

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

李永正，程岳，王凯君，李伯成，梁琨，杨茹，韩德俊
(北京师范大学新器件实验室

<http://lenp.bnu.edu.cn/hkxyweb/NDL/index.htm>)

2012年8月

主要内容

- ❖ 研究目的和意义
- ❖ 衬底体电阻淬灭**SiPM**简介
- ❖ 质量控制规范与流程
- ❖ 总结

一、研究目的和意义

近年来一些大型高能物理实验研究对SiPM提出了更高的要求，例如欧洲核子中心（CERN）的COMPASS实验要求SiPM必须具有非常大的动态范围和较高的光探测效率（PDE），单元密度为几 k/mm^2 以下的SiPM已经不再适用。

COMPASS实验要求SiPM尺寸为 $3 \times 3 mm^2$ ，单元密度 $10000/mm^2$ ，光探测效率在500nm处达到12%以上，增益高于 3×10^4 ，暗计数率在1p.e.阈值小于 $1MHz/mm^2$ 。

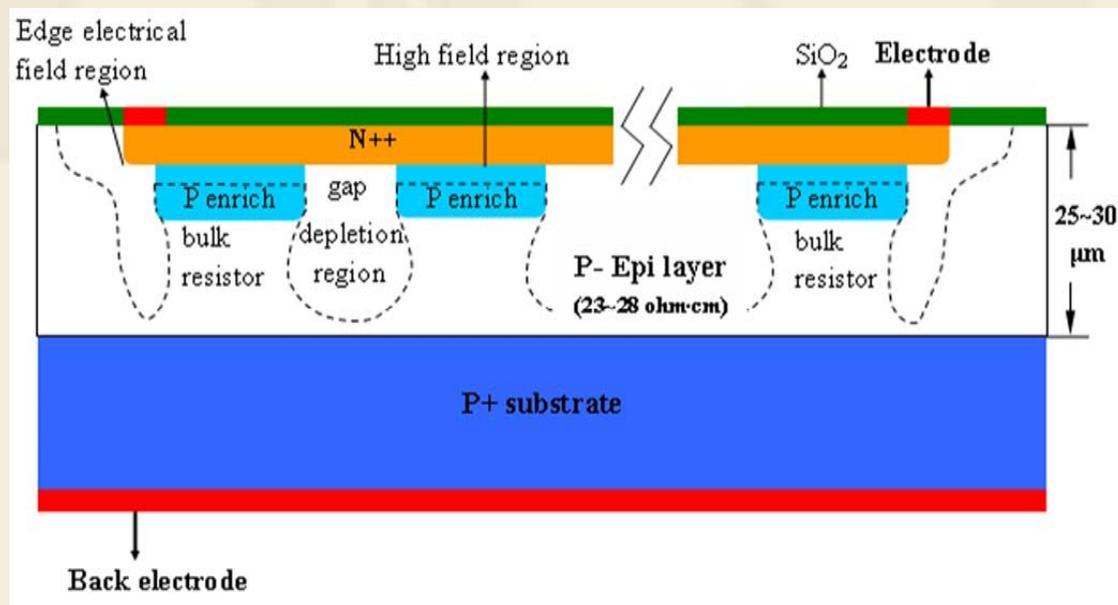
除动态范围、PDE外，SiPM还有其它重要性能参数，SiPM的测量必须有一个优化的测量规范和流程，以实现SiPM的快速筛选和严格的质量控制。

大型高能物理实验对探测器的可靠性、一致性及使用寿命等有非常严格的要求。

我们以COMPASS实验及某次流片为例，介绍北京师范大学新器件实验室研制的衬底体电阻淬灭大动态范围SiPM的新进展、从芯片到器件的检测规范和流程。

二、衬底体电阻淬灭SiPM简介

新器件实验室（NDL）研制的基于外延层体电阻淬灭的SiPM能够有效缓解SiPM大动态范围与高探测效率不能兼得的矛盾。



特点：采用衬底体电阻代替一般位于表面的多晶硅条电阻控制雪崩淬灭，避免表面电阻材料及铝互联线等对光的遮挡和吸收。

减小“死区”面积，增大几何填充因子。对于较小的APD单元面积和较高的单元密度也能保持较大的探测效率。

新器件实验室衬底体电阻淬灭SiPM结构示意图

三、质量控制规范与流程

3.1 器件芯片I-V特性检测

流片工艺结束后，对芯片上SiPM管芯进行严格的反向I-V特性测量，部分结果如图1所示，记录击穿电压 V_b ，

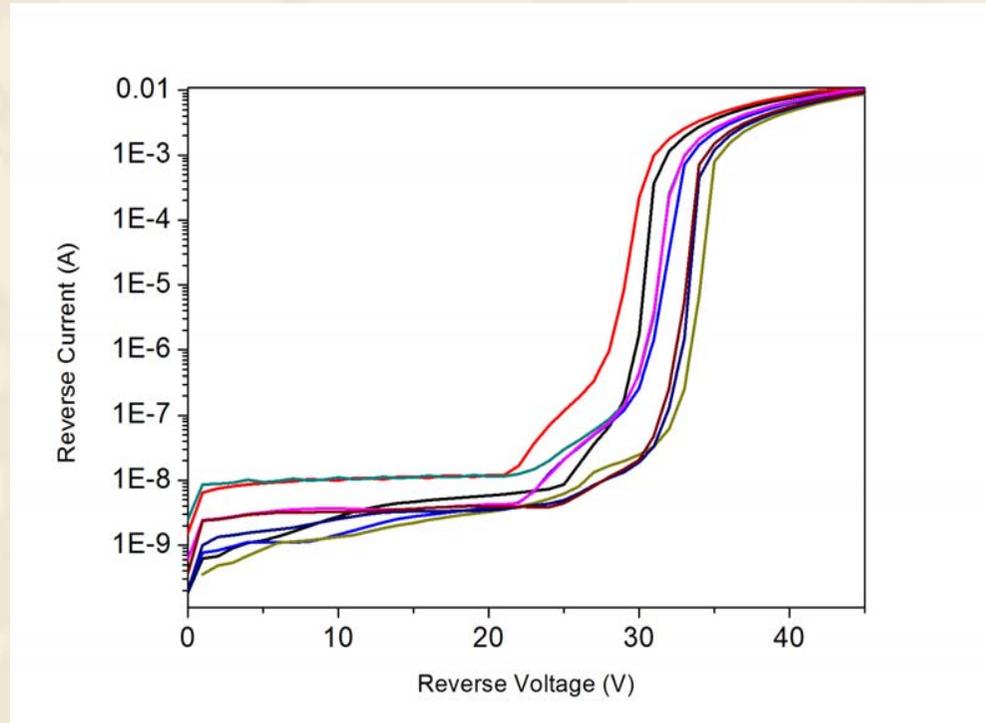


图1 反向I-V特性

3.2 管壳封装

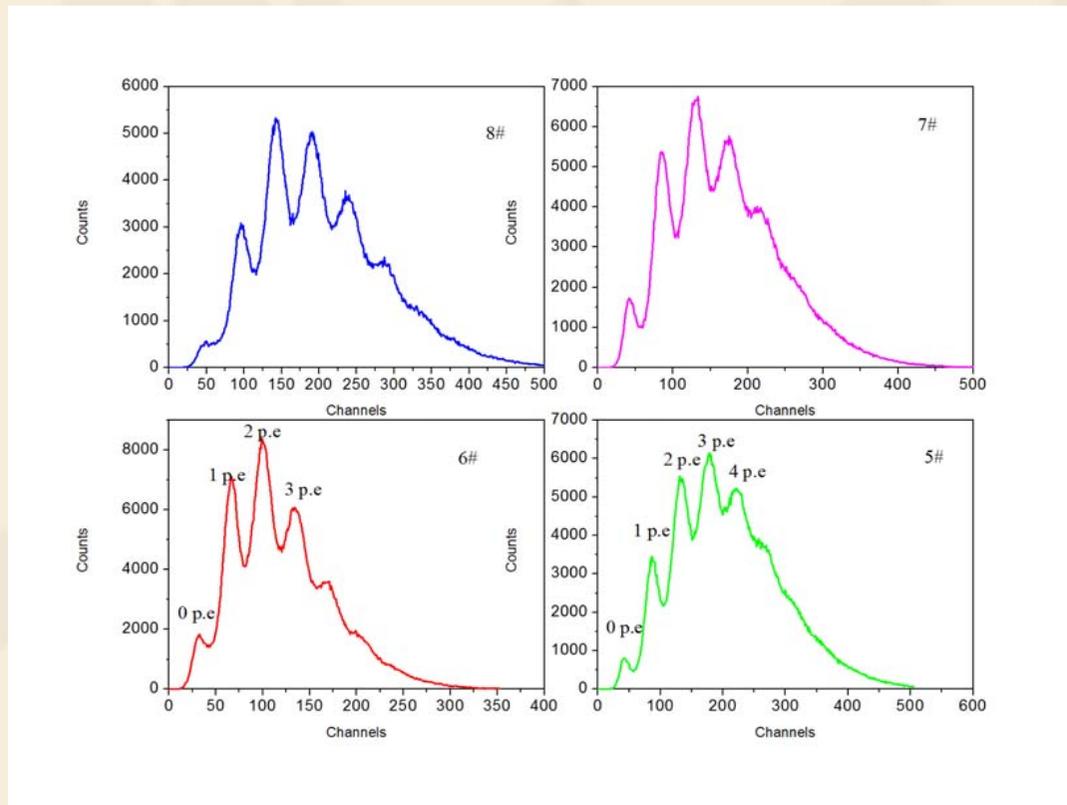
芯片I-V特性测量后，进行划片封装，对SiPM进行编号。



图2 TO-5封装后的SiPM示例照片

3.3 单光子分辨谱和增益的测量

弱光照射到SiPM时，激发若干APD单元，SiPM输出脉冲在多道的分布图就是单光子分辨谱。



推荐偏压下，
增益 G 为 2×10^5

图3 单光子分辨谱

3.4 暗计数和探测效率（PDE）的测量

SiPM的暗计数是指将SiPM放置在避光环境中，由于硅材料热激发载流子等原因引起的计数。

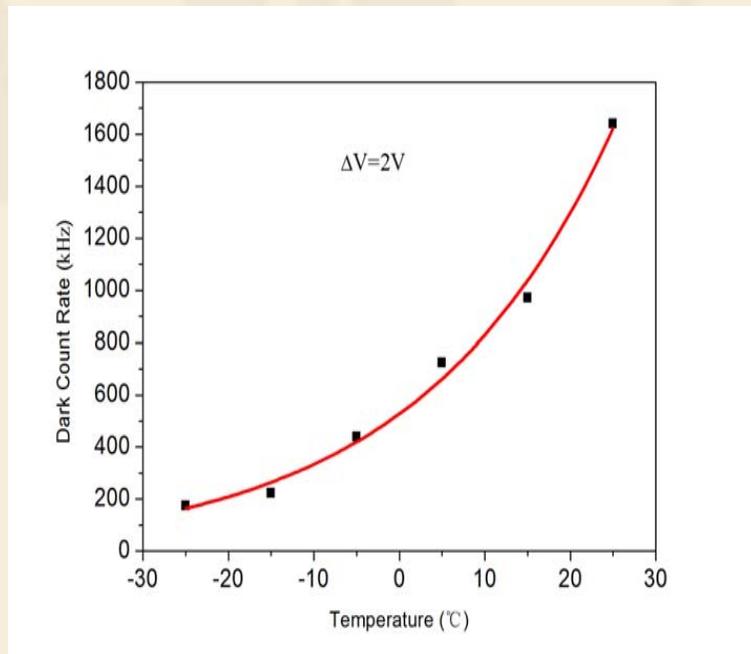


图4 暗计数随温度变化

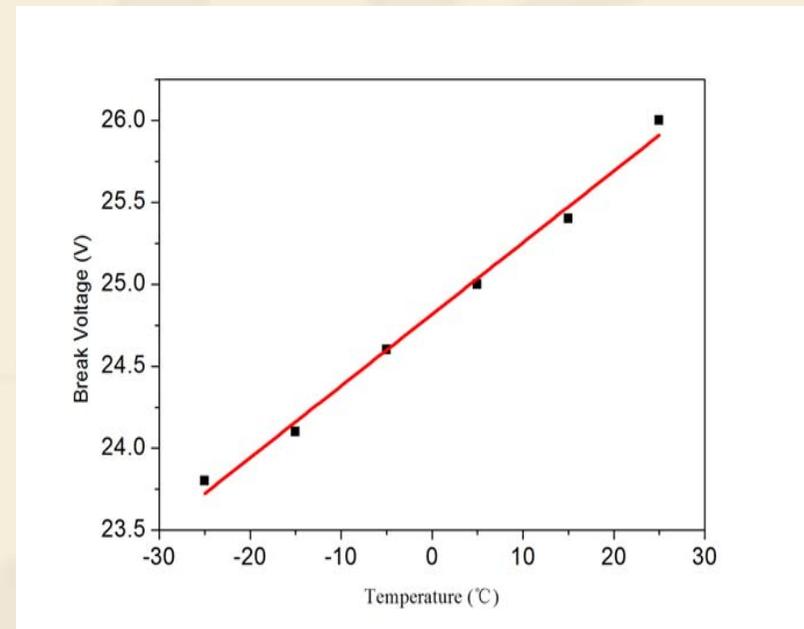


图5 击穿电压随温度变化

PDE采用相对定标法进行测量，结果如图6，PDE峰值位于480nm处，推荐和最大工作偏压下分别为7.6%和13%，500nm处PDE值分别为7.5%和12.8%。

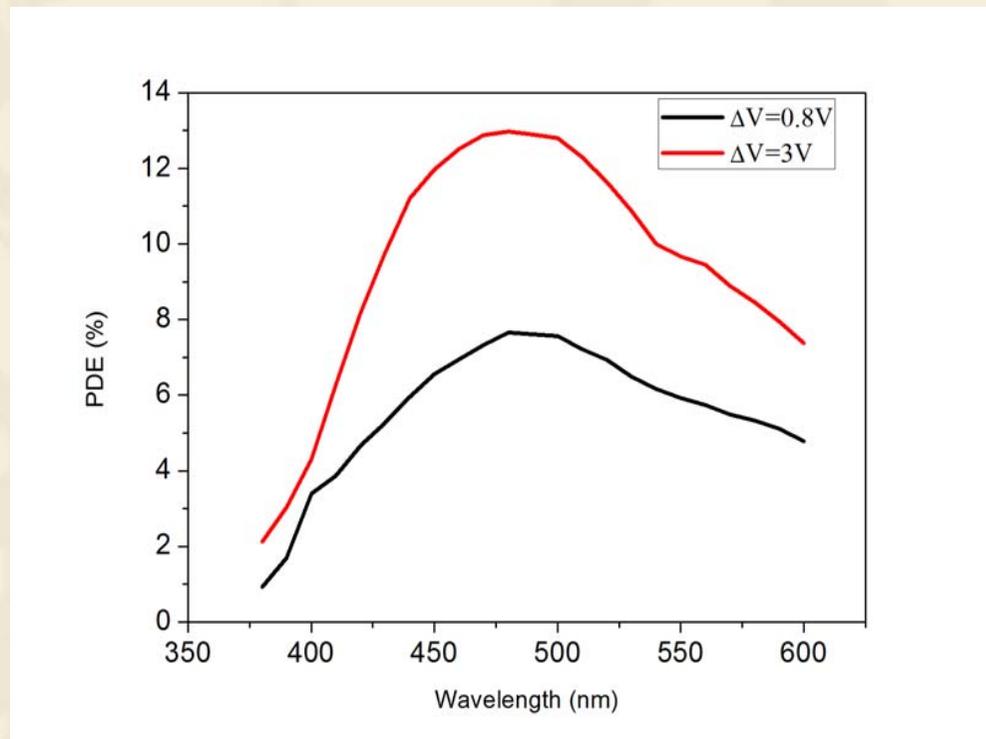
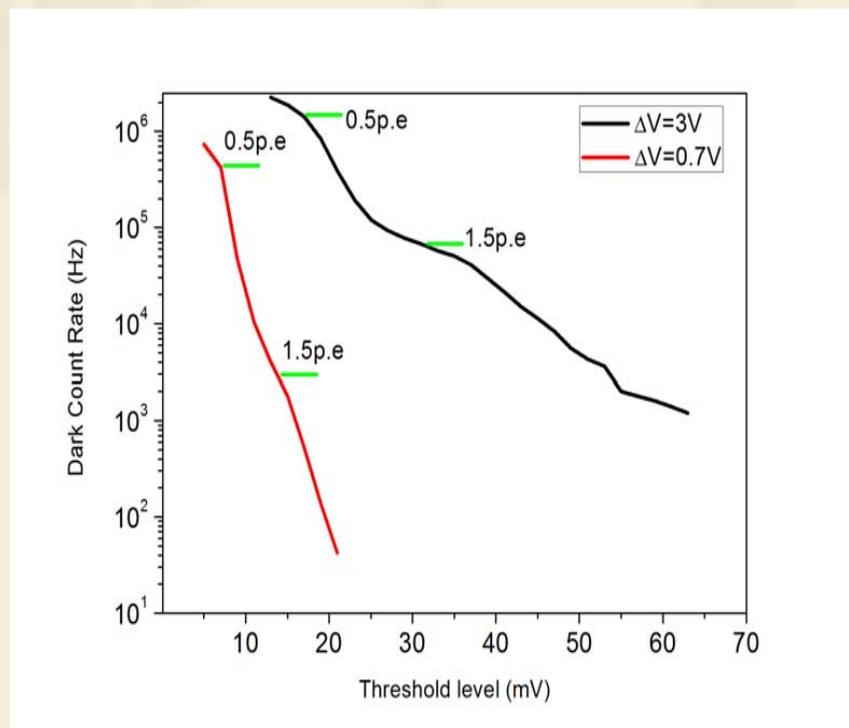


图6 推荐与最大偏压下的PDE

3.5 光学串话测量

光学串话是指雪崩单元产生的热载流子发出的光有一定几率被临近的单元吸收，触发临近单元雪崩。



推荐偏压下光学串话小于1%，最大偏压时在3%左右。

图7 推荐与最大偏压下光学串话

3.6 恢复时间测量

恢复时间定义为一个单元被激发后，进行充电恢复工作电压所需要的时间， $\Gamma = C_{\text{pixel}} \times R_Q$

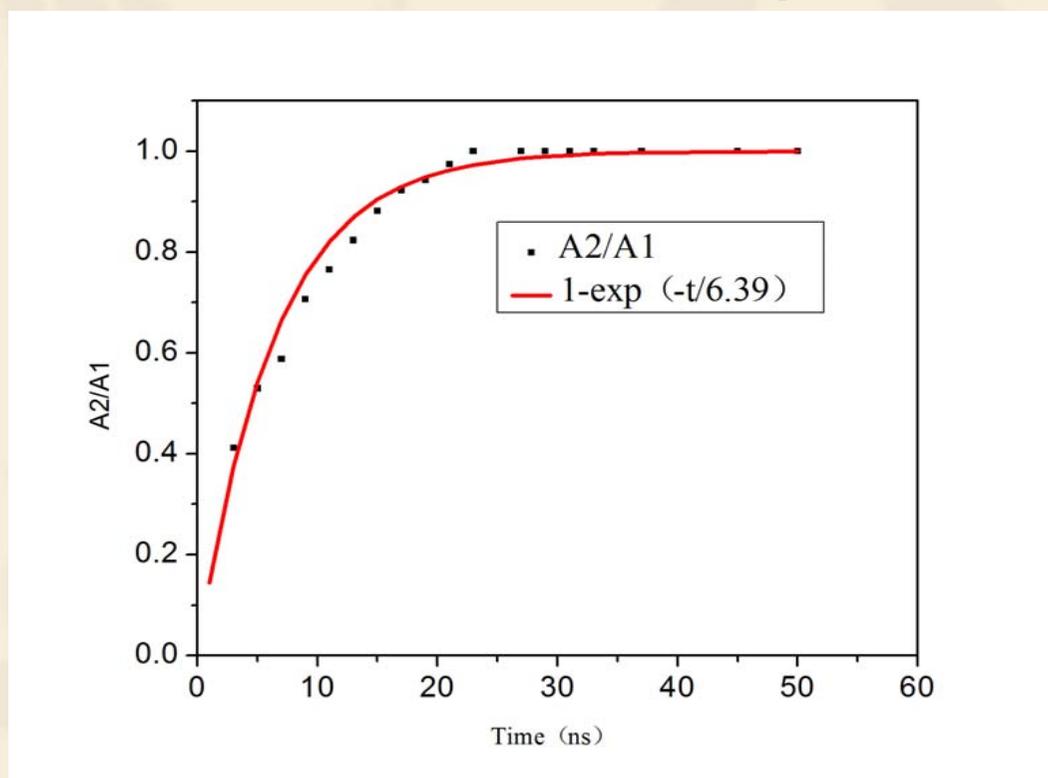


图8 推荐偏压下恢复时间测量

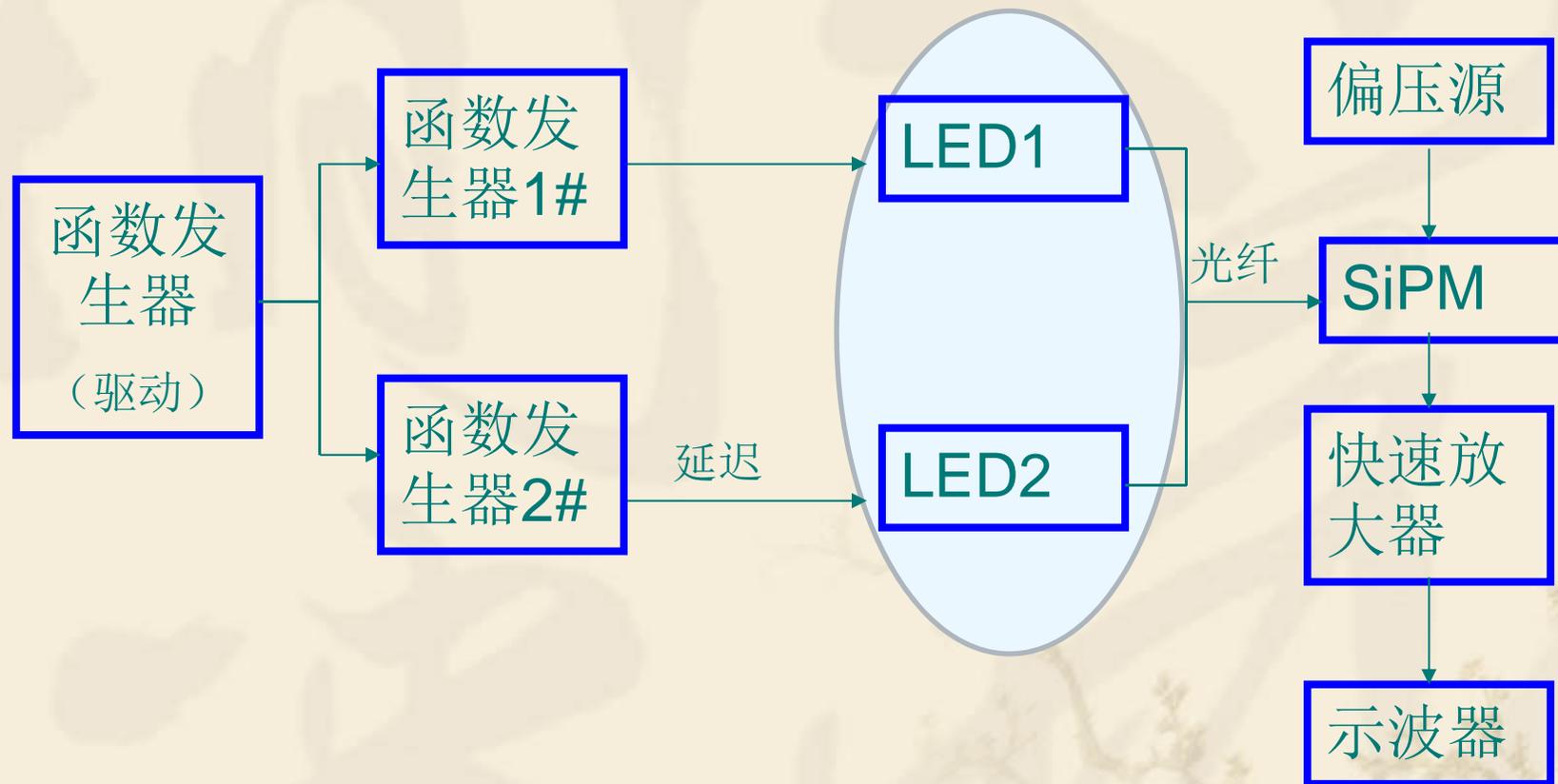


图9 双脉冲光测量恢复时间系统

四、总结

- 1、我们提出的测量流程，可准确测量SiPM的 V_b 、 I_d 、 D_c 、 G 、PDE等重要参数，有利于针对大型高能物理实验对SiPM进行有效质量控制。
- 2、目前新器件实验室研制的比较成熟的大动态范围SiPM的特性指标是：
尺寸 1mm^2 ，单元密度 $10000/\text{mm}^2$ ，最大偏压下500nm处PDE为12.8%、暗计数率在0.5p.e阈值为2.91MHz，推荐偏压下增益为 2×10^5 ，能够有效缓解大动态范围与高探测效率不能兼顾的矛盾。

谢谢!