

T/ZOIA

中关村光电产业协会团体标准

T/ZOIA 3002—2024

硅光电倍增管性能测试方法

Silicon Photomultiplier Performance Test Method

(报批稿)

(2024.2)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2024 - 02 - 04 发布

2024 - 02 - 04 实施

中关村光电产业协会 发布

目 次

前言.....II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 一般要求..... 2

5 详细要求..... 3

参考文献..... 12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由北京邮电大学提出。

本文件由中关村光电产业协会归口。

本文件起草单位：北京邮电大学、无锡中微晶园电子有限公司、上海联影医疗科技股份有限公司、中国科学院高能物理研究所。

本文件主要起草人：郭霞、胡安琪、李少斌、刘巧莉、张明、王涛、安少辉、韩振杰、钱森、夏江腾、张世凤、任艳玲。

硅光电倍增管性能测试方法

1 范围

本文件界定了硅光电倍增管（Silicon Photomultiplier, SiPM）的术语，规定了其光电参数的测试方法。

本文件适用于SiPM性能的测试，与芯片尺寸、像素数目、封装形式无关。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 11499-2001 半导体分立器件文字符号

GB/T 15651 半导体器件 分立器件和集成电路 第5部分：光电子器件

3 术语和定义

GB/T 11499-2001和GB/T 15651界定的以及下列术语、定义适用于本文件。

3.1

反向击穿电压 reverse breakdown voltage

V_{BR}

暗环境下，通过硅光电倍增管的反向电流骤然增加对应的电压。

3.2

暗电流 dark current

I_D

无光照并在试样两端施加规定的反向偏置电压时，通过试样的电流。

3.3

过偏压 over voltage

V_{ov}

高于反向击穿电压以上的电压。

3.4

增益 gain

M

暗环境下，一定过偏压下的单个像素产生的电荷量与电子电量之比。

3.5

暗计数率 dark count rate

DCR

暗环境下，单位时间内产生的雪崩事件数。

3.6

探测效率 photon detection efficiency

PDE

探测到入射光子的概率。

3.7

单光子时间分辨率 single-photon timing resolution

$SPTR$

当单光子脉冲照到硅光电倍增管，输出脉冲时间分布的宽度，以输出脉冲时刻统计直方图的半高宽来度量。

3.8

后脉冲 after pulsing

AP

雪崩产生的载流子被材料中缺陷、陷阱等俘获后再释放触发雪崩的电学信号。后脉冲信号幅度一般比雪崩信号脉冲幅度小，且发生在雪崩信号脉冲之后。

3.9

串扰 crosstalk

CT

某一像素触发相邻像素雪崩的概率。

3.10

线性度 linearity

规定时刻范围内，终端时刻与初始时刻触发脉冲幅度相对变化率与入射到靶面的光子数目相对变化率之比，即

$$Linearity = \frac{\frac{A_{output}(t_2) - A_{output}(t_1)}{A_{output}(t_1)}}{\frac{A_{input}(t_2) - A_{input}(t_1)}{A_{input}(t_1)}} \Big|_{t_2 > t_1}$$

式中：

t_1 —初始时刻；

t_2 —终端时刻；

$A_{input}(t_1)$ —初始时刻入射到靶面的光子数目；

$A_{input}(t_2)$ —终端时刻入射到靶面的光子数目；

$A_{output}(t_1)$ —初始时刻触发脉冲幅度；

$A_{output}(t_2)$ —终端时刻触发脉冲幅度。

3.11

动态范围 dynamic range

DR

线性响应范围内，硅光电倍增管探测到的最大光子数与最小光子数的比值。

3.12

上升时间 rise time

触发脉冲上升沿幅度的10%与90%之间的平均时间间隔。

4 一般要求

4.1 总则

硅光电倍增管测试的具体要求应在相关文件中规定，若不指明出处时，本标准中使用“按规定”一词时，指按相关文件的规定。

4.2 测试仪器仪表

4.2.1 通则

各相关参数的测试仪器仪表应预先进行计量检定或校准。

4.2.2 直流测试仪器

准确度优于 0.02%，宽带噪声优于 2 mV_{rms}。

4.2.3 示波器

带宽应高于待测硅光电倍增管的触发脉冲频率，采样率至少高于触发脉冲频率的 2 倍。

4.2.4 脉冲激光光源

激光光源的时间抖动至少小于待测硅光电倍增管时间抖动的 1/2。

4.2.5 放大模块

-3 dB带宽应高于待测硅光电倍增管的触发脉冲频率。

4.3 测试工作状态

4.3.1 选择工作点

测试时，不允许超过硅光电倍增管极限参数所规定的值，比如最大工作电压、最大阳极电流等。

4.3.2 选择负载电阻、电容

应根据硅光电倍增管芯片参数的情况，选择相应的负载电阻和电容，以确保测量系统的阻抗匹配和信噪比。

4.4 测试环境条件

4.4.1 测量用标准大气条件

- a) 环境温度：15 °C ~ 35 °C；
- b) 相对湿度：25% ~ 75%；
- c) 气压：86 kPa ~ 106 kPa。

4.4.2 其他环境条件

除另有规定外，其他环境条件应按下列规定：

- a) 测试环境应无影响测量准确度的机械振动、静电、电磁等干扰；
- b) 测试系统要有足够测量预热时间，待测硅光电倍增管的全部光电参数应在热平衡下进行；
- c) 测量系统应接地良好，以保证测量结果的准确性；
- d) 测试室应具有光屏蔽条件，以避免环境光对待测硅光电倍增管性能的影响。

5 详细要求

5.1 暗电流

5.1.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的暗电流。

在待测硅光电倍增管两端施加反向偏压时，当电场强度高于载流子碰撞电离阈值时，pn 结发生雪崩击穿，引起电流骤增，定义此时的偏压为反向击穿电压。反向击穿电压是正温度系数，且与光照条件相关，因此，反向击穿电压的测量要标明测试温度和光照条件。

5.1.2 暗电流测试方法

测试原理图见图1。

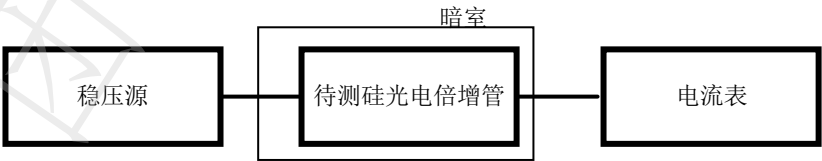


图1 暗电流测试原理图

5.1.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 1 连接测试系统；
- b) 设置施加在试样两端的反向偏置电压扫描范围，并记录电流值，即为暗电流。

5.1.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏置电压。

5.2 反向击穿电压

5.2.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的反向击穿电压数值。

在待测硅光电倍增管两端施加反向偏压时，当电场强度高于载流子碰撞电离阈值时，pn 结发生雪崩击穿，引起电流骤增，定义此时的偏压为反向击穿电压。反向击穿电压是正温度系数，且与光照条件相关，因此，反向击穿电压的测量要标明测试温度和光照条件。

5.2.2 电流电压法

测试原理图见图1。

5.2.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 1 连接测试系统；
- b) 设置施加在待测硅光电倍增管两端的反向偏置电压扫描范围，并记录电流值，得到暗环境下的电流-电压曲线；
- c) 曲线中电流拐点对应的电压即为反向击穿电压。

5.2.2.2 规定条件

相关文件至少应规定环境测试温度。

5.2.3 光照法

测试原理图见图2。

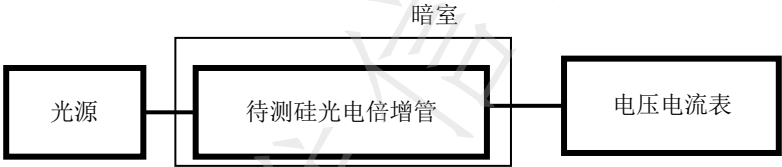


图2 光照法测试原理图

5.2.3.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 2 连接测试系统；
- b) 将特定波长的光照射到靶面上，设置施加在待测硅光电倍增管两端的反向偏置电压扫描范围，并记录电流值，得到光照条件下的电流-电压曲线；
- c) 曲线中电流拐点对应的电压即为反向击穿电压。

5.2.3.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 入射波长；
- c) 光照强度。

5.2.3.3 注意事项

若此方法测量得到的结果与电流电压法得到的反向击穿电压结果误差超过10%，以电流电压法为准。

5.3 增益

5.3.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的增益。

由增益公式可知，增益大小与像素尺寸（影响结电容）、偏置电压及温度相关。像素尺寸越大、过偏压越高，增益越大。此外，温度升高，击穿电压变大，为了使得过电压保持不变，需要根据这个温度系数同时提高硅光电倍增管的工作电压，从而稳定硅光电倍增管的增益。

5.3.2 电压-电容法

测试原理图见图3。

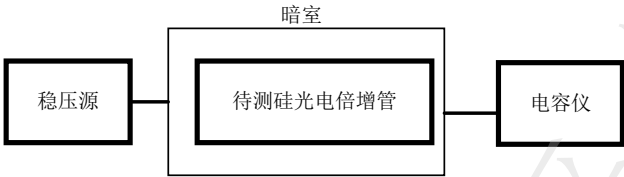


图3 电容-电压法测试原理图

5.3.2.1 测试步骤：

测试步骤如下：

- a) 按图 3 连接测试系统；
- b) 调节稳压源，设置施加在待测硅光电倍增管两端的反向偏置电压扫描范围，并记录电容值 C_j ；
- c) 按公式（1）和（2）计算待测硅光电倍增管的增益 M 。

$$C_j = \frac{C}{N_{\text{cell}}} \tag{1}$$

$$M = \frac{C_j \times (V - V_{\text{BR}})}{q} \tag{2}$$

式中：

C_j —硅光电倍增管单个微元电容值；

N_{cell} —硅光电倍增管微元数；

q —电子电荷量。

5.3.3 等效电荷法

测试原理图见图4。

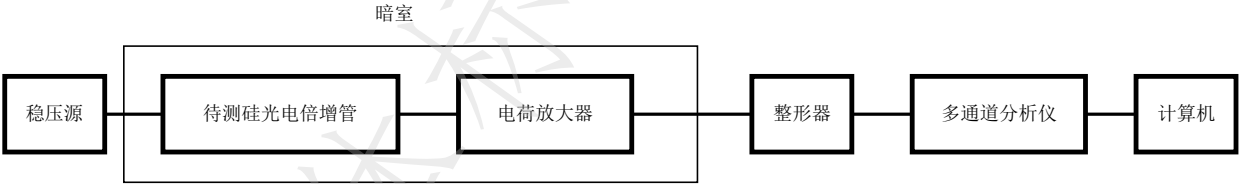


图4 等效电荷法测试原理图

5.3.3.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 4 连接测试系统；
- b) 调节稳压源，给待测硅光电倍增管施加规定的偏置电压；
- c) 信号经放大、整形后进入多通道分析仪并在计算机输出直方图，其中，x 轴为脉冲计数，左起每个峰对应于基座、1 个光子、2 个光子、3 个光子等，y 轴为数字化脉冲高度；
- d) 根据电荷放大器放大倍数和多通道分析仪的 A/D 转换因子，将直方图沿 x 轴任意两个连续峰值（基座噪声峰除外）的峰间距（单倍幅值对应道数）转换为等效电荷量，之后根据公式（3）算出该偏置电压下单倍幅值脉冲对应的净输出电荷即为增益 M ；

$$M = \frac{N_{\text{ch}} \cdot r}{m \cdot q} \tag{3}$$

式中：

N_{ch} —单倍幅值对应道数；

r —A/D 转换因子；

m —放大器放大倍数。

- e) 按照上述方法测试得到不同偏置电压下的增益；

5.3.3.2 规定条件

相关文件至少应规定环境测试温度。

5.3.3.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 除采用多通道分析仪外，还可以采用电荷数字转换器；
- b) 该测试方法统计的输出脉冲数目必须足够多以便创建有效的直方图；
- c) 在低过偏压或暗计数水平太低时，可以用低强度光照射待测硅光电倍增管，以增加输出脉冲数目；
- d) 若此方法测量得到的结果与电压-电容法得到的增益结果误差超过 10%，以电压-电容法为准。

5.4 暗计数率

5.4.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的暗计数率。

暗计数是硅光电倍增管主要噪声之一。通常，由缺陷、陷阱等释放的载流子、中性区扩散至高场区的载流子、耗尽区内热激发产生的载流子、隧道效应产生的载流子等都存在触发雪崩的可能，从而引起暗计数。过偏压和温度是影响暗计数的主要因素，过偏压增大，温度升高，都会导致暗计数增大。

5.4.2 脉冲计数法

测试原理图见图 5。

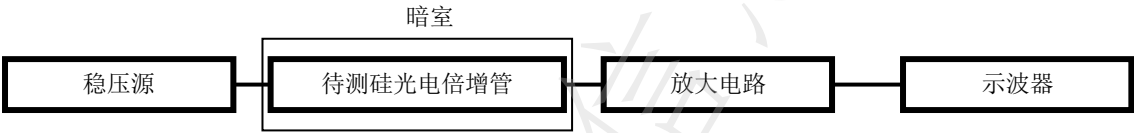


图5 暗计数率测试原理图

5.4.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 5 连接测试系统；
- b) 调节稳压源，在待测硅光电倍增管两端施加规定反向偏置电压；
- c) 测试时间 T 内高于规定阈值的脉冲计数 N_d ；
- d) 按公式 (4) 得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的暗计数率 DCR 。

$$DCR = \frac{N_d}{T} \tag{4}$$

5.4.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏置电压；
- c) 规定阈值一般为 0.5 pe (photon equivalent)，即 1 个光子引发雪崩脉冲幅度的 0.5 倍。

5.4.2.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 除使用示波器外，还可以采用计数器；
- b) 测试中若出现堆叠现象，可以采用高通滤波器对输出波形进行整形以消除干扰。

5.4.3 扫描阈值法

测试原理图见图 5。

5.4.3.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按图 5 连接测试系统；
- b) 调节稳压源，在待测硅光电倍增管两端施加规定反向偏置电压；
- c) 从低到高设置比较阈值，并测试时间 T 内高于设定阈值的脉冲计数 N_D ；
- d) 按公式 (5) 得到不同比较阈值下待测硅光电倍增管的计数率 DCR ；

$$DCR = \frac{N_D}{T} \tag{5}$$

- e) 以比较阈值为横坐标、计数率为纵坐标做图得到计数率的阈值阶跃图，其中，第一台阶对应的计数率即为暗计数率。

5.4.3.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；

b) 反向偏置电压。

5.4.3.3 注意事项

注意事项如下：

- 除使用示波器外，还可以采用计数器；
- 测试中若出现堆叠现象，可以采用高通滤波器对输出波形进行整形以消除干扰；
- 若此方法测量得到的结果与脉冲计数法得到的暗计数率结果误差超过 10%，以脉冲计数法为准。

5.5 串扰

5.5.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管串扰。

串扰分为瞬时串扰和延迟串扰。当像素发生雪崩后，电子空穴对复合发射的光子，有一定的概率触发邻近像素发生雪崩，这个现象称为瞬时串扰。由于是光子触发的串扰信号，又称为光串扰。雪崩过程中产生的载流子有一定概率通过衬底进入邻近像素触发雪崩，这个现象称为延迟串扰。由于是载流子触发的串扰信号，又称为电串扰。

串扰与反向偏压和温度有关，反向偏压越大，温度越高，串扰越严重。

5.5.2 瞬时串扰测试方法

测试原理图见图 5。

5.5.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- 按照图 5 连接测试系统；
- 调节稳压源，在待测硅光电倍增管上施加规定的反向偏置电压，在示波器上得到经放大电路后的输出信号波形；
- 统计时间窗口 T 范围内大于低、高阈值的脉冲计数 N_{d1} 和 N_{d2} ；
- 按公式 (6) 得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的瞬时串扰 CT_p 。

$$CT_p = \frac{N_{d2}}{N_{d1}} \quad (6)$$

5.5.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- 环境测试温度；
- 反向偏置电压；
- 高、低阈值一般选择 1.5 pe 与 0.5 pe。

5.5.3 延迟串扰测试方法

测试原理图见图5。

5.5.3.1 测试步骤

测试步骤如下：

- 按照图 5 连接测试系统；
- 调节稳压源，在待测硅光电倍增管上施加规定的反向偏置电压，在示波器上得到经放大电路后的输出信号波形；
- 统计雪崩脉冲间隔时间值，并做时间间隔统计直方图；
- 直方图左数第一个包络包含计数记为 C_0 ，直方图总个数为 S 按公式 (7) 得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的延迟串扰 CT_e 。

$$CT_e = C_0 / S \quad (7)$$

5.5.3.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- 环境测试温度；
- 反向偏置电压。

5.6 探测效率

5.6.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管探测效率。

探测效率是指探测到入射光子的概率，通常用被探测到的光子数与入射总光子数之比来表示。影响光子探测效率的因素有：

- a) 量子效率 η ，即硅光电倍增管将入射光子转换成电子空穴对的概率；
- b) 雪崩触发几率 R ，即为载流子触发雪崩的概率。通常电场越强，雪崩触发几率越大；
- c) 填充因子 FF ：硅光电倍增管感光面积与总面积之比。

5.6.2 探测效率测试方法

测试原理图见图6。

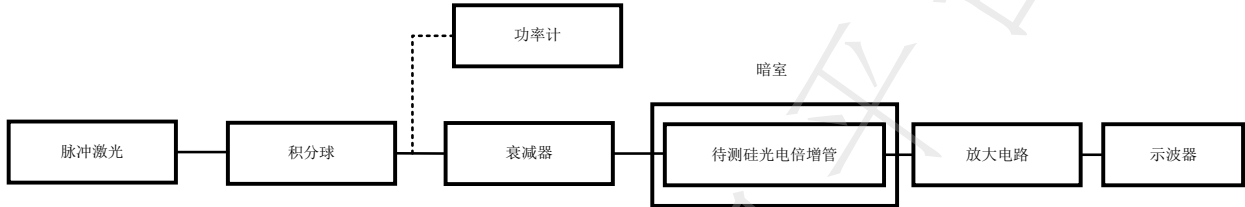


图6 探测效率测试原理图

5.6.2.1 测试步骤

测试步骤如下

- a) 按照图 6 连接测试系统；
- b) 标定脉冲激光光源通过积分球后输出光功率 P_{in} ，计算经过衰减器后，对于特定波长的每激光脉冲平均光子数 N ；

$$N = \frac{P_{in}\lambda D}{hcf} \quad (8)$$

式中：

N —每激光脉冲平均光子数；
 D —衰减器衰减系数；
 f —脉冲光重复频率；
 h —普朗克常数；
 c —光速。

- c) 脉冲激光光功率不变并保持光路不动，将待测硅光电倍增管置于衰减器后，并在特定的工作偏压下，通过示波器记录时间窗口 T 范围内大于高、低阈值的脉冲计数 M_1 和 M_2 ；
- d) 关闭光源，在相同偏压下测试暗环境下待测硅光电倍增管时间窗口 T 范围内大于相同高、低阈值的脉冲计数 M_{d1} 和 M_{d2} ；
- e) 根据公式（9）计算有效光计数 r ；

$$r = M_1 - M_{d1} - (M_2 - M_{d2}) \quad (9)$$

- f) 根据泊松分布及公式（10）得到每激光脉冲探测到的平均光子数 n ；

$$\frac{r}{Nf} = 1 - e^{-n} \quad (10)$$

- g) 根据公式（11）得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的 PDE 。

$$PDE = n/N \quad (11)$$

5.6.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏置电压；
- c) 入射波长。

5.6.2.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 除选用脉冲激光外，还可以选用经信号发生器、斩波器等调制的发光二极管灯或其他稳定光源；
- b) 积分球出口出应再次测量激光脉冲频率以确保光功率标定。

5.7 单光子时间分辨率

5.7.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管单光子时间分辨率。

影响硅光电倍增管单光子时间分辨率的因素主要有：像素本征时间分辨率、像素间时间分辨率差异、电子学噪声波动、互电极连线长度差异、激光线宽、读出电路等引起时间抖动等，以及入射波长、偏置电压、光敏面尺寸等。

5.7.2 单光子时间分辨率测试方法

测试原理图见图 7。

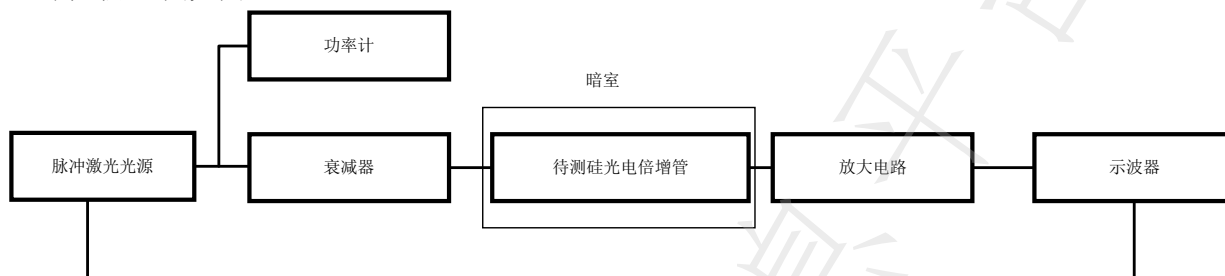


图7 单光子时间分辨率测试原理图

5.7.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- 按照图 7 连接测试系统；
- 按照 5.6.2.1 步骤 b) 使得脉冲光源经过衰减器后每脉冲平均约 1 光子左右；
- 将参考信号与硅光电倍增管输出信号接入示波器；
- 在待测硅光电倍增管上施加规定的反向偏置电压，通过在线或离线的方式筛选真实的单光子信号，采集单光子信号与参考信号之间的延迟时间，以延迟时间为横坐标、延迟时间出现的次数为纵坐标作延迟时间直方图；
- 对得到的延迟时间直方图进行高斯拟合，取高斯拟合曲线半高宽作为系统时间抖动 Δt ；
- 按公式 (10) 得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的单光子时间分辨率 Δt_{SiPM} 。

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{SiPM}^2 + \Delta t_{light}^2 + \Delta t_{other}^2} \quad (10)$$

式中：

Δt_{SiPM} —SiPM 本征时间分辨率；

Δt_{light} —脉冲激光时间分辨率；

Δt_{other} —其他部分时间分辨率。

5.7.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- 环境测试温度；
- 反向偏压；
- 入射波长。

5.7.2.3 注意事项

除选用示波器外，还可以选用时间相关单光子计数器等。

5.8 线性度和动态范围

5.8.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的线性度和动态范围。

硅光电倍增管是多个像素（雪崩光电二极管）的并联，所以其输出为多个像素的并联输出，输出幅度与响应的像素数目有关。然而每个像素只能探测是否有光子入射，所以当有一个像素有两个或两个以上光子同时入射时，像素也只会输出相同幅度的输出脉冲，这时输出会呈现非线性。因此，当在一定的光强下，线性度与像素数目成正比。

在线性度范围内，输出脉冲数与输入光子数成正比，因此，像素数目越多，动态范围越大。

5.8.2 光电流法

测试原理图见图8。

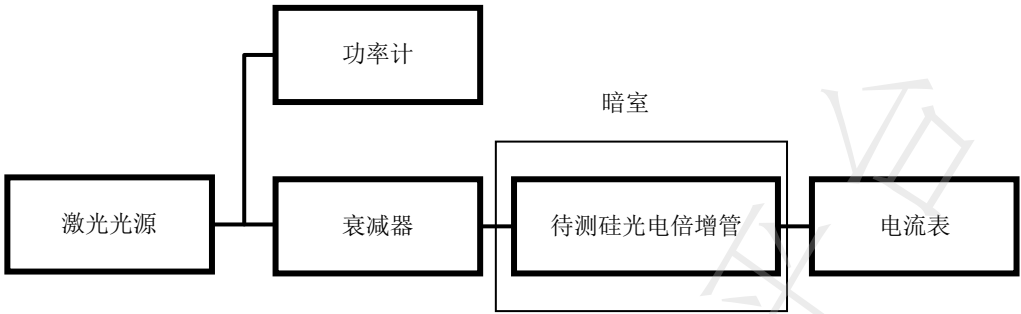


图8 光电流法测试原理图

5.8.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按照图 8 连接测试系统；
- b) 测试规定偏压下的暗电流值 I_d ；
- c) 在待测硅光电倍增管上施加规定的反向偏置电压，连续增大光功率并同时记录相对应的电流值 I_1 ；
- d) 按公式（11）得到不同输出光功率下的光电流 I_p ；
- e) 得到光功率与光电流曲线，即为线性度；
- f) 动态范围则为线性度曲线中线性度良好（斜率发生变化前）的部分最大光子数与最小光子数之比。

$$I_p = I_1 - I_d \tag{11}$$

5.8.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏压。

5.8.2.3 注意事项

- a) 若电流值太小，可以在待测硅光电倍增管后使用放大器；
- b) 若线性坐标不方便观察，可以用对数坐标。

5.8.3 光子数分辨法

测试原理图见图9。

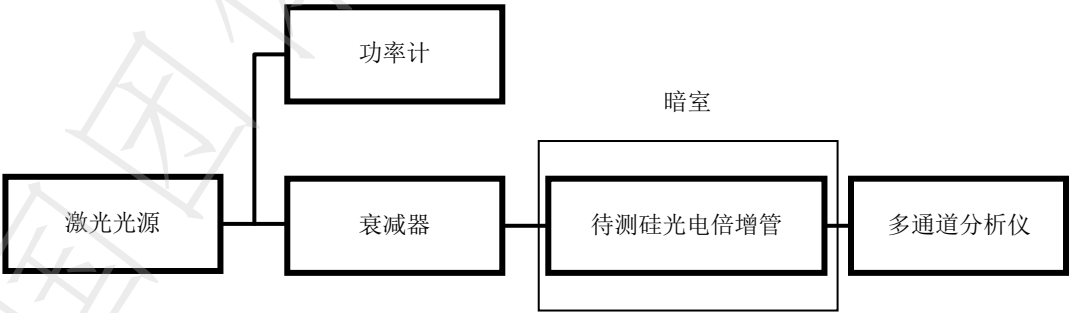


图9 光子数分辨法测试原理图

5.8.3.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按照图9连接测试系统；
- b) 将硅光电倍增管的输出信号接入多通道分析仪，设置合适的道宽和道数，覆盖硅光电倍增管的输出电信号范围；
- c) 用恒定的光源照射硅光电倍增管，改变光强度，记录多通道分析仪的输出道数和对应的光子数；
- d) 绘制输出道数和光子数的关系曲线，找到线性区间和饱和区间；
- e) 动态范围可以定义为线性区间的光子数范围，或者线性区间的输出道数范围。

5.8.3.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏压。

5.8.3.3 注意事项

若此方法测量得到的结果与光电流法得到的线性度和动态范围结果误差超过10%，以光电流法为准。

5.9 后脉冲

5.9.1 测试目的

在规定条件下，获得待测硅光电倍增管的后脉冲概率。

后脉冲是指在光子引发雪崩后，由于部分载流子被晶格缺陷捕获而未能及时释放，导致在下一次光子入射时，这些载流子重新参与雪崩，产生额外的输出脉冲。这些输出脉冲会干扰真实的光子计数，造成输出的非线性。

5.9.2 后脉冲测试方法

测试原理图见图 5。

5.9.2.1 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按照 5.5.3.1 步骤 a) 至步骤 c)；
- b) 直方图左数第二个包络包含计数记为 G_1 ，直方图总个数为 S 按公式 (12) 得到待测硅光电倍增管在规定反向偏置电压下的后脉冲概率 AP_e 。

$$AP_e = G_1 / S \tag{12}$$

5.9.2.2 规定条件

相关文件至少应规定如下条件：

- a) 环境测试温度；
- b) 反向偏压。

参 考 文 献

- [1] Acerbi, F., Gundacker, S., Understanding and simulating SiPMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 926, 16-35, 2019.
- [2] Eckert, P., Schultz-Coulon, H. C., Shen, W., Stamen, R., Tadday, A., Characterisation studies of silicon photomultipliers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620 (2-3), 217-226, 2010.
- [3] Hamamatsu Technical note—A technical guide to silicon photomultipliers (MPPC)
- [4] SensL: Application Note-Introduction to the Silicon Photomultiplier (SiPM)