

# 硅光电倍增管低温性能应用与研究

范小雪\*, 姜天泽, 刘芳, 刘滨

华北电力大学, 北京

收稿日期: 2021年11月26日; 录用日期: 2021年12月10日; 发布日期: 2022年1月11日

## 摘要

硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier)是二十世纪末发明的用于光探测领域的光电探测器件,由工作在盖革模式的雪崩二极管阵列组成。近年来, SiPM以其出色的单光子计数能力被广泛应用于高能物理领域。SiPM具有温度敏感性,低温可有效压制其暗计数,且相比于传统的光电倍增管(Photomultiplier, PMT), SiPM可以由低压供电并在低温环境运行。本文从SiPM工作原理出发,介绍了SiPM在大型实验中的低温应用,并自主搭建降温系统,研究了SiPM温度特性,改变环境温度,实时测量记录SiPM的击穿电压和暗计数率。实验表明,当温度下降时,击穿电压和暗计数率也随之下降。

## 关键词

光电探测, 硅光电倍增管(SiPM), 低温, 击穿电压, 暗噪声

# Application and Research on Low Temperature Performance of Silicon Photomultiplier

Xiaoxue Fan\*, Tianze Jiang, Fang Liu, Bin Liu

North China Electric Power University, Beijing

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 11<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Silicon Photo-multiplier is a photodetector device used in the field of light detection invented in the late 1990s. It consists of an avalanche diode array working in Geiger mode. Due to its excellent single-photon counting ability, SiPM has been widely used in the field of high-energy physics in

\*通讯作者。

recent years. SiPM is temperature sensitive, low temperature can effectively suppress its dark count. Compared with traditional photomultiplier tube (PMT), SiPM can be powered by low voltage and is suitable for low temperature operation. Starting from the working principle of SiPM, this article introduces the low-temperature application of SiPM in large-scale experiments. A cooling system was built, and the temperature characteristics of SiPM were measuring. The breakdown voltage and dark count rate of SiPM were measured and recorded in real time by changing the ambient temperature. Experiments show that when the temperature gets lower, the breakdown voltage and dark count rate also decrease.

## Keywords

Photodetection, Silicon Photomultiplier, Low Temperature, Breakdown Voltage, Dark Current

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

信号处理和光源技术的进步使得光检测领域在近十几年中得到快速发展。硅光电倍增管(SiPM)是一种可解决传感、定时和量化单光子级别低光信号问题[1]的新兴技术。与光电倍增管(PMT)相比, SiPM 不需要高压, 可以由低压供电, 适合在低温下运行。SiPM 以其卓越的性能、稳健性和相对简单的使用方法, 成为许多当前和未来应用的首选光子探测器, 在包括医学成像、危险和威胁检测、生物光子学、高能物理[2]和激光雷达[3]等领域都有着广泛的应用。

传统的光电倍增管(PMT)体积庞大, 功耗高, 且需要工作在高压条件下, 不适合用于复杂的工作环境。SiPM 具有动态范围大、单光子灵敏度高、光子探测效率高、对磁场不敏感、功耗低等优点, 尽管其暗噪声较高, 但低温可以有效压制其暗噪声。SiPM 具有出色的低温光敏感性[4], 正越来越广泛地应用于国内外大型高能物理实验中, 例如我国计划用于探测 X 射线和伽马射线的引力波高能电磁对流层全天空监测项目(GECAM) [5], 用于寻找  $^{136}\text{Xe}$  无中微子双  $\beta$  衰变的 nEXO 探测器项目等[6]。

NUV-HD-LF 型号 SiPM 是意大利公司 Fondazione Bruno Kessler (FBK)开发的专门用于低温实验的真空紫外敏感 SiPM。本文对这一型号 SiPM 在低温下的工作状态进行测试, 展示了其从液氮温度(-196°C)到室温的一些重要参数。

## 2. SiPM 工作原理

单光电子雪崩二极管(SPAD)是工作在盖革模式下的单光子雪崩二极管, 由硅 P-N 结组成, 该结构形成一个没有载流子移动的耗尽区, 而 SiPM 则集成了一组密集且独立的 SPAD 传感器。当一个光子被硅吸收时, 会形成一个电子 - 空穴对, 此时在光电二极管两端施加反向偏置电压, 会在耗尽区形成一个电场, 导致这些载流子加速向阳极(空穴)移动, 产生电流; 当反向偏压超过击穿电压(Breakdown Voltage,  $V_{bd}$ )时就应该限制电流, 即通过与之并联的电阻 R 来实现“淬灭”, 使二极管受到反向电压, 并将电压值降低到击穿电压值以下来阻止雪崩, 然后二极管两端电压重新升高至击穿电压, 以检测后续到来的光子。该循环过程如图 1 所示[7]。

在盖革模式下工作的单个 SPAD 传感器充当了光子触发开关, 对单光子进行探测。每个独立的 SPAD 和淬灭电阻操作单元称为“微单元”, 而 SiPM 由一定数量的“微单元”组成。当 SiPM 中的微电池对吸收

的光子做出反应时，盖革雪崩就会引起发光电流流过微电池，这将导致淬灭电阻上的电压下降，进而降低二极管上的偏压至击穿电压值以下，从而淬灭光电流并防止进一步的盖革模式雪崩的发生；一旦光电流被熄灭，二极管上的电压就会重新充电至击穿电压值，该过程所需要的时间称为恢复时间。盖革雪崩会被限制在它开始的单个微单元内，在雪崩过程中，所有其它的微电池都将保持充满电，并随时准备探测光子。

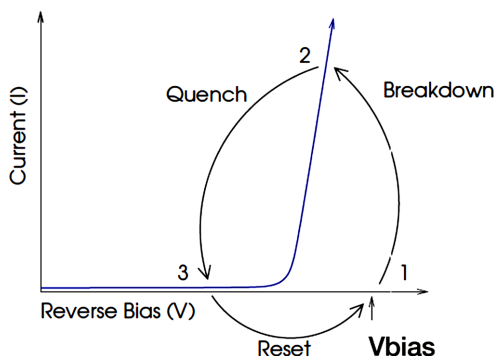


Figure 1. Breakdown, quench and reset cycle of a SPAD working in Geiger mode [7]

图 1. 工作在盖革模式下的 SPAD 的击穿、淬灭和重置循环[7]

### 3. SiPM 在高能物理中的低温应用

与 PMT 相比，SiPM 不再需要高压电源且更适合低温运行，具有低放射性水平且在运行条件下的时间增益稳定性高。尽管 SiPM 常用型号室温条件下的暗计数约为  $10^5$ ，会在一定程度上影响信噪比，但可通过低温实验环境将其有效压制。SiPM 被越来越多的应用于高能物理实验中，尤其是大型低本底低温实验。

#### 3.1. 引力波高能电磁对流层全天空监测(GECAM)项目

引力波高能电磁对流层全天空监测(GECAM)项目是中国计划用于探测 X 射线和伽玛射线的太空望远镜[5]，由两颗地球轨道的微型卫星组成，具有瞬间覆盖全天空的优势。由于微型卫星体积、重量和功耗等的限制，采用 SiPM 代替传统 PMT 作为光学读出器件。GECAM 项目探测器工作温度为  $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，探测动态范围为  $6\text{ keV}\sim 2\text{ MeV}$ ，采用溴化镧晶体配合 SiPM 光学读出，以此作为伽玛暴(Gamma-Ray burst, GRB)的设计方案。中国科学院高能物理研究所孙希磊团队设计了 GRB 样机[8]，对 SensL 公司生产的商业化 SiPM 阵列 ArrayJ-60035-64P 进行了改进，在不改变 SiPM 光读出面积的情况下，将阵列设计为圆形，如图 2 所示，使之与晶体出光面完全耦合，能量分辨及光收集均匀性达到最佳水平。

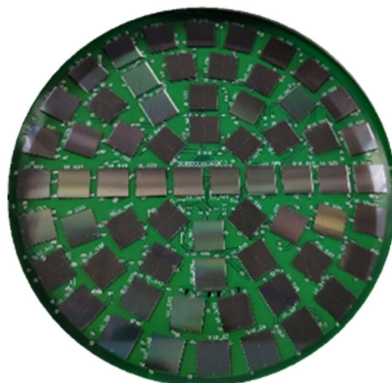


Figure 2. Schematic diagram of circular SiPM array arrangement [9]

图 2. 圆形 SiPM 阵列排布示意图[9]

从图 3 可以看出[8], SiPM 的暗噪声随温度降低而减小, 本底显著降低, 这一特点有助于低能信号从噪声中分辨出来。暗计数率(Dark Count Rate, DCR)随着阈值的增加呈逐步减小的趋势。在低阈值阶段, 即单光电子阈值阶段, DCR 迅速下降。当阈值范围为双光子到三光子阶段时, DCR 处于较低的速率。产生这种现象的原因是在没有光的情况下, 收集到的信号大多是单一的光电子信号。当阈值介于单光电子和双光电子之间时, 单光电子信号被过滤掉, 多光电子信号只保留小部分。

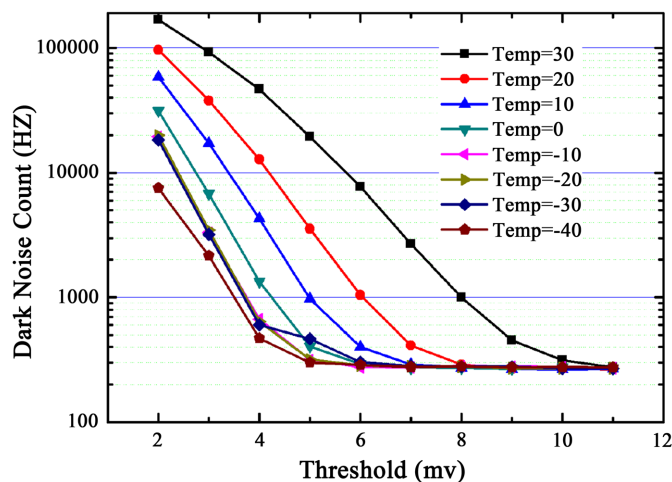


Figure 3. The variation curve of SiPM dark noise with temperature and set threshold [9]  
图 3. SiPM 暗噪声随温度及设定阈值变化曲线[9]

### 3.2. 无中微子双贝塔衰变实验 nEXO

nEXO 合作项目的目标是通过探测  $^{136}\text{Xe}$  的无中微子双  $\beta$  衰变来探索粒子物理标准模型的边界。双  $\beta$  衰变是一个原子核衰变成另一个原子核并发射两个电子和两个反中微子的过程, 而无中微子是指这一过程中只发射两个电子而不发射反中微子, 是双  $\beta$  衰变的特殊情况[6]。nEXO 探测器的方案包括一个大型的富集液氙时间投影室(TPC), 实验的概念继承自 EXO-200, 这是首个 100 公斤级别的无中微子双衰变实验, EXO-200 实验于 2010 年至 2018 年在新墨西哥州 WIPP 地下基地进行。nEXO 引入的解决方案使探测器对无中微子双  $\beta$  衰变反应的灵敏度提高了 100 倍以上。nEXO 低温系统如图 4 所示[6]。

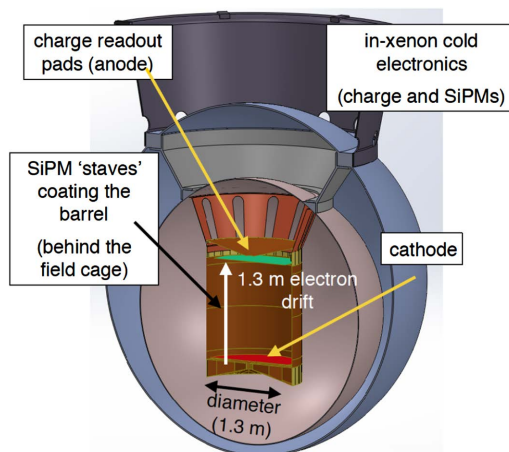
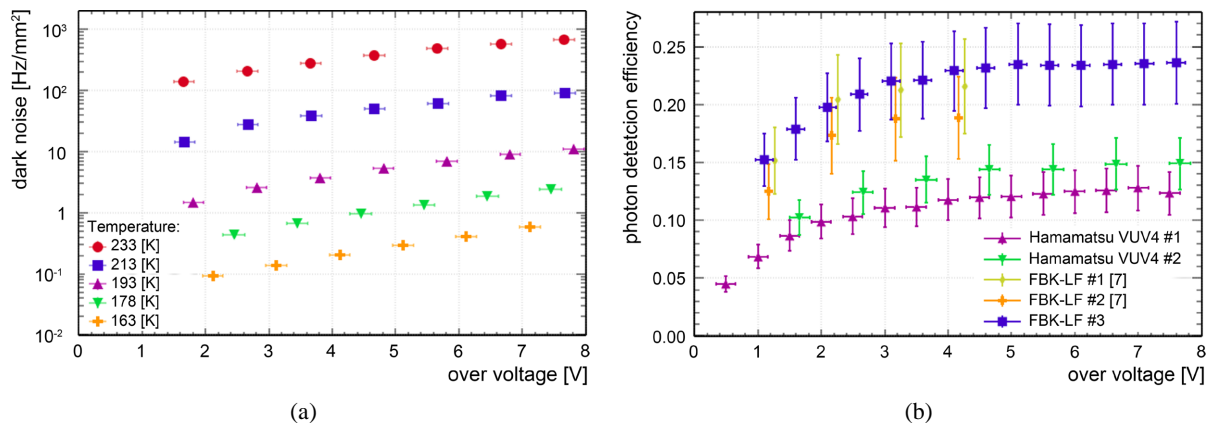


Figure 4. The nEXO inner detector [6]  
图 4. nEXO 探测器[6]

G. Gallina 合作组根据 nEXO 实验的液氩闪烁光检测的要求, 针对滨松(HAMAMATUS) VUV4 紫外敏感的 SiPM 的特性进行了测试[9]。实验对 SiPM 的各种特性, 包括暗计数率以及光子探测效率(Photon Detection Efficiency, PDE) (如图 5)进行了测试。在 163 k 时, 暗计数率为 0.137 Hz/mm<sup>2</sup>, 两个滨松 VUV4 标准 SiPM 的光子探测效率分别为的 13.4% 和 11%。



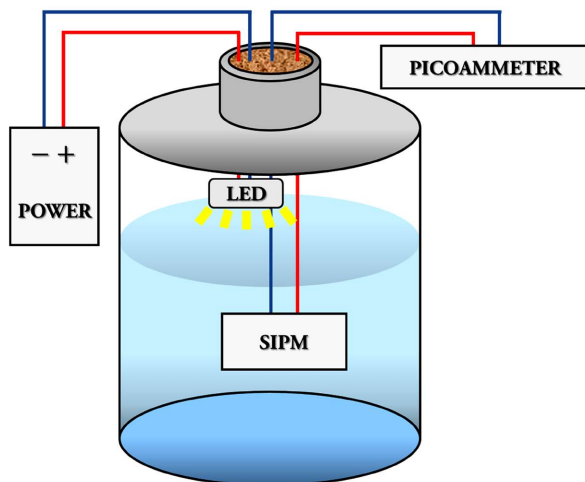
**Figure 5.** SiPM characteristic test. (a) The relationship between the dark count rate of SiPM and the working voltage at different temperatures [10]; (b) PDE of different types of SiPM varies with operating voltage [10]

**图 5.** SiPM 特性测试。(a) 不同温度下 SiPM 的暗计数率与工作电压的关系[10]; (b) 不同型号 SiPM 的 PDE 随工作电压的变化[10]

## 4. SiPM 低温性能测试与分析

### 4.1. 实验装置

由于 SiPM 材料脆性较高, 需要在实验时严格控制降温速率。利用液氮实现低温环境, 通过电磁阀控制流入杜瓦罐中液氮的量以实现温度控制。采用皮安表(Keithley 2450)测量 SiPM 的电流 - 电压(I-V)曲线, 利用杜瓦罐顶部的 LED 光源测量击穿电压(如图 6)。使用数据采集插件(DT5751)测量暗噪声, 该插件具有计数模式和波形采集模式, 分别用于暗计数率的测量和单光子光谱的测量。本文针对 FBK 公司生产的 NUV-HD-LF 型号 SiPM 的击穿电压和暗计数率受温度变化的影响开展实验。



**Figure 6.** Schematic diagram of breakdown voltage measuring device

**图 6.** 击穿电压测量装置示意图

## 4.2. 击穿电压

当耗尽区中的电场强度足够大时, 会引起 SiPM 中的盖革放电。击穿电压是 SPAD 在盖革或雪崩模式下运行时的最小反向偏置电压。随着偏置电压的增大, 电流不会有明显的上升, 直到偏置电压达到击穿电压的数值。反应在 I-V 曲线上的表现为, 电流突然有数量级的增大。皮安表可以为 SiPM 提供偏压, 并且记录下不同电压对应的电流数值, 将工作电压变化步长设为 0.5 V/s。常温下 I-V 曲线如图 7, 可以看出在 33 V 左右电流突然增大, 即击穿电压约为 33 V。

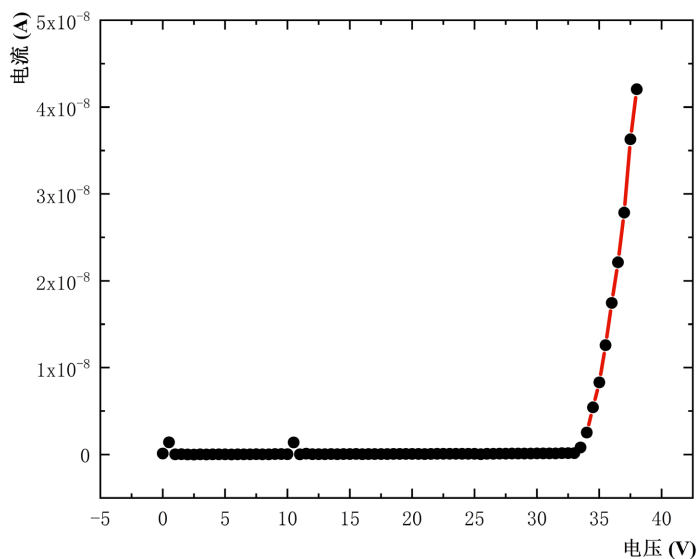


Figure 7. SiPM current-voltage curve at room temperature

图 7. 常温 SiPM 电流 - 电压曲线

由于步长设置有一定的区间, 无法实现精确的击穿电压测量。精确的击穿电压数值可以通过  $\sqrt{I}-V$  曲线的拟合得到[7] (如图 8)。线性拟合的横截距即为击穿电压。该型号 SiPM 在常温下的击穿电压为 32.77 V。

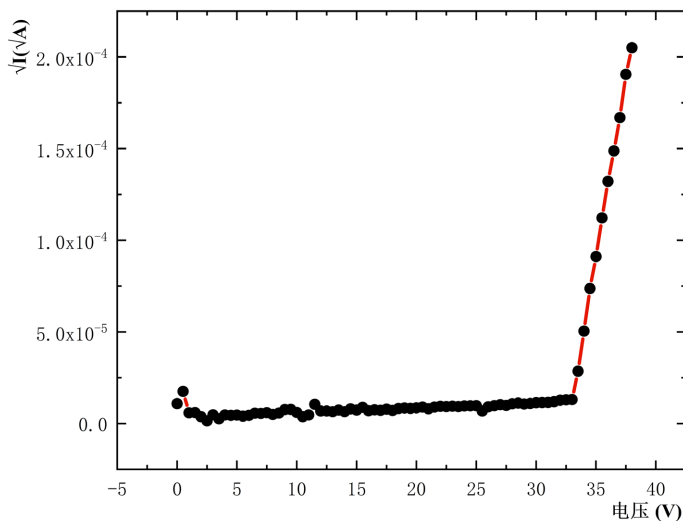


Figure 8. Curve of  $\sqrt{I}-V$

图 8.  $\sqrt{I}-V$  曲线

用相同的方法测量了不同温度情况下的击穿电压(如图 9)。从击穿电压变化的规律来看,随着温度的降低,击穿电压也随之降低。这是由于半导体晶格的热振动随着温度的降低而减弱,导致 P-N 结中势垒层变宽[10]。因此,载流子运动的平均自由程增加,与原子碰撞前外电场加速获得的能量增加。这导致碰撞和电离的机会增加,雪崩碰撞的概率增加。由于该情况下更有可能发生雪崩击穿,因此 SiPM 的雪崩临界电压随着环境温度的降低而降低,与实验结果表现一致。

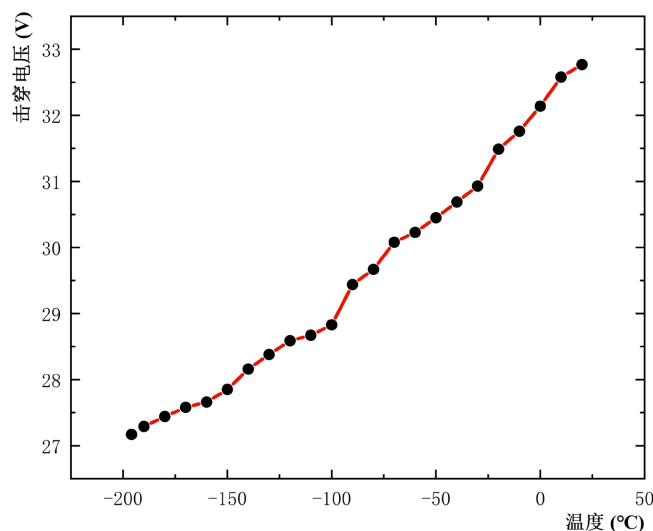


Figure 9. SiPM breakdown voltage at different temperatures

图 9. 不同温度条件下的 SiPM 击穿电压

### 4.3. 暗电流

SiPM 具有单光子计数的功能,在一定强度范围内, SiPM 电荷的输出与光子数成正比。光电子能谱可以粗略反映 SiPM 性能,性能较好的 SiPM 可以看到明显的单光电子峰[11]。由于 SiPM 在液氮温度下的暗噪声较低,因此在 SiPM 的能谱中可清楚显示出单光电子和多光电子峰(如图 10),表明液氮温度下 SiPM 工作良好。

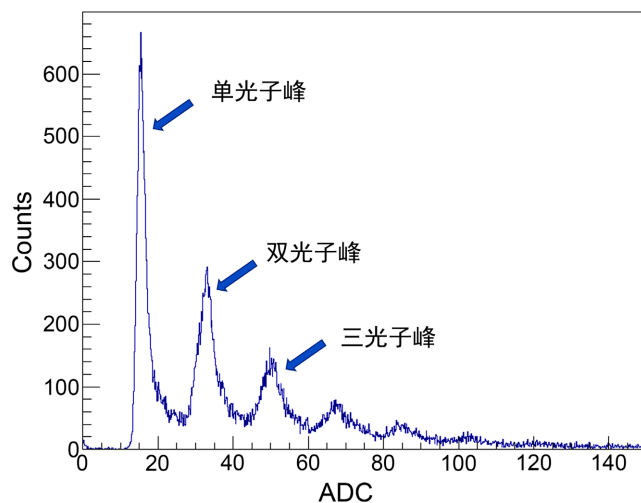


Figure 10. Spectrogram of SiPM output

图 10. SiPM 输出的光谱图

暗噪声主要是指暗电流，即设备在黑暗环境中工作时的内部电流。暗计数率是指被动状态下单位时间内输出的脉冲数，它直接影响 SiPM 输出信号的信噪比，并严重影响晶体闪烁体探测器的能量分辨率。SiPM 的暗电流主要由表面漏电流、耗尽区晶格缺陷引起的热电流和隧道效应引起的隧道电流三部分组成。热电流是指电子从价带跃迁到导带过程中触发雪崩所产生的电流，这些电子是电场作用下在耗尽区中通过热激发产生的。热电流计算公式[4]如下：

$$I_{\text{thermal-current}} = AT^2 \exp(-E/k_B T) \quad (1)$$

其中  $A$  为常数， $T$  为温度， $E$  为导带和价带之间的能量范围， $k_B$  为玻尔兹曼常数。从式(1)可知，热电流与温度有关，电流随着温度的升高而增加，这意味着更高的 DCR (如图 11)。DCR 从室温( $200 \text{ kHz/mm}^2$ ) 降至液氮温度( $0.01 \text{ Hz/mm}^2$ )，降幅达 7 个数量级。DCR 随温度从常温降至  $-100^\circ\text{C}$  的过程中降温速度较快，而达到  $-100^\circ\text{C}$  后下降速度逐渐放缓。

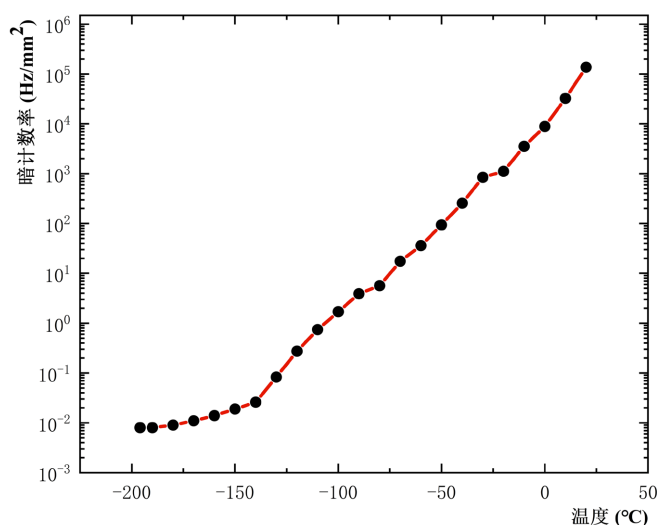


Figure 11. Dark count rate vs. temperature curve

图 11. 暗计数率随温度变化曲线

## 5. 结论

本文从 SiPM 的工作原理及其在低温环境工作的优点出发，介绍了两个大型高能物理实验 GECAM 和 nEXO。自主设计了利用液氮降温的温度控制系统，改变环境温度并实时测量 SiPM 的击穿电压以及暗计数率的变化规律，得到以下结论：

1) SiPM 的击穿电压随温度的降低而减小，NUV-HD-LF 型号 SiPM 的击穿电压在室温条件下约为 33 V，液氮温度条件下约为 27 V。

2) SiPM 的暗计数率随温度降低而减小，NUV-HD-LF 型号 SiPM 的暗计数率由室温至液氮温度下降了 7 个数量级，说明低温可有效压制 SiPM 的暗噪声。

掌握 SiPM 的温度特性是在低温环境中使用 SiPM 的前提。击穿电压为使用 SiPM 提供合适的操作电压范围，暗噪声会直接影响信噪比，这在使用 SiPM 对单光子弱信号检测与甄别中十分重要。

## 参考文献

- [1] Fa, A. and Sgb, C. (2019) Understanding and Simulating SiPMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **926**, 16-35.



- 
- <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.118>
- [2] Jiang, J., Zhao, S., Niu, Y., *et al.* (2020) Study of SiPM for CEPC-AHCAL. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, **2020**, Article ID: 164481. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164481>
- [3] Incoronato, A., Locatelli, M. and Zappa, F. (2021) Statistical Modelling of SPADs for Time-of-Flight LiDAR. *Sensors*, **21**, 4481. <https://doi.org/10.3390/s21134481>
- [4] Collazuol, G., Bisogni, M.G., Marcatili, S., *et al.* (2011) Studies of Silicon Photomultipliers at Cryogenic Temperatures. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **628**, 389-392. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.07.008>
- [5] Zhang, D., Li, X., Xiong, S., *et al.* (2019) Energy Response of GECAM Gamma-Ray Detector Based on LaBr<sub>3</sub>:Ce and SiPM Array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **921**, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.032>
- [6] Pocar, A. (2020) The nEXO Detector: Design Overviewn. *Journal of Physics: Conference Series*, **1468**, Article ID: 012131. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012131>
- [7] Introduction to the Silicon Photomultiplier. <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9770-d.pdf>
- [8] Lv, P., Xiong, S.L., Sun, X.L., *et al.* (2018) A Low-Energy Sensitive Compact Gamma-Ray Detector Based on LaBr<sub>3</sub> and SiPM for GECAM. *Journal of Instrumentation*, **13**, P08014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/08/P08014>
- [9] Gallina, G., Giampa, P., Retière, F., *et al.* (2019) Characterization of the Hamamatsu VUV4 MPPCs for nEXO. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, **940**, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.096>
- [10] Crowell, C.R. (1966) Temperature Dependence of Avalanche Multiplication in Semiconductors. *Applied Physics Letters*, **ED-13**, 242-244. <https://doi.org/10.1063/1.1754731>
- [11] 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): 5.