

# Study on the Method of Improving Time Resolution of SiPM

—Based on the Testing of Two Types of SiPMs Coupled with YSO

Weijiao Li<sup>1</sup>, Jiamin Chen<sup>1</sup>, Rui Chen<sup>2</sup>, Daoming Xi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Third Research Institute of the Ministry of Public Security, Shanghai

<sup>2</sup>Ray Measure Medical Technology Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Email: wonjiao@163.com

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper compares the performances of Sensl's FC10035 and FC10020 from the two dimensions of pulse width and energy resolution, and provides a reference for the design of scintillator detector based on SiPM. Experiments show that the pulse width of FC10020 is only 200 nS, which is suitable for application scenarios with high time performance requirements. The energy resolution of FC10035 is suitable for application scenarios of high energy performance requirements. In order to improve the dynamic range of response and reduce the probability of pile up, a pole-zero cancellation circuit is designed, and the effectiveness of the zero-pole cancellation circuit for shortening the pulse width is verified by experiments.

## Keywords

SiPM, YSO Crystal, Energy Resolution, Pole-Zero Circuit

---

# 提高SiPM时间分辨能力方法研究

——基于两种 SiPM 性能对比测试

李维姣<sup>1</sup>, 陈嘉敏<sup>1</sup>, 陈 瑞<sup>2</sup>, 奚道明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>公安部第三研究所, 上海

<sup>2</sup>苏州瑞迈斯医疗科技有限公司, 江苏 苏州

Email: wonjiao@163.com

收稿日期: 2019年4月9日; 录用日期: 2019年4月22日; 发布日期: 2019年4月29日

## 摘要

本文通过实验分析从脉冲宽度和能量分辨率两个维度, 对比Sensl的FC10035和FC10020的性能, 为基于硅光电倍增管(SiPM)的闪烁体探测器提供设计参考, 实验表明FC10020的脉冲宽度仅为200 nS, 适合对于时间性能要求较高的应用场景, FC10035的能量分辨能力较好, 适用于对能量分辨要求较高的应用场景; 为提高响应的动态范围, 降低Pileup的概率, 设计了pole-zero (零极相消)电路, 通过实验验证了零极相消电路对于缩短脉冲宽度的有效性。

## 关键词

SiPM, YSO晶体, 能量分辨率, 零极相消电路

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

硅光电倍增管(SiPM)作为一种新型的弱光感应的光电转换器件, 由于其体积小、增益高、响应快、成本低的特点而备受关注。SiPM 由工作在盖革模式下的 APD(G-APD)微元阵列组成[1] [2]。可见光光子入射 SiPM 而某个或某些微元感知, 由于雪崩效应, 这些微元迅速导通, 并在电场的加速下形成电流。由于雪崩效应的放大作用, SiPM 的增益通常能达到与光电倍增管(PMT)相当的 105~106, 但其体积仅为 PMT 的 1/10, 且工作电压通常只有 30~100 V, 相对于 PMT 而言, 配置电路简单, 安全可靠。

目前 SiPM 被广泛应用于核医学、高能物理、精密分析等领域。市面上, SiPM 主要厂家多为国外企业, 如 Excelitas、Sensl (被 ONSEMI 收购)、Advansid、滨松等, 其中在国内应用范围最广的是 Sensl 公司的 FC 系列。

本文选取 Sensl 公司的 FC10020 和 FC10035 两个型号的 SiPM, 对比其基本性能, 为闪烁体探测器设计提供参考。为提高光子响应的动态范围, 降低叠加(PileUp)概率, 设计了零极相消电路, 并测试了该电路对探测器能量分辨性能的影响。

## 2. 系统搭建

### 2.1. 系统设计

目前在医疗应用中, 闪烁晶体通常选择 YSO 或 LYSO。本文使用 YSO 闪烁体耦合 SiPM 作为光电转换部件。

YSO 晶体的基本性能如表 1 所示[3]。由表中可以看出其发射波长是 420 nm, 因此选择的两种 SiPM 的中心响应波长应与其匹配。所选用的两种 SiPM 基本特性如表 2 所示。

Table 1. The features of YSO

表 1. YSO 晶体基本特性

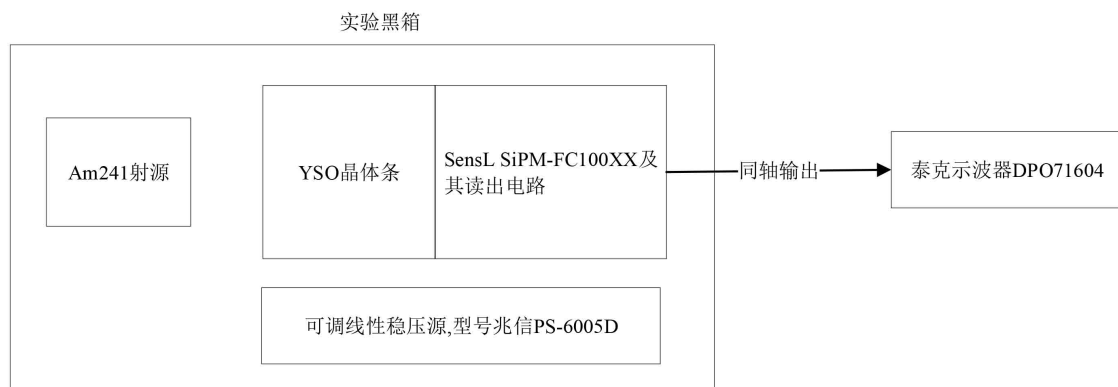
光输出(光子数量/MeV)	发射波长(nm)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	有效原子系数	衰减时间(nS)	熔点(°C)	折射率	潮解性	背景辐射
24,000	420	4.54	34	60	2000	1.8	不潮解	无

**Table 2.** Comparison of FC10020 and FC10035  
**表 2.** FC10020 与 FC10035 性能对比

型号	微元尺寸( $\mu\text{m}$ )	微元数量	导通电压(V)	中心波长(nm)	探测效率	增益	暗电流(nA)
FC10020	20	1296	24.2	420	31%	$2 \times 10^5$	16
FC10035	35	504	24.2	420	41%	$1 \times 10^6$	49

FC10020 与 FC10035 同为外部有效接受面积为  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  的 SiPM [4], 目前较为广泛的应用于正电子发射型计算机断层显像(Positron Emission Computed Tomography, PET)探测领域, 其中心响应波长都是 420 nm, 非常适用于与 YSO 耦合的场合。其最大的区别在于微元尺寸不同, 由于微元尺寸不同造成其有效填充面积不同, 进而使得探测效率发生变化。从表 2 种可以看出, 其探测效率的差异达到了 10%。

为进一步验证两种 SiPM 的性能, 为不同的应用场合提供参考, 设计了如图 1 所示的系统。为了防止可见光对于测试结果的影响, 将探测器部分放置于黑箱中, 使用同轴线将输出信号引至高速示波器。以镅-241 (Am241)作为检测用射线源, 它的谱线为单峰, 峰值位于 59.5 KeV。



**Figure 1.** The schematic of test bench  
**图 1.** 实验系统设计

## 2.2. 零极相消电路设计

对于 FC 系列的 SiPM, 其脉冲宽度通常在在 400 nS, 这限制了脉冲计数率, 约 2.5 M/s, 但是通常情况下, 所接收的光子信号不可能在时间上是平均分布的, 也就是会存在瞬发较高频率的脉冲的现象, 使得 SiPM 的响应存在叠加(Pileup)的现象。如图 2 所示, Pileup 主要发生在前一个脉冲的恢复期, 可以理解为 SiPM 还未全部关断时再次被打开。这种现象, 将造成脉冲能量的误判, 后面的脉冲由于叠加在前一个脉冲上能量被过高估计。

为了降低 Pile-up 发生的概率, 提高检测的动态范围, 尤其是提高计数型的探测器的动态范围, 零极相消电路是较好的选择, 该电路通过在读出电路之后加入一个相位补偿单元, 为原有电路增加一个零点, 使得脉冲的恢复时间显著缩短[5]。零极相消电路原理图如图 3 所示, 测试中主要修改电阻 R11、R16 和电容 C15, 观察示波器脉冲形状, 分析能量结果。

## 3. 实验结果

### 3.1. 不加零极相消电路对比两种 SiPM 的输出特性

将 SensL FC100XXSiPM 的输出接入示波器, 示波器端接  $50 \Omega/16 \text{ G}$ 。将稳压源输出调到 30 V, 关闭

电源输出。使用光学硅脂耦合晶体条与 SiPM，耦合时注意位置；将镅-241 (Am241)放射源放置晶体条上方位置，开启电源，在示波器进行数据采集，采样率 6.25 G，单次采集 20,000 个脉冲，进行数据分析和处理。示波器采集到两种信号的 SiPM 的输出如图 4 所示，可以看到同样的测试条件和输出增益的情况下，FC10020 信号的宽度仅为 FC10035 的一半，其动态范围相对较高。

对该 20,000 个脉冲进行统计分析，计算方法示意如图 5 所示，按脉冲高度进行做直方图，然后进行曲线拟合，已知 AM241 的能量峰值为 59.5 KeV，则可以利用半峰宽求得能量分辨率。

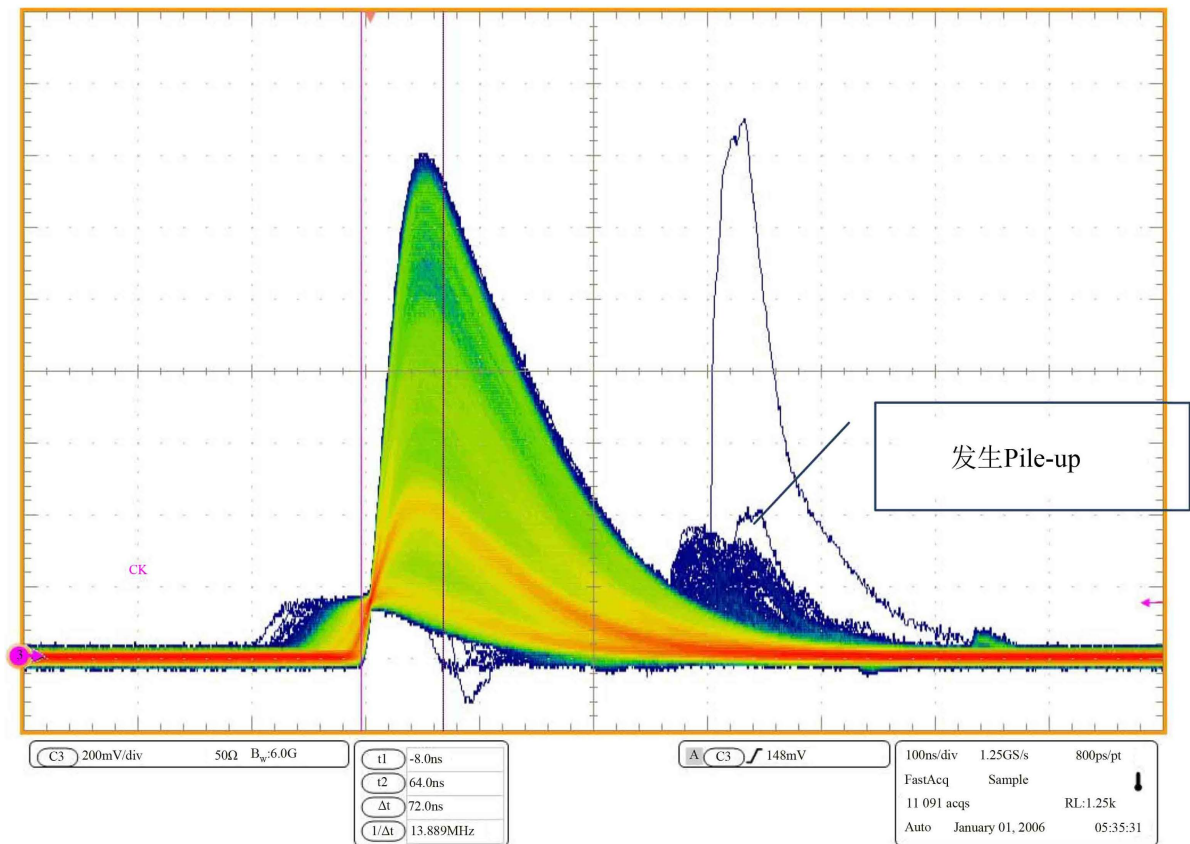


Figure 2. The signals includes Piled-up pulse

图 2. Pileup 现象示意图

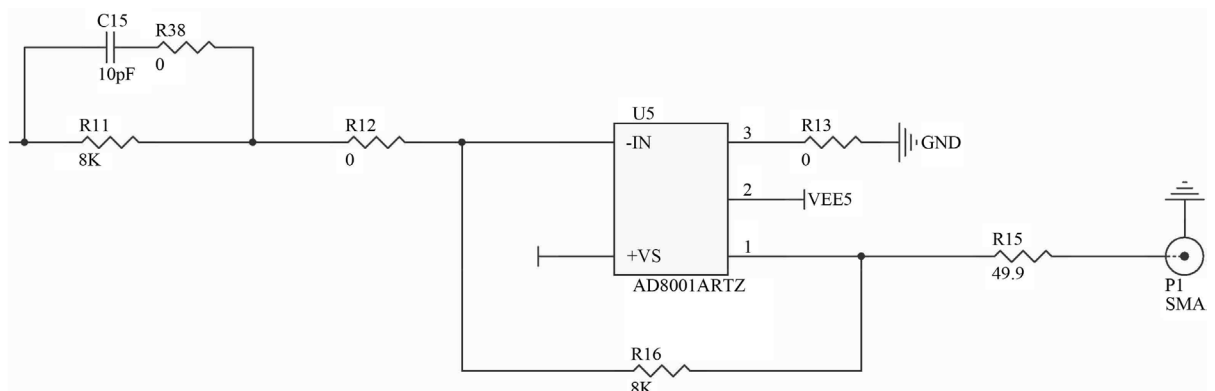


Figure 3. The schematic of Pole-zero circuit

图 3. 零极相消电路图

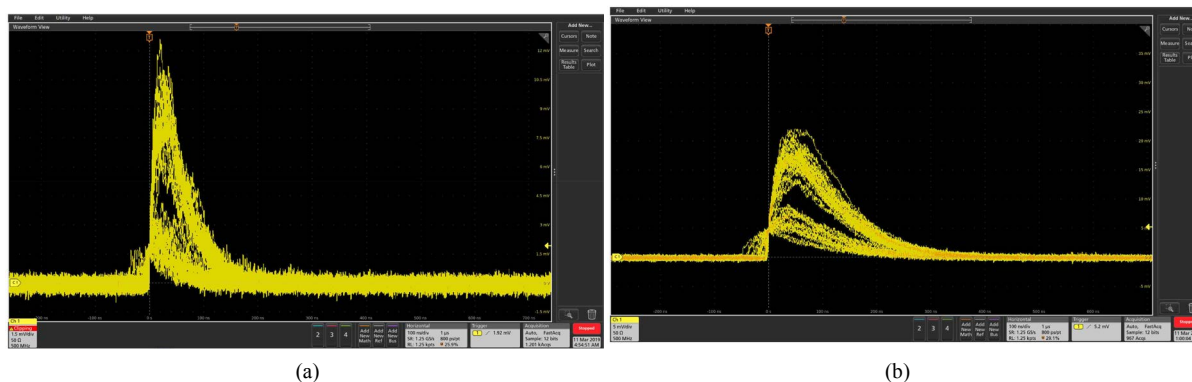


Figure 4. The output signal of FC10020 and FC10035, (a) the output signal of FC10020, (b) the output signal of FC10035  
 图 4. FC10020 和 FC10035 的输出信号, (a) FC10020 输出信号, (b) FC10035 输出信号

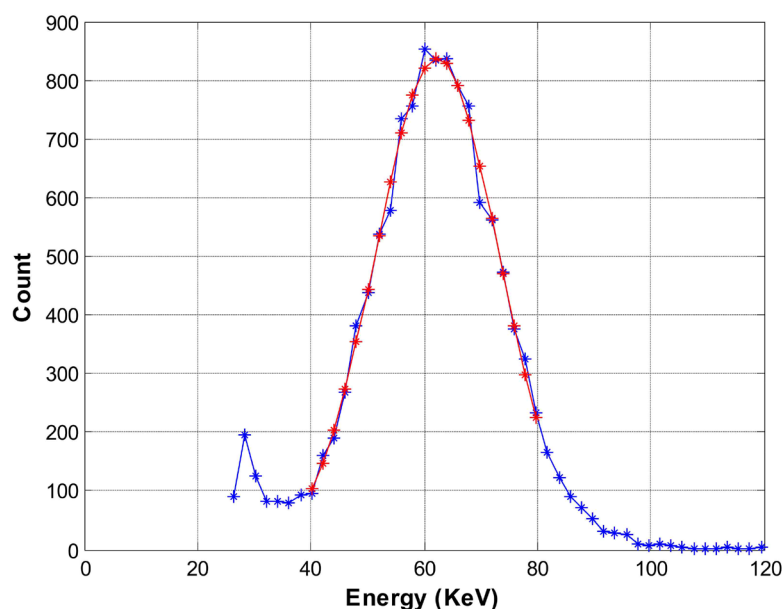


Figure 5. The method of calculating energy resolution  
 图 5. 计算能量分辨率方法示意

根据图 5 所示的方法可以求得两种 SiPM 的能量分辨特性随电压变化的性能如表 3 所示。

Table 3. The energy resolution of the two types SiPM in different bias voltage  
 表 3. 不同偏置电压下两种型号的 SiPM 的能量分辨率对比

电压(V)	28.5	29	29.5	30.0	30.5	31.0
FC10020	36.90%	37.59%	37.88%	36.70%	37.36%	39.57
FC10035	27.92%	27.42%	27.90%	28.12%	28.30%	27.56%

### 3.2. 加零极相消电路时 SiPM 的输出特性的改变情况

SiPM 输出接入零极相消电路板, 重复上述实验。实验结果如图 6 所示。脉冲的后沿明显不平滑, 存在误判的可能。加入零极相消电路后, FC10035 脉冲宽度缩减到 200 nS, FC10020 则接近 100 nS。

改变两路种 R11 和 R16 的阻值, 其能量分辨率的变化情况如表 4 所示。

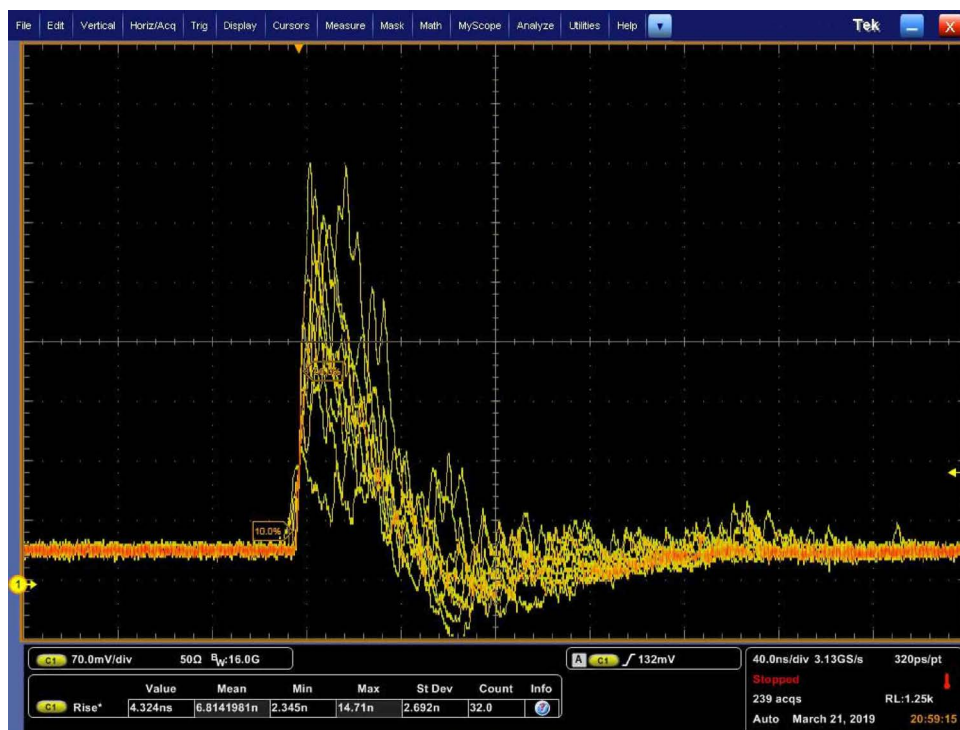


Figure 6. The output pulse after pole-zero circuit in FC10020  
图 6. FC10020 加入零极相消电路后输出脉冲

Table 4. The energy resolution of F10020 as R11 and R16 change  
表 4. 改变 R11 和 R16 时 F10020 能量分辨率变化情况

R11/R16 (KΩ)	2	3	4.3	5.1	6.2	8.2	10
能量分辨率(%)	61.9	56.5	57.3	54.7	54.8	54	51.2

#### 4. 分析与结论

从 3.1 的实验结果可以看出, 当不加入零极相消电路时, 两种 SiPM 各有优缺点, FC10020 的脉冲宽度较窄, 意味着抗叠加的能力较强, 较适合于对时间分辨要求较高的应用场合; FC10035 的能量分辨率高, 较适合于对能量分辨要求较高的场合。

对比图 6 和图 4(a)可以看出, 增加了 Pole-Zero 电路后, 脉冲宽度会被压缩, 但是下降沿的抖动增强(阈值的随机误触发概率会增加), 且随 RC 时间常数的增加, 脉冲会逐渐出现过冲。

零极相消电路确实能够缩短脉冲宽度, 增加 SiPM 抗 Pile-up 的能力, 但是能量性能会因为 Pole-Zero 电路而降低, 尤其是对于 FC10020, 使用幅值计算能量其能量性能会恶化到 50%~60%。

综合对比, FC10035 性能更优, 对能量分辨率较高的应用场合可直接使用, 针对计数率较高的应用场合, 则可通过加入零极相消电路的方法解决。

#### 基金项目

国家重点研发计划资助, 2016YFC0800904。

#### 参考文献

- [1] Risigo, F., Bulgheroni, A., Caccia, M., *et al.* (2009) SiPM Technology Applied to Radiation Sensor Development.



*Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, **607**, 75-77. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.209>

- [2] Shi, F., Liu, J.G., Hong, L.U., *et al.* (2011) Comparative Studies of Silicon Photomultipliers and Traditional Vacuum Photomultiplier Tubes. *Chinese Physics C: English Edition*, **35**, 50-55. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/35/1/011>
- [3] 赵景泰, 王红, 金滕滕, 等. 闪烁晶体材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(10): 40-48.
- [4] Otte, A.N., Garcia, D., Nguyen, T., *et al.* (2017) Characterization of Three High Efficiency and Blue Sensitive Silicon Photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **846**, 106-125. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.09.053>
- [5] Gola, A., Piemonte, C. and Tarolli, A. (2013) Analog Circuit for Timing Measurements with Large Area SiPMs Coupled to LYSO Crystals. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **60**, 1296-1302. <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2252196>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [oics@hanspub.org](mailto:oics@hanspub.org)