

doi: 10.3788/gzxb20174604.0404001

# 高密度外延电阻淬灭硅光电倍增器研究

贾建权<sup>1,2</sup>, 江加丽<sup>1,2</sup>, 李佰成<sup>1,2</sup>, 王瑞恒<sup>1,2</sup>, 梁琨<sup>1,2</sup>, 杨茹<sup>1,2</sup>, 韩德俊<sup>1,2</sup>

(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 北京市辐射中心, 北京 100875)

**摘 要:** 针对表面淬灭电阻技术引起死区面积较大, 以及高光子探测效率与大动态范围不能同时满足的矛盾, 应用外延电阻淬灭技术, 采用与雪崩光电二极管微单元相连的衬底外延层硅材料制作了淬灭电阻。研制成功的外延电阻淬灭硅光电倍增器的有源区面积为  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ , 微单元尺寸为  $7 \mu\text{m}$ , 微单元密度高达  $21\,488 \text{ 个/mm}^2$ , 测试结果表明: 漏电流为 10 量级, 反向击穿电压为 24.5 V, 过偏压为 2.5 V 时, 增益达  $1.4 \times 10^5$ , 室温下暗计数率约为  $600 \text{ kHz/mm}^2$ , 串话率低于 10%, 说明该器件具有良好的光子计数特性。该高密度硅光电倍增器测量的动态范围是  $1.8 \times 10^4 \text{ 个/mm}$ , 光子探测效率为 16% ( $@\lambda_{\text{peak}} = 480 \text{ nm}$ ), 恢复时间为 8.5 ns, 单光子分辨能力较高, 并且在液氮温度环境能够探测光子, 这对于拓展硅光电倍增器在极低温度条件下的应用, 比如暗物质测量实验方面具有潜力。

**关键词:** 光子探测器; 硅光电倍增器; 外延电阻淬灭; 动态范围; 光子探测效率

中图分类号: TN36

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0404001-7

## Research on High Micro Element Density Silicon Photomultiplier Based on Epitaxial Quenching Resistance

JIA Jian-quan<sup>1,2</sup>, JIANG Jia-li<sup>1,2</sup>, LI Bai-cheng<sup>1,2</sup>, WANG Rui-heng<sup>1,2</sup>,

LIANG Kun<sup>1,2</sup>, YANG Ru<sup>1,2</sup>, HAN De-jun<sup>1,2</sup>

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

(2 Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In view of the large area of dead zone caused by the surface quenching and the contradiction between the dynamic range and the detection efficiency. By applying the epitaxial resistance quenching technology, the quenching resistance was prepared by using a substrate epitaxial layer of silicon material connected with the Avalanche Photo Diode (APD) unit. The developed Silicon Photomultiplier (SiPM) with the active area of  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  is called F5-2 which micro cell size is  $7 \mu\text{m}$  and the density of the micro element is as high as  $21\,488 \text{ cells/mm}^2$ . The breakdown voltage is 24.5 V; the leakage current is on 10 pA; the gain is  $1.4 \times 10^5$ ; the dark count rate is about  $600 \text{ kHz/mm}^2$  and the crosstalk rate is about 10% at room temperature over bias 2.5 V; the dynamic range is about  $1.8 \times 10^4 \text{ cells/mm}^2$  and the Photon Detection Efficiency (PDE) peak value @480 nm is 16%; the recovery time is about 8.5 ns. The device has good characteristics of photon counting on account of the better single photon resolution ability. Moreover it can detect photons at the liquid nitrogen temperature which has a great potential for expanding SiPM applications such as dark matter measurements at very low temperatures.

**Key words:** Photon detector; Silicon photomultiplier; Epitaxial quenching resistance; Dynamic range; Photon detection efficiency

**OCIS Codes:** 040.0040; 040.1345; 040.3780; 040.5160

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61534005)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2014KJJC05)资助

第一作者: 贾建权(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件物理. Email: 1107509582@qq.com

导师(通讯作者): 梁琨(1975-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体器件与物理. Email: lk@bnu.edu.cn

收稿日期: 2016-10-12; 录用日期: 2016-12-16

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光子检测广泛应用于微弱荧光测量、量子通信技术、高能物理学、激光测距等领域. 目前主要的弱光探测器是光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)和硅光电倍增器(Silicon Photomultiplier, SiPM). PMT 的增益大、检测灵敏度高,但是价格昂贵、制造复杂、体积大、工作电压和功耗高、容易损坏、探测效率受光阴极限制,对磁场敏感等缺点限制了它的应用范围. SiPM 拥有响应速度快、增益大等传统 PMT 的优点,并且体积小,功耗低,制作简单,对磁场不敏感,还具有良好的单光子分辨能力以及较宽的动态范围,同时 SiPM 反应灵敏,时间特性更好,近些年已成为高速光子计数及多光子检测等领域的最佳选择之一. 随着 SiPM 的工艺结构及各项特性不断成熟与完善,不仅在 DNA 检测、荧光检测和喇曼测量<sup>[1]</sup>中得到应用,在天体物理、高能物理、生物医学等领域, SiPM 也逐步开始取代 PMT.

SiPM 普遍采用位于探测器表面的多晶硅条作为雪崩淬灭电阻,从而微单元雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)光敏区之间的“死区”占据了探测器较大的面积,导致 SiPM 的探测效率与动态范围很难兼顾. 北京师范大学新器件实验室(New Device Laboratory of Beijing Normal University, NDL)研发的外延电阻淬灭 SiPM,采用与 APD 微单元相连的衬底外延电阻代替一般位于表面的多晶硅条,来控制 APD 单元的雪崩淬灭和电压恢复. 这种结构避免了表面淬灭电阻及互连铝线对器件几何因子的影响,减小了器件表面“死区”面积,而且单元之间的间隔能做得更小,因此 APD 微单元密度进一步提高,而且它的工艺简单,成本降低,是当今有代表性的 SiPM 器件结构之一<sup>[2]</sup>. 此外,加拿大 Zecotek 公司采用掩埋 PN 结结构,利用载流子的负反馈效应实现 APD 单元的雪崩淬灭,能够制备高动态范围的 SiPM,然而其工艺复杂,成本偏高<sup>[3]</sup>.

研究 SiPM 高光子探测效率与大动态范围优化在实际应用中具有重要意义. SiPM 微单元密度偏低容易导致其在较低的光子计数输出就达到饱和,即线性响应区过窄. 对于大多数应用,在保证探测效率的前提下,都希望实现更大的动态范围. 例如正电子发射断层影像(Positron Emission Computed Tomography, PET)技术对光子探测器的探测效率及像素分辨率同时有较高要求,后者与探测器的微单元密度相关<sup>[4]</sup>. 近年来,一些大型高能物理实验研究对 SiPM 性能也提出了更高要求<sup>[5]</sup>. 欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)为 COMPASS 实验设计了一种新型的强子量热计(Hadron calorimeter, HCAL),光强由 SiPM 读出<sup>[6]</sup>. 当热处理的每个脉冲有超过上万个光子时,单元密度较低的探测器会过早的出现饱和,造成大量信息遗漏,而大动态范围的探测器就能够获得更丰富更完整的信息. 因此,高微单元密度 SiPM 的研究价值十分重要.

NDL 成功研制了 APD 微单元密度高达  $21\ 488$  个/ $\text{mm}^2$  的高密度外延电阻淬灭 SiPM. 本文报道了器件的光电响应特性表征结果,测量器件动态范围为  $1.8 \times 10^4$  个/mm,光子探测效率为  $16\%$  ( $@\lambda_{\text{peak}} = 480\ \text{nm}$ ),恢复时间为  $8.5\ \text{ns}$ , SiPM 有良好的单光子分辨能力,在液氮温度下能探测光子.

## 1 SiPM 器件结构

图 1 为外延电阻淬灭 SiPM 的纵向结构. P 型衬底硅材料上外延层厚度约为  $300\ \mu\text{m}$ ,通过选择性注入形成 P-enriched 区,它与高掺杂的 N++ 区形成 P-N 结, P-enriched 区之间为深耗尽区,将 APD 微单元隔离

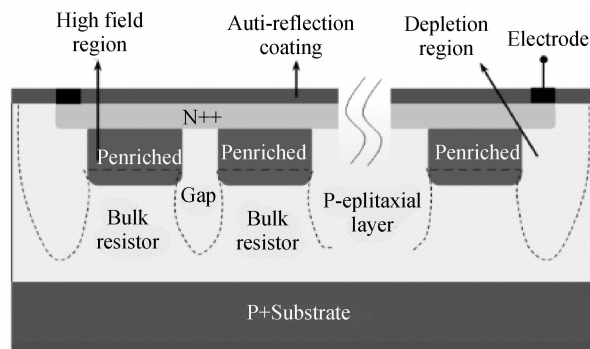


图 1 NDL 外延电阻淬灭 SiPM 纵向结构

Fig. 1 Schematic structure of the SiPM with Epitaxial quench resistance developed by NDL

开,在 P-enriched 区下方的硅外延层构成淬灭电阻,表面 N++ 层作为共同的阳极从各 APD 微单元收集信号输出<sup>[7]</sup>.

图 2 是 F5-2 型外延电阻淬灭 SiPM 器件的照片,其有源区面积为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ,微单元 APD 的直径为 $5 \text{ }\mu\text{m}$ ,最小间距为 $2 \text{ }\mu\text{m}$ ,单元密度高达 $21\,488 \text{ 个}/\text{mm}^2$ ,填充因子为 $40\%$ ,是至今已经报道 SiPM 为数较少的高密度器件之一.

目前,地下实验室用来直接探测暗物质其中一个方式是用惰性液体,当暗物质粒子与液体中的原子发生反应后产生光子,可以通过探测这些光子来检测暗物质.为了研究极低温度下 SiPM 的工作特性,考虑外延层淬灭电阻在低温时阻值下降对雪崩效应淬灭效果的影响,通过改变工艺参量,调整外延淬灭电阻的阻值约为 $400 \text{ k}\Omega$ ,相比于之前报道器件淬灭电阻阻值提高一倍,以确保 SiPM 在低温环境工作的可行性.在极低温度探测弱光,将有望实现 SiPM 应用在暗物质的测量研究中<sup>[8]</sup>.

## 2 器件表征测试系统

SiPM 器件的基本特性对于其不同领域应用具有极高的参考意义,如动态范围、光子探测效率、恢复时间等,而完善的测试系统可以保证器件特性表征的准确性.新器件实验室所搭建的表征系统经过不断研究优化,利用探针台、快速数字示波器、信号放大器、单色仪,以及脉冲激光等仪器,针对 I-V 特性、暗脉冲特性、光响应特性、时间相关特性等进行可靠性测量.如利用探针台测量器件的 I-V 特性,观察曲线的一致性,初步判定器件的漏电情况、击穿特性等,分析工艺的可靠性.再者测量应用衰减片,改变不同衰减倍数组合,在同一测量系统中,可以控制光强,从而得到器件弱光下单光子分辨能力与强光下的动态范围.再如,应用数字示波器对器件脉冲进行函数计算,统计脉冲幅值面积,测量响应信号的相关时间特性等.使用 100 倍高速前置放大器(HAS-Y-2-40)测量得到脉冲半宽约为 $7 \text{ ns}$ ,幅值为 $45 \text{ mV}$ .

图 3 为 SiPM 动态范围测量装置.采用超连续谱光源 SC-Pro(OYSL-Photonics)作为脉冲光源,确保足够光强以及测量光子到达器件表面的同时性;采用不同的衰减片组合方便调节入射光强;采用 WDM1-3 光栅单色仪(Monochromator)保证入射光波长一致性,消除不同能量光子的影响;透镜的作用是发散光束,让光子尽可能均匀分散地照射在器件表面;数字示波器(LeCroy WaveRunner 610Zi)负责记录 SiPM 光响应脉冲面积.测量时 SiPM 的过偏压保持不变,首先由微弱光照,测量 SiPM 单倍光脉冲信号面积,然后通过改变衰减片组合,逐渐增强入射光并测出相应的光脉冲信号面积,再与单倍脉冲面积相比,所得比值即可视作不同数量光子入射下 SiPM 中响应的微单元总数.该系统在弱光条件下还可以测量器件的单光子分辨谱,进而求出不同过偏压下器件的增益.

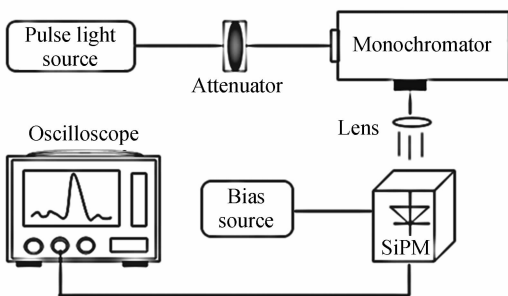


图 3 动态范围测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic range measuring device

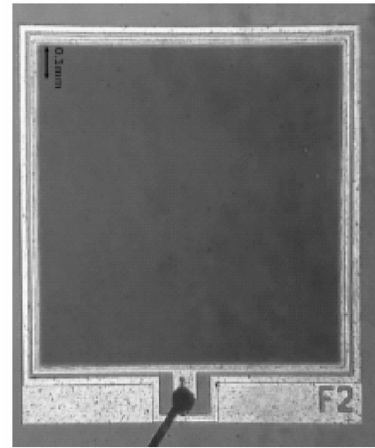


图 2 F5-2 外延电阻淬灭 SiPM 器件

Fig. 2 NDL F5-2 epitaxial resistance quenching SiPM device diagram

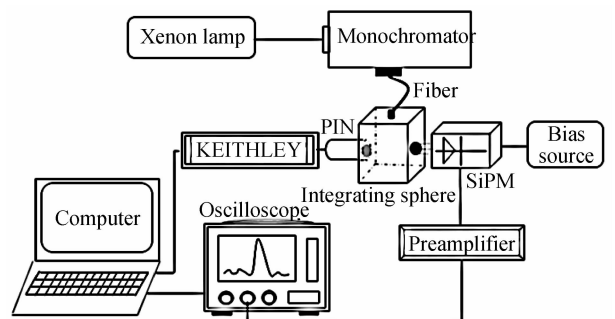


图 4 PDE 测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PDE measuring device

图4为采用随机光子计数法测量器件光子探测效率(Photon Detection Efficiency, PDE)的装置示意图. 氙灯(Zolix LSH-X 150)发出连续光经过可调单色仪, 利用光纤连接至积分球, 确保输出至 SiPM 与 PIN 的光强相同. PIN(Positive-intrinsic-Negative junction)响应光电流经 Keithley 237 读出输入计算机, 同时 SiPM 的光响应信号的计数率由示波器(Tektronix TDS 1012)读出输入计算机. 最后根据式(1)计算 SiPM 的光子探测效率, 即

$$\text{PDF} = \frac{(\text{CR} - \text{DCR}) \cdot R \cdot h \cdot c}{(I_{\text{total}} - I_{\text{dark}})} \times \frac{A_{\text{PIN}}}{A_{\text{SiPM}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: DCR 是 SiPM 不加光时 0.5p. e. 阈值的暗计数率; CR 为相同触发阈值 SiPM 的光计数率;  $R$  为 PIN 对不同波长光响应度;  $I_{\text{total}}$  是 PIN 的光电流,  $I_{\text{dark}}$  是 PIN 的暗电流;  $A_{\text{PIN}}$  是 PIN 的有效光照面积,  $A_{\text{SiPM}}$  是 SiPM 的有效光照面积.

### 3 结果与讨论

采用以上测试系统对 F5-2 型号 SiPM 器件特性进行表征. 根据  $I$ - $V$  特性、暗脉冲、暗计数率等结果反馈工艺参量及制备的可靠性. 动态范围、PDE、恢复时间、单光子分辨谱以及温度特性等的表征可以反映出器件的工作性能, 为后续的应用提供依据.

#### 3.1 $I$ - $V$ 特性分析

图5为室温下 F5-2 SiPM 无光照时反向直流  $I$ - $V$  特性曲线. 反偏压较低时, 器件漏电流十分小( $10^{-11}$  A 量级), 主要由表面漏电贡献. 当反向偏压高于雪崩临界击穿电压(24.5 V), 热激发载流子在内建高场区触发雪崩效应, 使电流迅速增加; 在外延电阻的淬灭作用,  $I$ - $V$  曲线出现缓变部分; 当偏压高于最大工作电压(27.5 V), 淬灭电阻失效, 电流急速增大. 最大工作电压与雪崩击穿电压之差等于 3 V, 给出了 SiPM 的工作电压范围, 即最大过偏压.

实际使用时环境温度波动对 SiPM 特性带来影响, 会改变工作电压. 随着环境温度的降低, 半导体晶格的热振动减弱, PN 结的阻挡层变宽, 载流子运动的平均自由路程增长, 在与原子碰撞前由外加电场加速获得的能量增大, 因此碰撞而产生电离的机会增加, 雪崩式撞击的概率增大. 在这种情况下, APD 更加容易发生雪崩击穿, 即雪崩临界电压  $V_b$  减小, 故 SiPM 的雪崩临界电压随着环境温度的降低而降低<sup>[9]</sup>. 如图6, F5-2 SiPM 的雪崩临界击穿电压以及最大过偏压随着温度的降低逐步降低, 击穿电压温度变化系数约为 24 mV/°C. 该器件对温度的敏感系数较低, 因此有较宽适用范围.

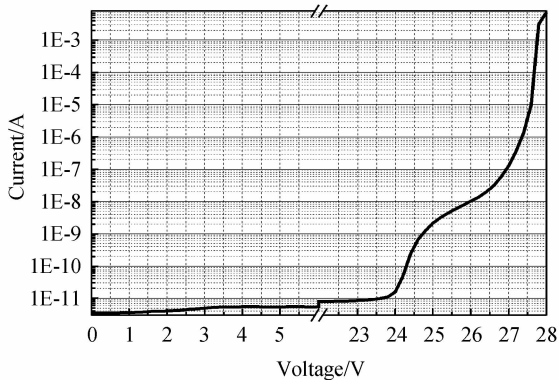


图5  $I$ - $V$  曲线  
Fig. 5  $I$ - $V$  curve

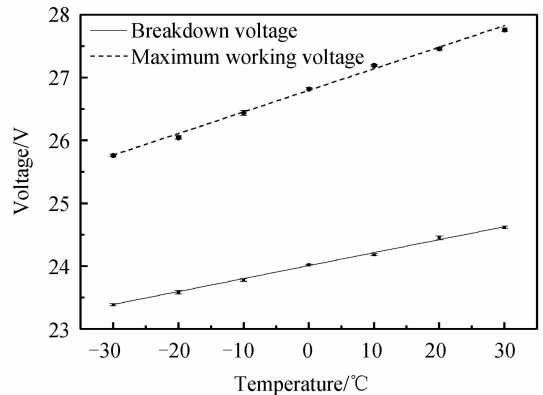


图6 雪崩临界击穿点、最大工作电压温度特性  
Fig. 6 The temperature characteristics of the critical breakdown point and the maximum operating voltage

#### 3.2 暗计数率

暗计数率较高一直是限制 SiPM 在随机弱光探测领域应用的主要障碍之一. 热激发载流子是引起暗计数率的主要原因, 其随温度降低呈指数降低, 因此降低温度和提高阈值是解决此问题的有效手段. 图7为过偏压 2.5 V 时, SiPM 的暗计数率随着温度降低呈指数型减小.

图8为室温下测量 F5-2 SiPM 器件暗计数率与阈值之间的关系. 定义光学串话率为阈值设置在 1.5p. e.

与0.5p.e.时暗计数率的比值.1.5 V过偏压下,阈值为8 mV时,暗计数率为350 kHz,光学串话率仅1.5%;2.5 V过偏下,阈值为10 mV,暗计数率为600 kHz,光学串话率增至10%.光学串话率与APD微单元间隔以及过偏压相关,过偏压越大,高场区粒子获得能量越多,越容易发生雪崩,因此容易发生光学串话效应.

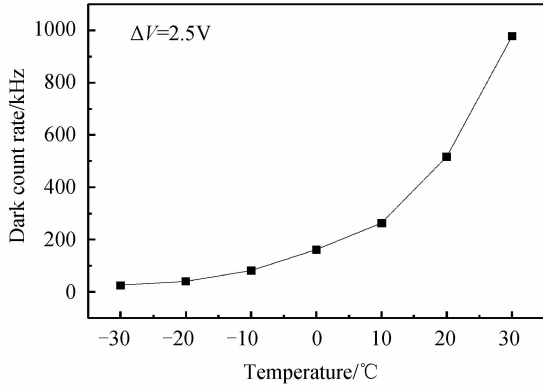


图7 暗计数率温度特性图

Fig. 7 The DCR versus temperature at over-voltage of 2.5 V

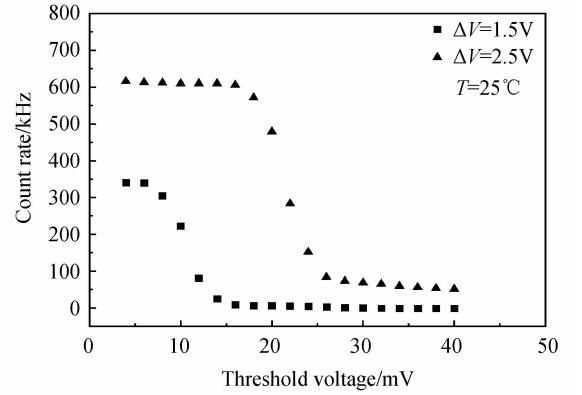


图8 室温下暗计数率与阈值之间的关系图

Fig. 8 DCR at different threshold levels at over-voltage of 1.5 V and 2.5 V at 25 degrees Celsius

### 3.3 光子探测效率

图9为使用随机光子计数法测得F5-2 SiPM器件的光子探测效率.该方法可以有效地消除光学串话以及后脉冲的影响<sup>[10]</sup>,测量条件为室温,过偏压为3 V,测量波长从360 nm到600 nm.从图可得,器件在光波长480 nm处响应最佳,最大PDE约为16%.在理论上有  $PDE(V, \lambda) = QE \cdot \epsilon \cdot P_{trigger}$ <sup>[11]</sup>,即PDE与量子效率、盖革效率以及几何因子有关.SiPM器件在设计时,可通过提高表面减反膜质量以及减薄上方重掺杂层厚度来提高量子效率,或者增加APD探测有效面积的占比,以此提高几何因子等,最终提高PDE.然而APD有效面积的提高直接降低微单元密度,导致器件动态范围降低,F5-2器件缓减了两者之间的矛盾.载流子引发雪崩的几率  $P_{trigger}$  与载流子在探测器内产生的位置和高场区的场强有直接的关系,电场越大,引发雪崩的几率就越高,PDE则会越大,从图可知该器件随着过偏压不断增加,在波长为480 nm处的PDE符合理论情况,PDE值也在逐步增加.

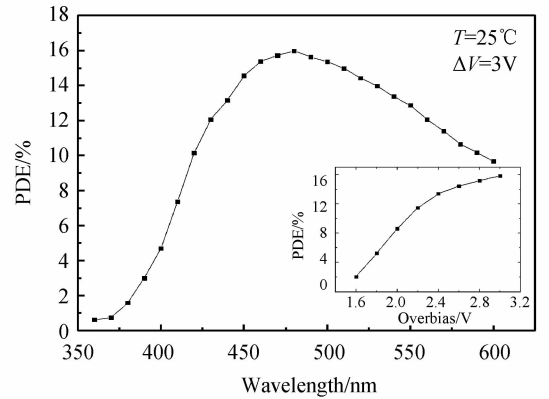


图9 PDE与光波波长的关系

Fig. 9 PDE versus wavelength at over-voltage of 3 V at 25 degrees Celsius

本文研究了SiPM在液氮温度下的光子探测性能.将F5-2 SiPM器件置于实验室搭建的低温测试系统中,器件工作在 $\sim 79$  K.无光照时增加偏压至击穿点,示波器上可观察到明显暗脉冲,暗计数率约为100 Hz.保持偏置条件,脉冲光照射器件,较弱光强下器件输出脉冲计数率增至1.5 kHz,并且脉冲幅值随着光强的增加持续增加,示波器显示相邻脉冲间隔与光源发射的脉冲光时间差相符,证明SiPM器件在液氮温度下有光响应.极低温度条件下器件的具体特性表征及暗物质测量可行性研究目前仍在进行.

### 3.4 动态范围

随着入射到SiPM器件表面的入射光强度的增加,被接收的入射光子激发并正常响应的APD才会对采集信号有贡献,当雪崩脉冲信号出现平台时,APD的响应数目达到最大,此时为器件的动态范围.理论上平均激发的单元数和一个窄脉冲入射的平均光子数的关系为<sup>[12]</sup>

$$N_{fired} = N_{total} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-N_{seed}}{N_{total}}\right) \right] \quad (2)$$

式中, $N_{seed}$ 是指入射到器件表面有源区有能力触发雪崩效应的平均光子数, $N_{fired}$ 为响应微单元数.入射光子

数较少时,响应 APD 单元数目呈线性增加,达到一定程度后,二者偏离线性关系,最终呈现饱和状态.对 F5-2 SiPM 的实验结果如图 10. 考虑实验数值计算以及测量系统的误差,包括光脉冲的均匀性以及器件存在未能正常工作 APD 微单元等因素,实验值与理论计算出现了一定偏差. 测量高密度 F5-2 SiPM 动态范围高达  $1.8 \times 10^4 / \text{mm}^2$ , 线性光响应区可达 7 500. 这种兼有高动态范围及良好光子探测效率的 SiPM, 在大型高能物理实验研究、闪烁体耦合探测荧光以及 PET 高分辨图像系统中具有优势和潜力.

### 3.5 单光子分辨谱

SiPM 的单光子分辨能力优于 PMT, 而且弱光条件下光子激发单元数与输出脉冲信号成比例, 使得 SiPM 具有光子计数能力.

图 11 为 F5-2 SiPM 器件的单光子分辨谱图, 能够清晰分辨的光子数目在 13 个以上. 图中的脉冲峰离散且等距, 峰谷比好, 说明 APD 微单元一致性较好. 雪崩 APD 微单元发生一次雪崩所释放的载流子数目定义

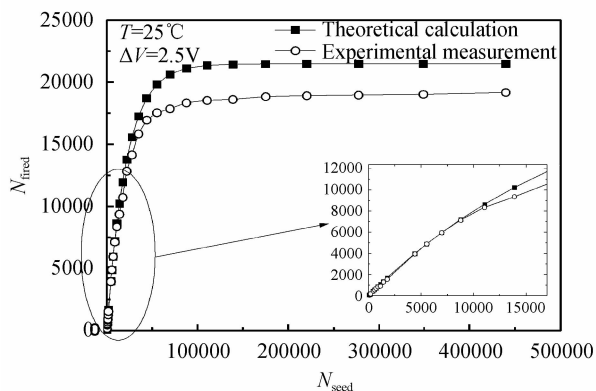


图 10 动态范围

Fig. 10 Fired cells number versus incident intensity at over-voltage of 2.5 V at 25 degrees Celsius

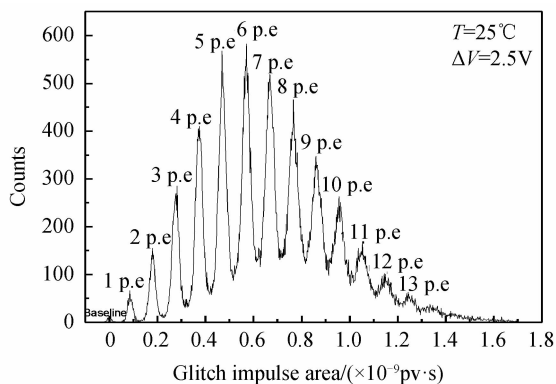


图 11 单光子分辨谱图

Fig. 11 Pulse area spectrum of very low intensity light pulse at over-voltage of 2.5 V at 25 degrees Celsius

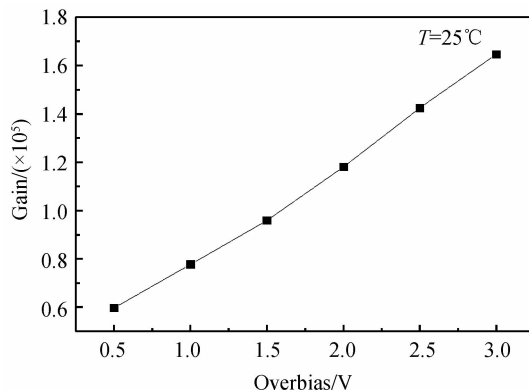


图 12 增益-过偏压关系图

Fig. 12 Gain versus Overbias at 25 degrees Celsius

为 SiPM 的增益. 在单光子谱图中, 相邻峰值对应脉冲面积差值即为 APD 微单元一次雪崩所释放的电荷数. 图 12 是测量器件的增益随过偏压增加的结果, 这符合增益的定义, 即

$$\text{Gain} = \frac{Q_{\text{pixel}}}{e} = \frac{C_{\text{pixel}} (V_{\text{bias}} - V_{\text{b}})}{e} \quad (3)$$

增益和微单元的结电容以及过偏压成正比. 因此, 为了得到较大的增益, 可以把微单元尺寸做大, 或者提高过偏压. 但是微单元尺寸增大将导致微单元密度降低, 牺牲了动态范围; 而过偏压高可能使暗计数率大大增加, 影响弱光信号的探测. 因此应该考虑 SiPM 合适的工作电压, 兼顾增益和暗计数率以及动态范围等方面的要求.

### 3.6 恢复时间特性

器件的恢复时间也是 SiPM 应用的重要指标, 恢复时间较大的器件在高频信号探测会受到限制. 图 13 为室温下器件采用双光脉冲法测量所得恢复时间拟合图. 根据拟合公式  $y = 1 - e^{-x/\tau}$  [12] 可得恢复

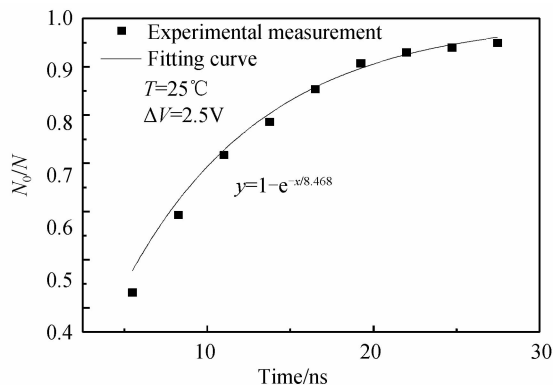


图 13 恢复时间拟合曲线

Fig. 13 The fitting figure of recovery time at over-voltage of 2.5 V at 25 degrees Celsius

时间  $t \approx 8.5 \text{ ns}$ .

## 4 结论

利用外延电阻淬灭技术,NDL 新器件实验室所研发的 SiPM 可以将 APD 微单元尺寸缩小到  $7 \mu\text{m}$ ,填充因子约为 40%. 经测量表征分析,该器件的动态范围可达  $1.8 \times 10^4$  个/ $\text{mm}^2$ ,最大 PDE(波长 480 nm)为 16%,同时依旧有着良好的单光子分辨能力以及较高的增益,室温下过偏压 2.5 V 时的暗计数率约为 600 kHz/ $\text{mm}^2$ ,特性满足基本应用需求,同时在极低温度下淬灭电阻正常工作,器件也有光响应特性. 综上所述,NDL 最新研发的高密度 F5-2 型号的 SiPM,有较好的光子检测特性,有望在荧光测量、多光子探测、高能物理、天体物理及医学成像等领域逐步取代 PMT,同时为极低温度应用 SiPM 探测暗物质提供了可能.

## 参考文献

- [1] HUANG Min-min, ZHU Xing-long. Development and application of silicon photodetector[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2011, (6):203-205.  
黄敏敏,朱兴龙. 硅光电探测器的发展与应用[J]. 机械工程与自动化, 2011, (6):203-205.
- [2] HAN De-jun, ZHANG Guo-qing, HU Xiao-bo, et al. Study on a novel Silicon photomultiplier and its application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**: 23-26.  
韩德俊,张国青,胡小波,等. 一种新结构硅光电倍增器(SiPM)及其应用研究[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**: 23-26.
- [3] SADYGOV Z, OLSHEVSKI A, CHIRIKOV I, et al. Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometer, Detectors and Associated Equipment*, 2006, **567**(1): 70-73.
- [4] MUSIENKO Y, Studies of large dynamic range silicon photomultipliers for the CMS HCAL upgrade[C]. NDIP, 2011, **8**: 7.
- [5] LI Yong-zheng, CHENG Yue, WANG Kai-jun, et al. Quality control of the sipm in the application of large HEP experimets[C]. NED, 2012: 335-338.  
李永正,程岳,王凯君,等. 应用于大型高能物理实验的硅光电倍增器(SiPM)及其质量控制研究[C]. 第十六届全国核电子学与核探测技术学术年会, 2012:335-338.
- [6] CHEN Zong-de, WANG Yue, LI Cheng-hui, et al. Research of SiPM in PET application[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, **48**(Z1): 650-654.  
陈宗德,王玥,李晨晖,等. PET 应用中的硅光电倍增器研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(Z1): 650-654.
- [7] YU Zhao-huan, CHEN Jing-kun, YAO Dao-xin, et al. Status of dark matter direct detection experiments[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2012, **51**(3): 1-5.  
余钊焕,陈璟锷,姚道新,等. 暗物质直接探测实验现状[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, **51**(3): 1-5.
- [8] DAI Ze, QUAN Lin, CHENG Xiao-lei, et al. Temperature characteristic analysis and experimental study of SiPM[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2015, **34**(3): 298-302.  
戴泽,全林,程晓磊,等. 硅光电倍增探测器温度特性分析与实验[J]. 飞行器测控学报, 2015, **34**(3): 298-302.
- [9] 李永正. SiPM 的特性表征及质量控制研究[D]. 北京:北京师范大学核科学与技术学院,2013.
- [10] RENKER D, LORENZ E. Advances in solid state photon detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2009, **4**(04): P04004.
- [11] GRUBER L, BRUNNER S. E, MARTON J, et al. Over saturation behavior of SiPMs at high photon exposure[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2014, **737**: 11-18.
- [12] GRUBER L, BRUNNER S. E, CURCEANU C, et al. Recovery time measurements of silicon photomultipliers using a pulsed laser[J]. *Proceedings of Science*, 2015, arXiv: 1510. 06906v1.