



中华人民共和国国家标准

GB/T 23729—2009/IEC 62088:2001

闪烁探测器用光电二极管 试验方法

Photodiodes for scintillation detectors—Test procedures

(IEC 62088:2001 Nuclear instrumentation—
Photodiodes for scintillation detectors—Test procedures, IDT)

2009-05-06 发布

2009-12-01 实施

数码防伪

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

前 言

本标准等同采用 IEC 62088:2001《核仪器——闪烁探测器用光电二极管——试验方法》(Nuclear instrumentation—Photodiodes for scintillation detectors—Test procedures, 英文第 1 版)。

为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

——删去 IEC 62088:2001 的前言和目次;

——调整了少数参量符号的上、下标,并用小数点符号“.”代替作为小数点的逗号“,”;

——在计算公式的参量说明中,用长破折号“——”代替“是”;

——第 8 章标题“一般要求——数据表”改为“供应商应提供的数据”,并在“工作温度范围 $T_{\max} \sim T_{\min}$ 和贮存温度范围”一项后增加“工作湿度范围 $H_{\max} \sim H_{\min}$ 和贮存湿度范围”以及“工作气压范围 $P_{\max} \sim P_{\min}$ 和贮存气压范围”(在 4.2 中增加相应符号)。

本标准由中国核工业集团公司提出。

本标准由全国核仪器仪表标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:核工业标准化研究所、中国原子能科学研究院、北京核仪器厂。

本标准主要起草人:熊正隆、何高魁、肖晨、姚秋果、严陈昌。

引 言

光电二极管闪烁探测器是采用半导体光电二极管(通常是硅 PD)的闪烁探测器,当入射辐射(带电粒子、 γ 射线、X射线)在闪烁体中放出能量时,用于探测在闪烁体(通常是晶体)中产生的闪烁光(见图 1)。

光电倍增管(PMT)通常已经用于这个目的(对十进制计数),但随着低噪声和相对大面积光电二极管的最新出现,后者在增加应用数量、取得某些固有性能的优点等方面正在与光电倍增管激烈竞争:

- 小体积;
- 对磁场不敏感;
- 低工作电压和很低的功率消耗;
- 稍高的抗震能力。

闪烁探测器用光电二极管 试验方法

1 范围

本标准适用于在闪烁探测器或切伦科夫探测器中使用的固态光电二极管(PD)或光电二极管阵列(PDA)。本标准推荐的试验方法也适用于雪崩二极管(APD),但需要附加本标准描述的特殊试验方法。

本标准中描述的试验不是强制性的,但宜按这里描述的程序进行规定性能的试验。

本标准的目的是为闪烁探测器中使用的光电二极管建立标准试验方法,同时规定了供应商应提供的每种型号光电二极管的数据。

2 一般原则

硅光电二极管容易得到并广泛用于闪烁探测器。然而,它们围绕 900 nm 的峰响应与常用闪烁体 [NaI(Tl)、CsI(Tl)、BGO、CdWO₄、ZnSe(Te)] 在较短波长的最大发射不相匹配。正在进行的研究是开发具有较长波长光发射的闪烁体和较宽带隙的半导体。

光电二极管闪烁探测器没有内部放大器(APD 的情况除外),因而需要耦合到类似用于半导体探测器的低噪声前置放大器。光电二极管/前置放大器组合的噪声限制它在低能 γ 射线和 X 射线能谱测定中的使用。这个噪声由随其面积而增加的 PD 电容的串联噪声以及前置放大器的漏电流和输入阻抗的并联噪声来确定。为优选光电二极管/前置放大器的组合,有时将前置放大器与 PD 集成在一起。在这种情况下,这里描述的某些试验可能难于执行。

固态光电二极管也能用作直接电离的半导体探测器,但本标准不适用于已由 IEC 60333 包括的这种应用。

本标准不适用于混合光电探测器,即带有常规光阴极、加速电场和固态器件的真空管。

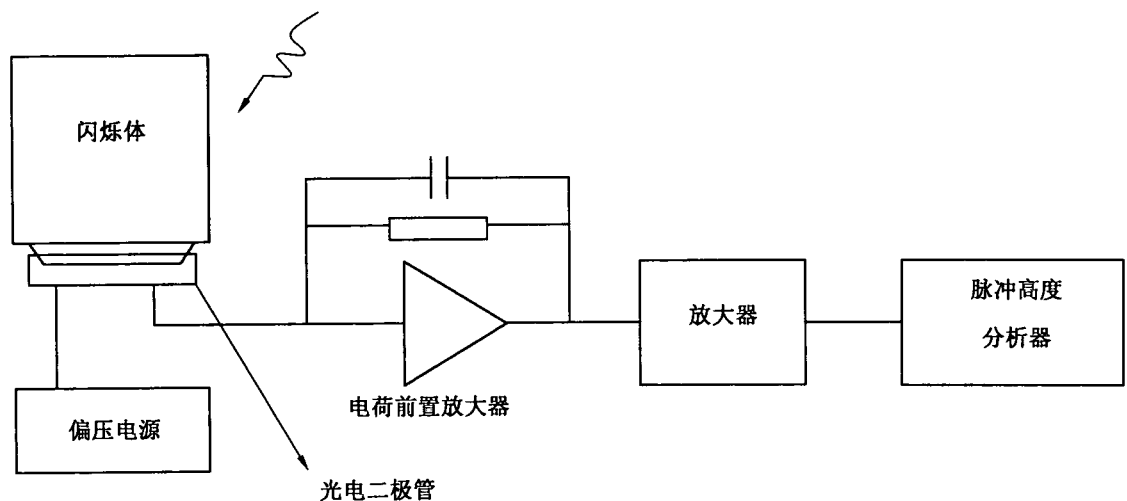


图 1 光电二极管闪烁探测器系统方框图

3 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究

是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

IEC 60050 (731):1991 国际电工词汇 731 章:光缆通信(International Electrotechnical Vocabulary—Chalter 731:Optical firbe communication)

IEC 60050 (845):1987 国际电工词汇 845 章:照明(International Electrotechnical Vocabulary—Chalter 845:Lighting)

IEC 60333:1993 核仪器 半导体带电粒子探测器 试验方法(Nuclear instrumentation—Semiconductor charged-particle detector—Test procedures)

IEC 61151:1992 核仪器 用于电离辐射探测器的放大器和前置放大器 试验方法(Nuclear instrumentation—Amplifies and preamplifies used with detector of ionization radiation—Test procedures)

4 定义、符号和缩略语

4.1 定义

下列定义适用于本标准。

4.1.1

雪崩光电二极管(APD) avalanche photodiode (APD)

带偏压工作,初始光电流通过半导体结的雪崩击穿而放大的光电二极管。

[IEV 845-05-40]

4.1.2

噪声等效功率(光电二极管的) noise equivalent power (of photodiode)

在其输出端对给定的波长、调制频率和等效噪声带宽产生等于 1 的信号噪声比时光探测器输入端的光辐射功率值。

[IEV 731-06-40]

4.1.3

光电流(I_{ph}) photocurrent (I_{ph})

由入射辐射引起的、光电探测器输出的那部分电流。

[IEV 845-05-52]

4.1.4

光电二极管 photodiode

由吸收两个半导体之间 P-N 结或半导体与金属之间结内附近的光辐射而产生光电流的光电探测器。

[IEV 845-05-39]

4.1.5

响应(探测器的)(s) responsivity (s)

灵敏度/敏感度(探测器的)(s) sensitivity (of a detector)(s)

探测器的输出 Y 除以探测器的输入 X 之商($s=Y/X$)。

[IEV 845-05-54]

4.1.6

光谱响应 spectral response

作为波长函数的响应。

注:响应通常以 A/W 为单位,波长以 nm 为单位。

4.2 符号

A 有效面积

APD	雪崩光电二极管
C	电容
G	APD 的增益
$h\nu$	光子能量
I_{ph}	光电流
I_r	漏电流
I_{max}	最大允许光电流
$I(U)$	电流-电压特性
λ	波长
λ_p	峰值响应波长
η	量子效率
NEP	噪声等效功率
P_{opt}	光功率
PD	光电二极管
PDA	光电二极管阵列
s	响应/灵敏度
T	温度
T_{max}/T_{min}	光电二极管工作的最高/最低温度
H_{max}/H_{min}	光电二极管工作的最高/最低湿度
P_{max}/P_{min}	光电二极管工作的最高/最低气压
U_b	工作偏压
U_{bn}	正常偏压
U_{bmax}	最大允许工作偏压
X_u	(有效面积测量用)扫描路径的有用长度或直径

5 物理特性

5.1 有效面积, A

光电二极管的有效面积,即有用面积,通常稍小于半导体晶片的总面积。这是由于结边沿的封装材料、电极和保护层的缘故,为最大限度减少漏电流(以及必然的噪声),它们可能是需要的。应测量有效面积,其方法如图 2 所示,即采用来自高稳定参考光源的准直入射光束,对放置在全黑暗环境的光电二极管的总面积进行扫描。

光电二极管应采用如同半导体探测器漏电流测量或绘制电流-电压特性一样的常规装置来配置偏压并与皮安表连接(见 IEC 60333)。

在光电二极管表面的点尺寸和任何方向的扫描间隔均应小于半导体晶片最大尺寸的 1/20,同时,在任何情况下,应小于 0.5 mm(见图 2 右边的例子)。

对每个描述路径,所测量光电二极管的光电流如图 2 所示绘图,而当光电流至少等于其最大值的 90%时,有用长度 X_u 按路径长度确定。有效面积,即按光电流至少等于其最大值的 90%时所规定的面积,由为每个扫描路径确定的所有单个 X_u 进行计算。应指明计算的细节。

有效面积可能取决于扫描光的波长。因此,应对光电二极管有用光谱范围中的几个波长测定有效面积。至少应对峰值响应波长 λ_p 、使用在 $\lambda_p \pm 50$ nm 发射的单色光源和过滤光源完成测量。

有效面积可能随偏压而稍微变化。至少应在正常偏压 U_{bn} 下完成一次测量。所有测量均应指明偏压。

对雪崩光电二极管,有效面积可能随采用电压而显著变化,正如增益(放大系数)在器件不同工作点

可能稍微变化一样。因此,也应测定和说明 G 等于 1 的有效面积。

这个测量通过扫描光电二极管的基本有效面积也能适用于光电二极管阵列。

一个替代的方法是使用脉冲光和光电二极管闪烁探测器的常规放大系统以测量脉冲光电流(见 6.7.2.1)。对集成设备,包括在同一封装中的光电二极管和前置放大器或甚至计算放大系统,应使用这个方法。正比于光电流脉冲的、放大脉冲的幅度对每个像素(图元)绘图,然后以上面描述的相同方法获取 X_u 和有效面积。

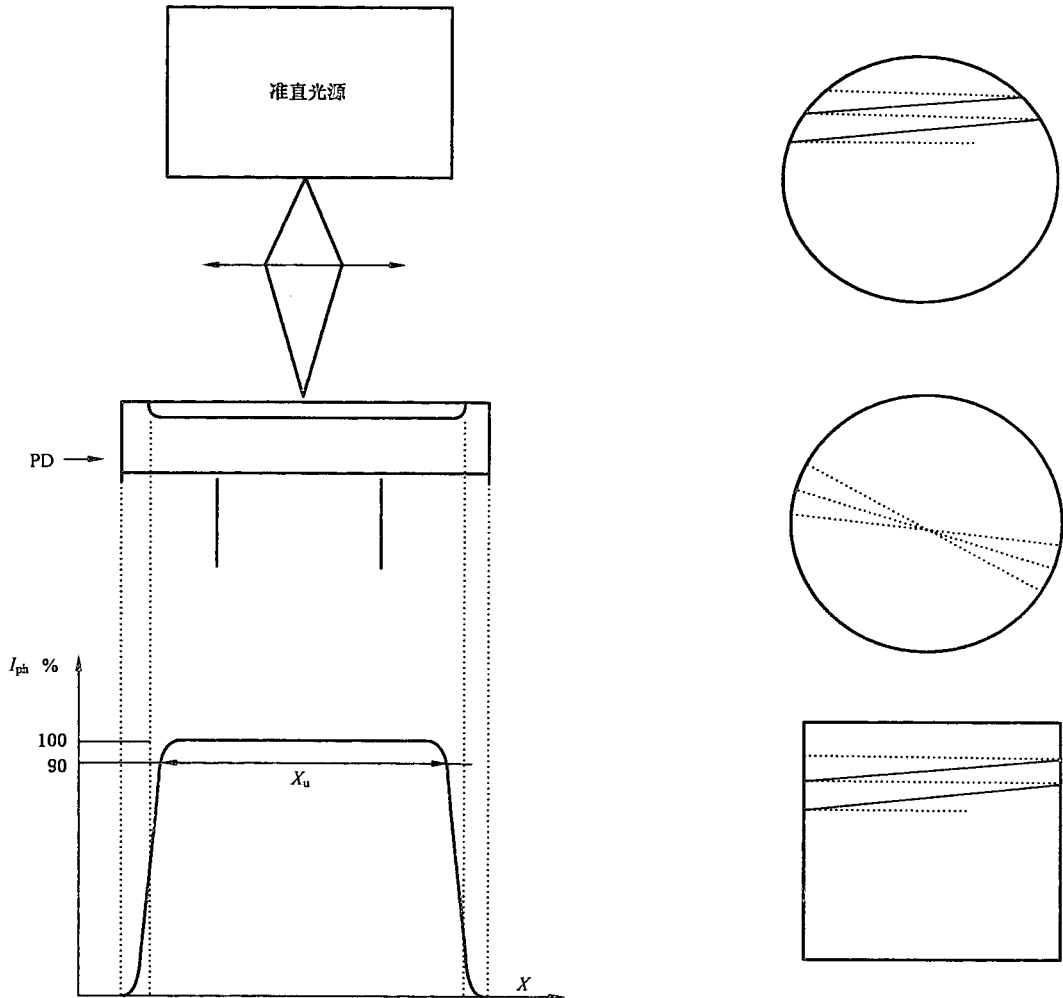


图 2 有效面积测量的装置(上左)和扫描例子

5.2 窗

尽管无窗光电二极管也是有用的,但光电二极管通常由保护层(窗)覆盖以防止闪烁体的机械应力、操作期间擦伤表面或光耦合剂污染表面。

制造商应指明(见第 8 章,数据表)窗的材料和折射率以及清洁光电二极管表面的可能性。如果允许清洁,则应指明能够擦去任何污染的严格条件以及填料和溶剂的类型。

6 电特性

6.1 概述

光电二极管电特性的测量在大多数情况下与 IEC 60333 中描述的直接电离半导体探测器的测量相同。这也是如同探测 IEC 60333 中描述的能量分辨率或噪声以及光电二极管/闪烁体/放大器系统的分辨力等参数一样的情况。

6.2 电容(量)

IEC 60333 中描述方法适用于电容(量)的测量。

由有效面积 A 和电容量 C 按式(1)计算耗尽层 d ：

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / d \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ϵ_r ——半导体的相对介电常数(电容率)；

ϵ_0 ——真空介电常数。

ϵ_r 、 ϵ_0 、 A 、 d 和 C 均以国际单位制表示。

6.3 漏电流 I_r 和电流-电压特性曲线 $I(U)$

6.3.1 测量

IEC 60333 中描述的测量方法适用。

注：由于光电二极管仅需要低的或中等的偏压，这个测量能使用特定配备的示波器方便完成，以绘制二极管和晶体管的电流-电压特性曲线。该设备具有进行直流或脉冲测量 $I(U)$ 的功能。当在击穿电压区域绘制 $I(U)$ 特性曲线时，推荐脉冲测量方法。对雪崩光电二极管，该方法特别可靠。

6.3.2 温度相关性

半导体光电二极管的漏电流 I_r 随温度呈指数增加，而光电二极管的并联噪声在最高工作温度(60℃)附近可成为光电二极管/放大器组合的总噪声的主要贡献。所以，宜在整个工作温度范围内给出漏电流与温度的相关性。

对正常偏压 U_{bn} ，至少应指明正常温度下的漏电流 I_r ，还应指明最高温度 T_{max} 下的漏电流 I_r 。

6.4 上升时间

IEC 60333 中描述的测量方法适用。

注：为避免混乱，在给出上升时间时宜指明是哪个上升时间：

- a) 单纯光电二极管；
- b) 光电二极管闪烁探测器；
- c) 耦合到放大器的光电二极管；
- d) 耦合到放大器的光电二极管闪烁探测器。

6.5 光电二极管闪烁探测器使用的前置放大器和放大器

为核辐射探测而与光电二极管闪烁探测器配合使用的前置放大器和放大器，相同于与半导体探测器配合使用的前置放大器和放大器。

IEC 61151 中描述的测量方法适用。

6.6 噪声和分辨力测量

噪声可用测能量分辨力的方法测量，此时 IEC 60333 和 IEC 61151 中描述的测量方法适用。

6.7 雪崩光电二极管的增益(G)

6.7.1 概述

雪崩光电二极管的增益，对恒定入射的光强度，是在给定电压发生倍增时测量的光电流与在低电压无倍增时测量的光电流之比值。

雪崩光电二极管的增益与偏压密切相关，也与温度有关，特别是靠近击穿电压时。

雪崩光电二极管的制造商应给出(见第8章数据表)：

- a) 雪崩光电二极管能工作的最大电压 U_{bmax} (或最大增益)；
- b) 增益作为偏压函数的曲线，或如果推荐正常偏压 U_{bn} 时， U_{bn} 附近的斜率 $\Delta G / \Delta U$ ；
- c) 至少在 U_{bn} 和 U_{bmax} 增益与温度的相关性。

6.7.2 测量

为测量闪烁探测器的雪崩光电二极管增益，可使用两个方法测量作为电压函数的光电流：

- a) 测量恒定照度的直流光电流的一般方法；
- b) 使用传统的核谱测定、脉冲放大器和分析系统的脉冲光方法。

6.7.2.1 脉冲光方法

雪崩光电二极管光谱测定系统(见图 3)包括滤波和高稳定度的偏压电源、电荷前置放大器、线性成形放大器和模-数变换器(ADC)。

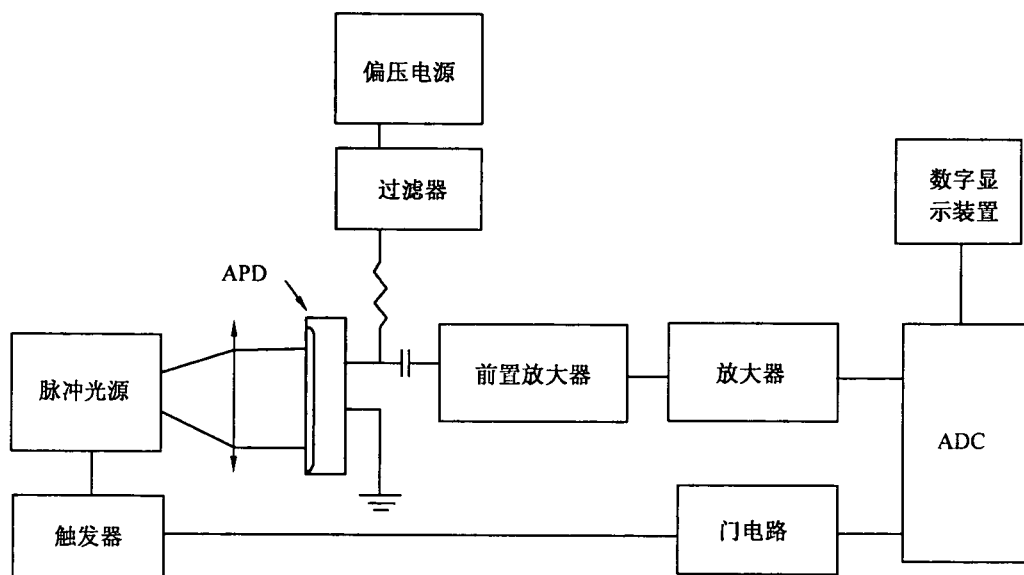


图 3 脉冲法雪崩光电二极管增益测量装置的方框图

在这个测量中推荐使用交流 AC 耦合到前置放大器,以避免带偏压的直流电荷。

来自带启动装置的稳定光源的快光脉冲直接加到光电二极管。光斑应覆盖雪崩光电二极管的整个有效面积,以保证测量足以代表闪烁计数器中所遇到的状态。

应指明光脉冲的波长,其响应并应在高于峰值响应 λ_p 的 50% 波长范围内(见第 7 章)。

光脉冲的上升时间应小于前置放大器上升时间的 1/10。

雪崩光电二极管的信号脉冲由电荷灵敏前置放大器和主线性放大器放大和成形,并给出与光电流 I_{ph} 成正比的脉冲电压。成形放大器输出脉冲的高度由 ADC 数字化,并按半对数标尺以适宜单位(图 4 左边的标尺)绘制出作为偏压函数的曲线图(见图 4)。

注:某些 ADC 可能需要门控(选通)(接收进入的脉冲);这能容易使用脉冲光源的触发器实现。

这个曲线的低偏压部分表明一个平坦的水平部分(图 4 的 ab 段),这是没有发生放大时的偏压范围。一个 1 的增益指定给那个范围,因而半对数标尺被换档(右标尺)以直接给出“增益-偏压”关系。

入射光强度(入射光功率)应位于雪崩光电二极管的线性范围,对恒定的偏压和温度,光强度降低或增高 10 倍,则光电流也应同样减少或增加 10 倍。

放大系统和 ADC 的线性度范围应比输出脉冲的动态范围高 1 个数量级,也就是比被测增益的动态范围高十倍(例如对 1 000 的增益线性范围为 4 个数量级)。

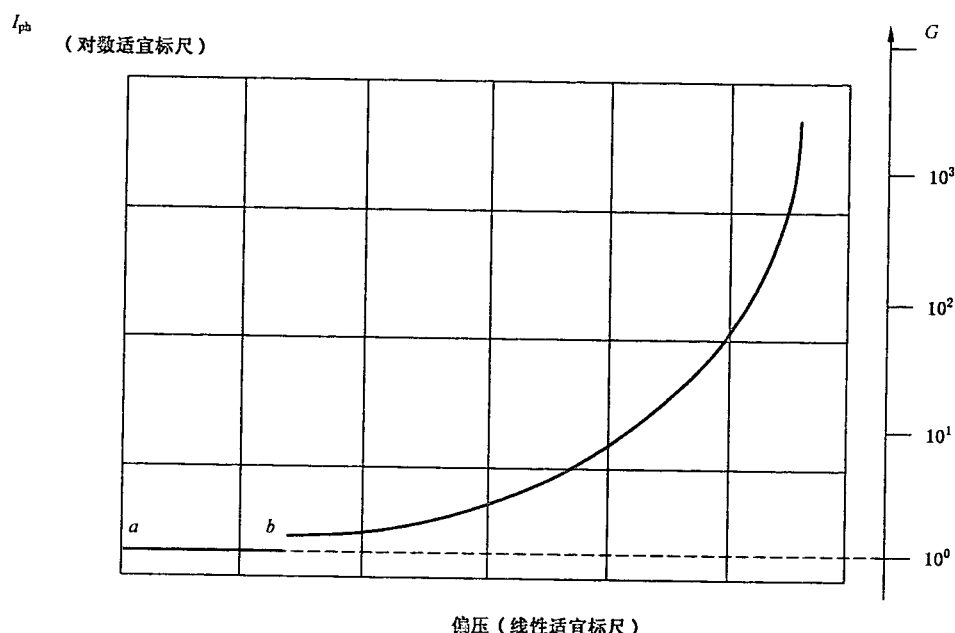


图4 雪崩光电二极管光电流和增益与偏压的关系

6.7.2.2 直流(DC)耦合方法

测量系统包含一个高稳定的偏压电源和一个与雪崩光电二极管串联的宽动态范围的电流表(如图6所示,除光电二极管宜由雪崩光电二极管替代外)。

如6.7.2.1一样测量光电流,将光电流(对恒定的入射光)作为所采用偏压值的函数绘图,并按同样的方法测定增益。

6.7.2.1的大多数要求对本方法也是有效的:

- 光斑应覆盖雪崩光电二极管的整个有效面积,以保证测量代表闪烁计数中遇到的状态;
- 应指明光脉冲的波长,其响应应当在高于峰值响应50%的波长范围内;
- 入射光强度(入射光功率)应位于雪崩光电二极管的线性范围内:对恒定的偏压和温度,光强度降低或增高10倍,光电流也增加或减少同样的10倍;
- 电流表的线性范围至少应比被测增益高1个数量级(例如,对1000的增益线性范围为4个数量级)。

6.7.3 增益的温度相关性

正如6.7中所指出,雪崩光电二极管的增益对温度很敏感,特别是当雪崩光电二极管的偏压靠近击穿电压工作时,其高增益值对温度更敏感。因为击穿电压随温度变化而改变,当温度升高时,在固定偏压工作的雪崩光电二极管可能永久损坏。因此,在进行这种测量时,宜足够小心。

用于测量的装置与6.7.2相同。增添加热和制冷系统以改变整个工作范围内的温度。这个系统(例如小加热炉或耦合到热电冷却器的加热设备)不是本标准的一部分。宜仔细设计,以避免附加到雪崩光电二极管和前置放大器的任何噪声分量,例如由于雪崩光电二极管与前置放大器之间的超长电缆引起的脉动和增加的串联噪声。

由于新近的问题或在雪崩光电二极管和前置放大器集成在单个组件时,雪崩光电二极管和前置放大器总是不能分开测量。在这种情况下,前置放大器也将加热或冷却,这应予以说明。

应按6.7.2描述的程序至少对工作温度范围的最高温度值 T_{\max} 和最低温度值 T_{\min} 进行测量。

从在 T_{\max} 和 T_{\min} 时 G 与偏压的关系曲线,对给定偏压值 U_b ,测定 $G_{T,\max}$ 值和 $G_{T,\min}$ 值。增益在 U_b 下随温度变化的平均值由式(2)给出:

$$\frac{\Delta G}{\Delta T} = \frac{G_{T, \max} - G_{T, \min}}{T_{\max} - T_{\min}} \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta G/\Delta T$ 以 K^{-1} 为单位。

7 光特性

7.1 概述

光电二极管闪烁探测器中的重要参数是量子效率 η 、响应 s (也称为灵敏度) 和噪声等效功率 (NEP)。

这些取决于波长的参数能从光谱响应的测量得到。

7.2 量子效率(η)

量子效率是每个人射光子产生的电子-空穴对的数量, 见式(3):

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

I_{ph} ——光电流, 单位为安培(A);

e ——电子电荷数, 单位为库仑(C);

P_{opt} ——入射光功率, 单位为瓦(W);

$h\nu$ ——光子能量, 单位为焦耳(J)。

量子效率也可表示为式(4):

$$\eta = \frac{I_{ph}}{P_{opt}/h\nu} \dots\dots\dots (4)$$

式中 $h\nu$ 的单位为电子伏特(eV)。

注: 式(4)中 I_{ph} 的实际是 I_{ph} (A)/1(C), 单位为安培/库仑(A/C), 或认为 η 是无量纲的(本标准说明)。

量子效率的测量相当复杂, 因为它要求知道作为波长函数的反射率, 也要求知道可能如光子透射率一样取决于 λ 的电荷收集效率。

对闪烁应用, 由于响应是包含许多因子的全局参数, 所以它是较贴切的品质因数。

7.3 响应

响应是光电流与入射光功率之比值, 见式(5):

$$s = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{1240} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

s ——响应, 单位为安培每瓦(A/W);

λ ——波长, 单位为纳米(nm)。

其他符号如式(4)所定义。

7.4 光谱响应

光电二极管的光谱响应(4.1.6)由测量作为波长(nm)函数的响应(A/W)来测定。典型光电二极管的光谱响应如图5所示。

在响应曲线的左边部分(区域I)出现短波长(高能量)响应降低, 因为短波长的光吸收系数值很大(大于或等于 10^{-5} cm^{-1}), 而辐射在接近复合时间很短的表面时被吸收。于是光电荷载流子在收集到 p-n 或 p-i-n 区域前就这样复合。

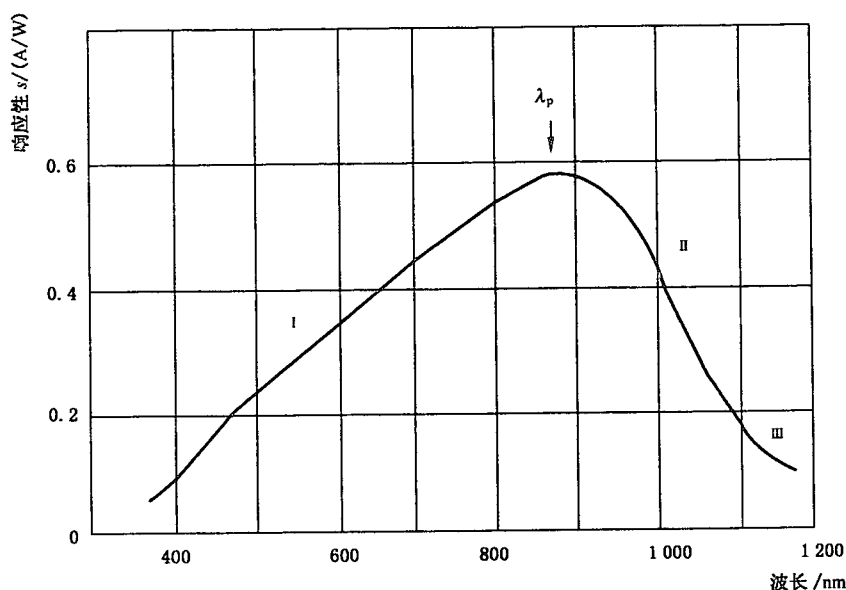


图5 光电二极管的光谱响应

峰值响应波长 λ_p 后的较长波长处(区域Ⅱ)由半导体能带宽度确立,例如对硅为大约 1 100 nm。

对大于相应能带宽度波长的波长,吸收系数在理想的半导体中宜是“0”。但深俘获程度的出现可引起某些非固有(外来)光电流,同时曲线可出现一个尾部(区域Ⅲ)。该尾部的存在与光电二极管由于俘获/反俘获过程定时特性的劣化相关联。

测量装置的方框图见图 6。

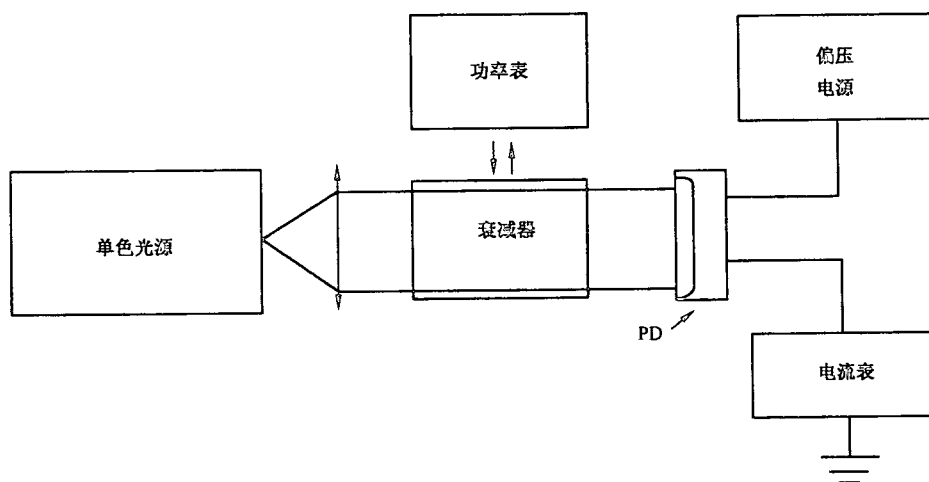


图6 光电响应测量装置

来自稳定光源的单色光平行束直接对准光电二极管照射。光斑范围应全部包含在有效面积内,但至少应布满该有效面积的 90%,以得到整个光电二极管的光谱响应表达式。

功率表布置在光束中以测量光功率 P_{opt} ,然后移去功率表并用与光电二极管和偏压电源串联的皮安表或纳安表测量光电流。

对光电二极管有用范围的几个波长重复使用该程序测量光功率和光电流。

为确保光电二极管在线性范围内工作,带校准衰减系数的光过滤器装置应布置在光束中。光电流应按相同的系数减小。

光电响应 I_{ph}/P_{opt} 作为波长的函数绘图(图 5),同时测定对应峰值响应的波长 λ_p 。

7.5 噪声等效功率

噪声等效功率(4.1.2)由噪声电流和光电二极管在 λ_p 的峰值响应采用式(6)计算:

$$NEP = \frac{I_{\text{noise}}}{s(\lambda_p)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

I_{noise} ——噪声电流,单位为 $\text{A} \cdot \text{Hz}^{-(1/2)}$;

$s(\lambda_p)$ ——在 λ_p 的响应,单位为 $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$;

NEP ——噪声等效功率,单位为 $\text{W} \cdot \text{Hz}^{-(1/2)}$ 。

8 供应商应提供的数据

对每种型号的光电二极管供应商应提供的数据包括:

- a) 光电二极管或雪崩光电二极管的半导体材料和结构(p-n 结或 p-i-n);
- b) 器件的整体尺寸,长度和宽度或直径,厚度;
- c) 半导体晶片的总面积和厚度;
- d) 在 U_{bn} 测得的光电二极管有效面积;
- e) 窗材料或其他基准的“无窗”,以及表面清洁的可能性;
- f) 峰值响应波长 λ_p ;
- g) 在 λ_p 和 500 nm(CsI(Tl)发射光谱的最大值)的响应;
- h) 工作温度范围 $T_{\text{max}} \sim T_{\text{min}}$ 和贮存温度范围,工作湿度范围 $H_{\text{max}} \sim H_{\text{min}}$ 和贮存湿度范围,工作气压范围 $P_{\text{max}} \sim P_{\text{min}}$ 和贮存气压范围;
- i) 正常偏压 U_{bn} 和最大允许偏压 U_{bmax} ;
- j) 对正常偏压 U_{bn} ,在指明的正常工作温度以及最大工作温度 T_{max} 下的最大漏电流 I_r ;
- k) 光电二极管可能损坏的最大允许光电流 I_{max} ;
- l) U_{bn} 时的电容(量);
- m) U_{bn} 时的上升时间;
- n) 在指明的正常工作温度和最高工作温度 T_{max} 下的噪声等效功率 NEP ;
- o) 对雪崩光电二极管的特殊附加要求(见 6.7);
- p) 雪崩光电二极管能工作的最高电压 U_{bmax} (或最大增益);
- q) 增益作为偏压函数的曲线图,或如果推荐正常电压 U_{bn} ,则是围绕 U_{bn} 的斜率 $\Delta G/\Delta U$;
- r) 增益至少在 U_{bn} 和 U_{bmax} 下与温度的相关性。

除非另有规定,应在指定的温度下完成所有测量。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
闪烁探测器用光电二极管 试验方法
GB/T 23729—2009/IEC 62088:2001

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

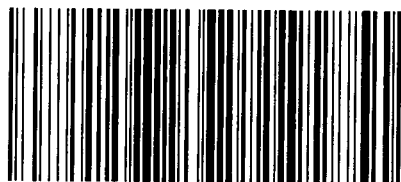
*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 22 千字
2009年7月第一版 2009年7月第一次印刷

*

书号: 155066·1-38079 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



GB/T 23729-2009

打印日期: 2009年8月13日

www.bzxzk.com