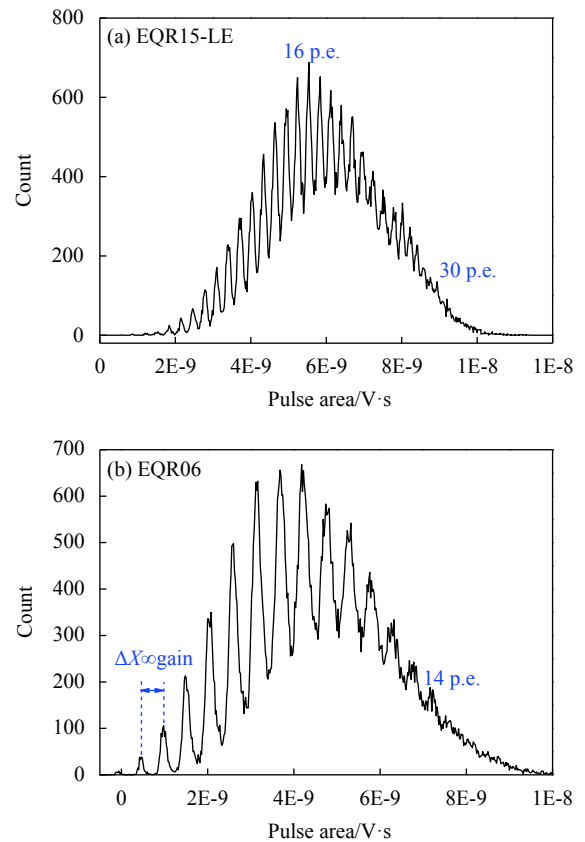


图 8 脉冲面积直方图。(a) EQR15-LE @83% OV_{max} ; (b) EQR06 series@80% OV_{max}

Fig.8 Histogram of pulse area. (a) EQR15-LE @83% OV_{max} ; (b) EQR06 series@80% OV_{max}

在 80%, OV_{max} 处 EQR06 能够分辨 14 个光子。

增益是指 SiPM 的一个微单元发生一次雪崩释放的电子空穴对数, 增益越大信号幅值越大, 器件的信噪比越好。单光子分辨谱中相邻峰间距正比于增益, 在不同过偏压下采集单光子分辨谱可得到增益随过偏压的变化。如图 9 所示为增益随过偏压的关系图, 与 EQR15-HE 相比, EQR15-LE 增益随过偏压的斜率降低, 过偏压为 7 V 时, EQR15-LE 的增益为 3.5×10^5 。由于 EQR06 器件微单元尺寸相对较小, 微单元等效电容低, 因此 EQR06 的增益较低, 过偏压为 7 V 时增益为 7×10^4 。

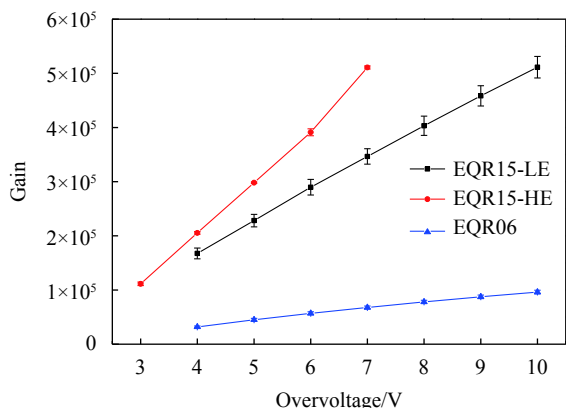


图 9 增益随过偏压的变化关系

Fig.9 Gain as a function of overvoltage

3 结果分析

3.1 EQR15 系列的改进

从 EQR15-HE~EQR15-LE, 通过工艺和设计优化, 器件特性取得一定改进:

(1) 场致隧穿部分的 DCR 正比于器件内部电场强度, 器件内部电场降低使得场致隧穿部分的 DCR 降低, 因此, DCR 随电场的斜率降低, 即 DCR 随过偏压的斜率降低。

(2) 电场强度的降低导致耗尽区宽度增大, 使得 SiPM 微单元的等效电容减小, 而增益正比于微单元等效电容及过偏压, 因此与 EQR15-HE 相比, EQR15-LE 增益随过偏压的斜率降低。两者温度系数的不同来源于耗尽区宽度的差异, 耗尽区宽度越大温度系数越高^[14], EQR15-LE 具有更高的温度系数。每 10^5 个穿过高场区的载流子平均会产生 3 个串扰光子^[15], 这

体现在对于单次雪崩事件而言, 增益越高产生的串扰光子越多。因此, EQR15-HE 与 EQR15-LE 增益及 DCR 随过偏压的变化趋势不同进而导致 P_{DiCT} 的不同。

(3) PDE 的大小由几何填充因子、量子效率、盖革效率决定。碰撞电离系数与电场呈指数关系且正相关^[15], 器件内部电场降低导致电子空穴的碰撞电离系数减小进而盖革效率降低, 影响 PDE, 这体现在短波长处 PDE 的降低。与此同时, 尽管盖革效率存在一定程度的降低, 但 PN 结峰值电场降低使得耗尽区展宽, 更深吸收长度的长波长光子量子效率反而提升, 因此, 长波长处 PDE 改变很小。

3.2 NDL 与滨松、FBK SiPM 特性比较

表 1 为 NDLEQR15-LE 与滨松同类型 S14160-3015 PS^[5] 的主要参数, 两类器件具有相同的有效面积及微单元尺寸。两器件的动态范围近似一样, EQR SiPM 的器件结构使得其几何填充因子更高, 因而器件在各自的推荐偏压下 (V_{op}), EQR SiPM 有更优 PDE。EQR SiPM 与 MPPC 的增益相近, 只是其 DCR 及 P_{DiCT} 不及 MPPC。EQR SiPM 的结电容远小于 MPPC, 意味其输出信号脉宽更窄, 在高计数率应用中, 脉冲堆叠现象的影响会比 MPPC 小。

FBK 于 2018 年报道出微单元尺寸为 $5 \mu\text{m}$ 、微单元密度高达 $46190 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 的超高密度 UHD SiPM^[6], 在接近 6 V 的工作条件下, 增益约为 1.8×10^5 , 在 545 nm

表 1 NDL 与滨松 SiPM 的主要特性参数对比

Tab.1 Main characteristic parameters comparison between NDL and HAMAMATSU SiPM

Research institute	HAMAMATSU	NDL
Series	S14160-3015 PS	EQR15 11-3030 D
Active area/ mm^2	3.0×3.0	3.0×3.0
Microcell size/ μm	15	15
Microcell number	39984	40000
Breakdown voltage (V_b)/V	38 ± 3	28 ± 0.2
Recommended operating voltage (V_{op})/V	$V_b + 4$	$V_b + 7$
Photon detection efficiency (PDE) @ V_{op}	$32\% @ 460 \text{ nm}$	$46\% @ 410 \text{ nm}$
Gain @ V_{op}	3.6×10^5	3.5×10^5
Dark count rate (DCR) @ V_{op}	Typical: 700 kHz	Typical: 2 000 kHz
Crosstalk probability @ V_{op}	<1%	11%
Terminal capacitance/pF	530	48

处, PDE 约为 12%, 但 DCR 高于 800 kHz/mm²。与其相比, EQR06 SiPM 微单元密度低于 UHD SiPM, 在推荐过偏压处, 增益为 7×10^4 , 峰值波长处 PDE 为 28%, DCR 约为 240 kHz/mm², 整体特性优于 FBK 微单元尺寸为 5 μm 的 UHD SiPM。

4 结 论

NDL 最新的研究成果包括 EQR15 3030 D 的改进及 EQR06 3030 D 新系列的研制。EQR15 系列通过优化设计和工艺改进降低 PN 结的峰值电场强度, DCR 得到显著降低, 环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 、过偏压为 7 V 时, DCR 的典型值为 226 kHz/mm²、峰值 PDE 为 46%。另外, 研制出的超高微单元数目的 EQR06 3030 D 系列 SiPM, 兼顾了高 PDE 与大动态范围, 适合高能物理方面的应用。

参考文献:

- [1] Nagai A, Alispach C, Volpe D D, et al. SiPM behaviour under continuous light [J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(12): P12016.
- [2] Gundacker S, Heering A. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector [J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2020, 65(17): 17TR01.
- [3] Gola A, Acerbi F, Capasso M, et al. NUV-sensitive silicon photomultiplier technologies developed at fondazione bruno kessler [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 308.
- [4] Simon F. Silicon photomultipliers in particle and nuclear physics [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926: 85-100.
- [5] Hamamatsu. S14160-3015PS: Low breakdown voltage, wide dynamic range type MPPC with small pixels[EB/OL]. [2021-09-12]. https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S14160-3015PS.html
- [6] Acerbi F, Gola A, Regazzoni V, et al. High efficiency, ultra-high-density silicon photomultipliers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 1-8.
- [7] Acerbi F, Paternoster G, Capasso M, et al. Silicon photomultipliers: technology optimizations for ultraviolet, visible and near-infrared range [J]. *Instruments*, 2019, 3(1): 15.
- [8] Zhang G Q, Hu X B, Hu C Z, et al. Demonstration of a silicon photomultiplier with bulk integrated quenching resistors on epitaxial silicon [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 621(1-3): 116-120.
- [9] Liu Hongmin, Long Jinyan, Dai Lei, et al. Research progress of large dynamic range silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 535-541. (in Chinese)
- [10] Nagai A, Alispach C, Barbano A, et al. Characterization of a large area silicon photomultiplier [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 948: 162796.
- [11] Eckert P, Schultz-Coulon H C, Shen W, et al. Characterisation studies of silicon photomultipliers [J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2010, 620(2): 217-226.
- [12] Zappalà G, Acerbi F, Ferri A, et al. Set-up and methods for SiPM Photo-Detection Efficiency measurements [J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(8): P08014.
- [13] Serra N, Ferri A, Gola A, et al. Characterization of new FBK SiPM technology for visible light detection [J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, 8(3): P03019.
- [14] Piemonte C, Gola A. Overview on the main parameters and technology of modern Silicon Photomultipliers [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926: 2-15.
- [15] Fa A, Sgb C. Understanding and simulating SiPMs [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926: 16-35.