



T/CAIA

中国分析测试协会标准

T/CAIA/YQ007-2021

电子倍增电荷耦合成像器件 光电性能通用测试方法

General test method for photoelectric
performance of electron multiplying
charge coupled imaging device

2021年7月30日发布

2021年8月15日实施

中国分析测试协会发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本标准由中国分析测试协会标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位：中国电子科技集团公司第四十四研究所、钢研纳克检测技术股份有限公司、山东东仪光电仪器有限公司、清华大学、上海理工大学。

本标准共同实验和验证单位：中国电子科技集团公司第四十四研究所、钢研纳克检测技术股份有限公司、山东东仪光电仪器有限公司。

本标准主要起草人：李金、汪朝敏、袁良经、刘佳、姜华男、曲鹏程、孙利群、赵珍阳、张勇、王春芳

电子倍增电荷耦合成像器件光电性能通用测试方法

1 范围

本标准规定了光谱范围为 140nm~1100nm 的电子倍增电荷耦合成像器件（以下简称电子倍增 CCD 器件）的术语和参数测试方法。

本标准适用于光谱范围为 140nm~1100nm 的电子倍增电荷耦合成像器件的参数测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单（不包含勘误的内容）或修订版本都不适用于本标准，但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2421.1-2008 电工电子产品环境试验概述和指南

GJB 1649-1993 电子产品防静电放电控制大纲

GB/T 26179-10/CIE 63-1984 光源的光谱辐射测量

3 术语与定义

3.1 电子倍增电荷耦合成像器件 **electron multiplying charge coupled imaging device**

利用光照下产生载流子信号电荷，经移位寄存器实现信号电荷转移，通过在读出寄存器和输出放大器之间引入电荷倍增寄存器，光生电荷信号在到达输出放大器之前得到倍增，在器件输出端输出电信号从而实现光电信号倍增转换的成像器件。图 3-1 是典型电子倍增 CCD 器件结构框图。

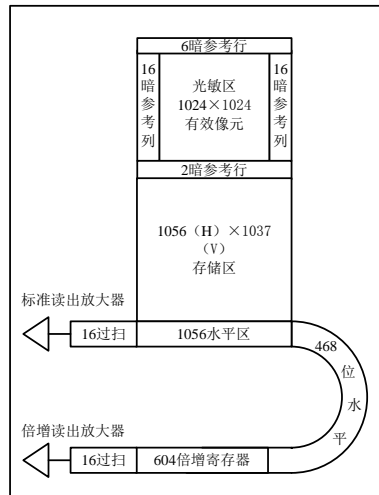
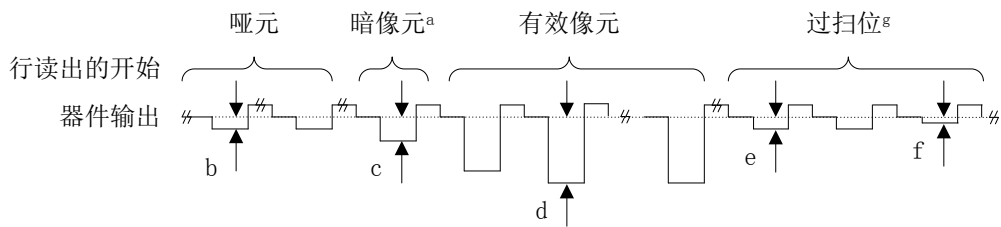


图 3-1 典型电子倍增 CCD 器件结构框图



- ^a 在某些器件中，有暗像元出现在有效像元后。
- ^b 电压输出包含时钟反馈（偏移电压）+寄存器暗信号。
- ^c 电压包含时钟反馈（偏移电压）+寄存器暗信号+像元暗信号。
- ^d 电压包含时钟反馈（偏移电压）+寄存器暗信号+像元暗信号+有效像元信号。
- ^e 电压包含时钟反馈（偏移电压）+寄存器暗信号+水平电荷转移损失信号。
- ^f 电压包含时钟反馈（偏移电压）+寄存器暗信号。
- ^g 过扫位是水平移位寄存器末位读出后继续转移读出的单元。

图 3-2 典型器件输出信号

3.2 输出信号 output signal

在有光照和规定电脉冲驱动下，器件输出的电压信号，通常用电压 V_o 表示。

图 3-3 是器件像元信号理想输出波形，本标准中输出信号是指器件参考电平与信号电平之间的差值。

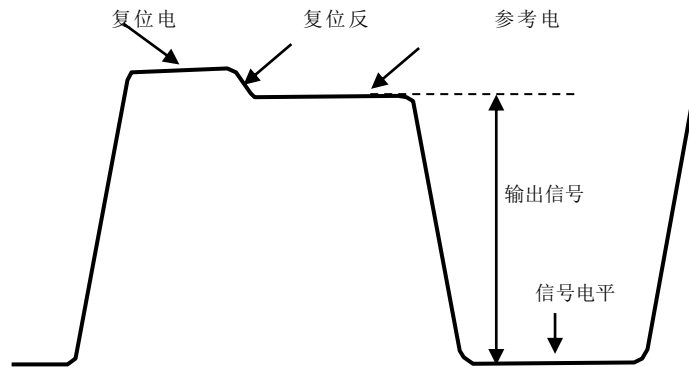


图 3-3 器件像元信号理想输出波形

3.3 电荷-电压转换因子 charge to voltage conversion factor

器件输出电压与存储在器件读出节点的电荷量之间的比值，通常用 S_v 表示。

3.4 电荷转移效率 charge transfer efficiency

电荷包从一个电极转移到下一个电极，转移后电极下电荷量与转移前电极下电荷量的比值，电荷经 1 个电极转移后的百分比通常用 $1 - \varepsilon$ 表示。电荷经 N 个电极转移后的百分比由下式给出：

$$\eta_{tN} = (1 - \varepsilon)^N \approx 1 - N \times \varepsilon \quad (1)$$

式中：

η_{tN} ——电荷经 N 个电极转移后的百分比；

ε ——1 个电极电荷包转移的损失率；

N——电荷在器件转移的电极数。

η_t 可分为水平转移 η_H 或垂直转移 η_V 。电荷转移效率也可用电荷转移损失率 ε (CTI—Charge Transfer Inefficiency) 表示， $\varepsilon = 1 - \eta_t$ ， ε_H 和 ε_V 分别表示水平和垂直转移损失率。

3.5 倍增寄存器满阱容量 charge handling capacity of multiplication register

倍增模式时，器件饱和输出信号下的存贮电子数。

3.6 增益 multiplication register gain

器件在倍增模式下的输出信号与常规模式下的输出信号的比值。

3.7 等效读出噪声 readout noise (high gain mode)

读出噪声与增益倍数的比值。

3.8 噪声因子 excess noise factor

器件倍增的随机性引入的额外噪声对整个器件噪声的影响因子, 一般用噪声因子 F 表示。

3.9 暗信号 dark signal

在无光照也无电注入的条件下, 器件像元产生的输出电压信号, 通常用 V_D 表示。

3.10 暗信号非均匀性 dark signal non-uniformity

也可称为固定图像噪声 fixed pattern noise

在无光照也无电注入的条件下, 单位积分时间内, 器件光敏区各像元产生的输出信号与输出信号平均值的偏差, 通常用 V_{FPN} 表示。

3.11 读出噪声 readout noise

在规定频带中, 读出信号电荷包时器件固有的噪声之和, 通常用电压 V_{rn} 或电子数 N_{rn} 表示。

3.12 饱和输出信号 saturation output signal

填满器件势阱的信号电荷包对应的输出信号, 通常用 V_S 表示。

3.13 光响应非线性 photoresponse linearity error

在均匀光照条件下, 当曝光量变化时, 器件输出信号和理想输出信号 (直线) 间的偏差, 通常用 L_{lin} 表示。

3.14 信噪比 ratio of signal to noise

在规定的光照条件下, 器件的输出信号与在该规定光照条件下读出噪声之比, 通常用 S/N 表示。

3.15 缺陷像元 defective pixel

在无光照条件下, 暗信号偏离规定范围的像元; 或在均匀光照条件下, 器件输出半饱和时, 输出信号偏离规定范围的像元。缺陷像元包括点缺陷、簇缺陷、行或列缺陷。与其它缺陷像元不相邻的缺陷像元称为点缺陷, $M \times N$ 个相邻缺陷像元称为簇缺陷, N 个连续缺陷像元排成行或列, 称为行或列缺陷。

3.16 响应率 responsivity

在规定光照条件下, 器件单位曝光量 (J/cm^2) 的输出信号电压, 通常用 $R(\lambda)$ 或 R 表示。

3.17 峰值响应波长 peak response wavelength

响应率最大值对应的波长，通常用 λ_p 表示。

3.18 光谱响应范围 spectral response range

响应率不小于峰值响应波长的响应率规定值时，所对应的入射光最短波长与最长波长之间的波长范围。

4 一般要求

4.1 总则

器件测试的具体要求应在相关详细规范中规定，若不指明出处时，本标准中使用“按规定”一词时，指按相关详细规范的规定。

4.2 测试条件

4.2.1 通则

除另有规定外，器件参数的测试应按本标准规定的条件进行。

4.2.2 基准标准条件

除另有规定外，应符合 GB/T 2421.1—2008 第 5 章及以下规定。

——温度：20℃；

——气压：101.3kPa。

4.2.3 仲裁测量和试验用标准大气条件

除另有规定外，应符合 GB/T 2421.1—2008 第 5 章及以下规定。

——温度：23℃ ±2℃；

——相对湿度：45%~55%；

——气压：86kPa~106kPa。

4.2.4 测量和试验用标准大气条件

除另有规定外，应符合 GB/T 2421.1—2008 第 5 章及以下规定。

——温度范围：-20℃~50℃；

——相对湿度：25%~75%；

——气压：86kPa~106kPa。

4.3 测试系统及仪器设备

4.3.1 通则

测试用仪器的准确度应符合测试规定要求，经计量部门检定合格，并在有效期内按有关操作规程进行测试。

4.3.2 测试系统

测试系统应满足测试项目的精度要求。

测试设备的结构应保证器件不浸水，不受静电、电磁干扰、杂散光等影响。

4.3.3 测试设备

暗箱、积分球光源、光功率计、氙灯、溴钨灯、单色仪。

4.4 规定条件

4.4.1 通则

除非另有规定，应根据要测试参数的特性，器件的像元（输入端）接收到的不同的光（电）信号，规定相应的光照条件（照度、曝光量、辐射光谱等）和（或）电脉冲信号条件。

4.4.2 外加直流电压及驱动脉冲的波动范围

外加直流电压及驱动脉冲的波动范围应符合下列规定：

- a) 直流电压波动范围— $\pm 2\%$ ；
- b) 脉冲电压波动范围— $\pm 5\%$ ；
- c) 或按规定。

4.4.3 器件光敏区的照度、曝光量、辐射光谱的波动范围

器件光敏区的照度、曝光量、辐射光谱的波动范围应符合下列规定：

- a) 光敏区辐射参数的规定误差应在 $\pm 3\%$ 范围内；
- b) 光照度的相对非均匀性应在 $\pm 2\%$ 范围内；
- c) 或按规定。

4.4.4 图像帧数

除非另有规定，在测试中采集的图像帧数宜为 50 帧~100 帧。

4.4.5 其它

除非另有规定，在测试器件响应率、暗信号、暗信号非均匀性、输出信号，响应非均匀性等参数时，在计算时不考虑缺陷像元信号，但在确定器件光敏面缺陷像元数时必须考虑。

4.5 静电防护要求

测试时，应当按照有关规定执行操作预防措施，测试区域应当符合 GJB1649 中静电放电防护区域的要求。

5 详细要求

各项性能测试的详细要求见本标准下列的各测试方法。

本标准规定的测试方法分类如下：

- 方法 01 倍增寄存器满阱容量测试；
- 方法 02 增益测试；
- 方法 03 等效读出噪声测试；
- 方法 04 噪声因子测试；
- 方法 05 暗信号测试；
- 方法 06 暗信号非均匀性测试；
- 方法 07 光响应非线性测试；
- 方法 08 信噪比测试；
- 方法 09 缺陷测试；
- 方法 10 光谱响应范围测试。

方法 01 倍增寄存器满阱容量测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的倍增寄存器的满阱电荷。

2 测试原理

器件饱和输出信号下的存贮电子数即为器件的满阱电荷 N_S ，测试原理框图见图 01-1。

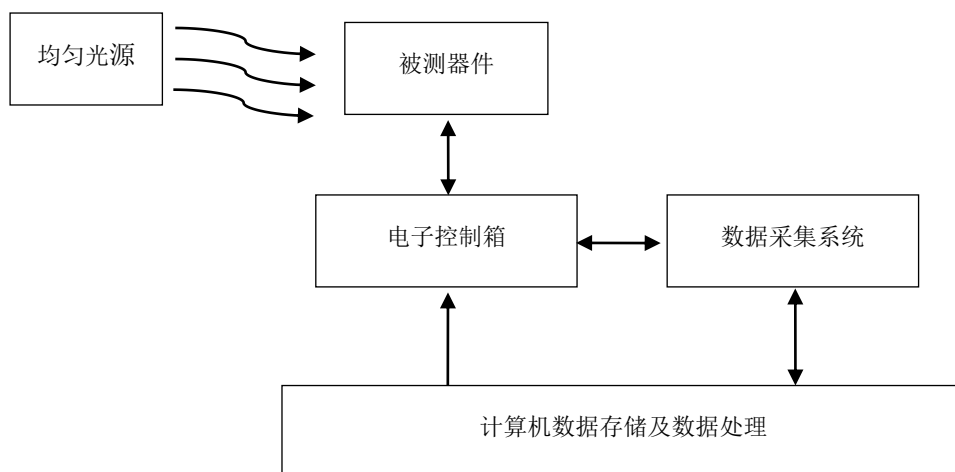


图 01-1 倍增寄存器满阱容量测试原理框图

3 测试步骤

按下列步骤测试电荷电压转换因子 S_v ，详细方法见下：

a) 测试器件的电荷电压转换因子 S_v ，详细方法见下：

1) 测试原理

器件像元中累积的电荷服从泊松分布，电子的涨落遵循统计规律。在均匀光照条件下，测试器件输出信号电压的起伏与信号平均值的关系，就可以确定信号电压与电荷包中电子数之间的比例系数，即为器件的电荷-电压转换因子。

图 01-3 为典型器件测试电路各部分传递图。

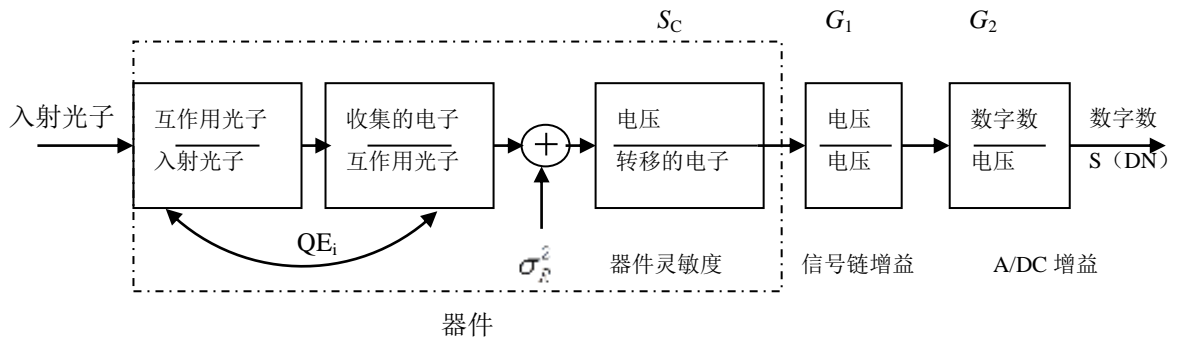


图 01-2 典型器件测试电路各部分传递图

器件的输出信号为：

$$S(DN) = PQ_{E_i}G_iS_cG_{CCD}G_1G_2 \quad (01-1)$$

式中：

P ——入射的平均光子数/像元；

QE_i ——内量子效率（相互作用光子/入射光子）；

G_i ——量子产额；

S_c ——感应节点的灵敏度，V/e-；

G_{CCD} ——输出放大器增益，V/V；

G_1 ——信号处理增益，V/V；

G_2 —— ADC 转换增益，DN/V。

DN ——器件测试电路的最终输出信号。是将每个像元信号编码为数字信号 S (DN)，典型采用 8、12 或 16bits ($2^8=256$, $2^{12}=4096$, $2^{16}=65536$)，采用的比特位数是对应于输入的满档电压幅度，例如输入满档 2VAC，用 12 位，则 G_2 应为 211DN/V。

定义器件测试电路增益常数 K (e-/DN) 和 J (内光子/DN)：

$$K = \frac{1}{S_cG_{CCD}G_1G_2} \quad (01-2)$$

$$J = \frac{1}{G_iS_cG_{CCD}G_1G_2} \quad (01-3)$$

$$S(DN) = PQ_{E_i}G_iS_cG_{CCD}G_1G_2 = \frac{P}{K} \quad (01-4)$$

根据方差分析方法：

$$K = \frac{S(\text{DN})}{\sigma_s^2(\text{DN}) - \sigma_r^2(\text{DN})} \quad (01-5)$$

式中：

$\sigma_r^2(\text{DN})$ ——输出放大器的读出噪声本底方差；

$\sigma_s^2(\text{DN})$ ——输出信号的方差。

计算器件的电荷-电压转换因子 S_v ：

$$S_v = S_c G_{\text{CCD}} = \frac{1}{KG_1 G_2} \quad (01-6)$$

在均匀曝光条件下，连续采集 2 帧图像，按公式 (01-7) 计算此时器件的噪声电压 σ_m 。

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{(S_1 - S_1')^2 + (S_2 - S_2')^2 + \dots + (S_N - S_N')^2}{2N}} \quad (01-7)$$

式中：

S_N ——第一帧中 N 像元的输出数字信号；

S_N' ——第二帧中 N 像元的输出数字信号；

N ——像元个数；

按公式 (01-8) 计算此时器件的输出信号 S (DN)：

$$S(\text{DN}) = \frac{(S_1 + S_1') + (S_2 + S_2') + \dots + (S_N + S_N')}{2N} \quad (01-8)$$

在不同的均匀光照条件下，分别测得 σ_m 和 S (DN)，以噪声电压平方 σ_m^2 为纵坐标，输出信号 S (DN) 为横坐标绘制关系曲线，该曲线的拟合直线的斜率为 $1/K$ ，按公式 (01-6) 可计算器件的电荷-电压转换因子 S_v 。

2) 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- ◇ 按图 01-1 连接测试系统，并进行仪器预置；
- ◇ 设定器件的光照度使输出信号值为饱和电压典型值的 5%（或按规定）；
- ◇ 在器件的光敏区中选择没有缺陷的直角区域；
- ◇ 等间隔增大曝光时间，对每一个曝光图像采集 2 帧图像；
- ◇ 对每一个曝光图像计算选择区域的像元输出信号平均值 S (DN)，选择

区域的像元噪声电压平方 σ_m^2 ;

- ◇ 把所得到的输入噪声平方与信号值绘入关系曲线图上;
- ◇ 按所得到的点用最小二乘法计算噪声平方与信号值的线性关系之系数, 把新得到的直线绘在曲线图上;
- ◇ 所得关系比例作为输出器件斜率 $1/K$ 的测试值;
- ◇ 根据测试的 G_1 和 G_2 , 按公式 (01-6) 计算 S_V 。

b) 调整光源, 逐渐增加倍增电压, 直到输出信号完全饱和, 测试此时的饱和输出信号 V_{SM} ;

- c) 按公式 (01-9) 计算倍增寄存器电荷容量 N_{SM} 。

$$N_{SM} = V_{SM}/S_V \quad (01-9)$$

式中:

S_V —电荷电压转换因子, $\mu V/e^-$;

V_{SM} —倍增寄存器饱和输出信号, mV;

N_{SM} —倍增寄存器电荷容量, ke^- 。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件:

- a) 环境温度;
- b) 工作频率;
- c) 倍增模式, 增益为 100。

方法 02 增益测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的最大增益倍数。

2 测试原理

在均匀光照条件下，采集器件在无倍增和有倍增时的输出信号平均值，并扣除无光照条件下相应的本底信号，然后计算出器件的增益倍数，见公式 (02-1)：

$$G = \frac{S_x - B_x}{S_o - B_o} \quad (02-1)$$

式中：

G —器件的增益倍数；

S_x —在均匀光照条件下， x 增益系数下的输出信号；

B_x —在无光照条件下， x 增益系数条件下的本底信号；

S_o —在均匀光照条件下，无倍增时的输出信号；

B_o —在无光照条件下，无倍增时的本底信号。

原理框图如下图所示：

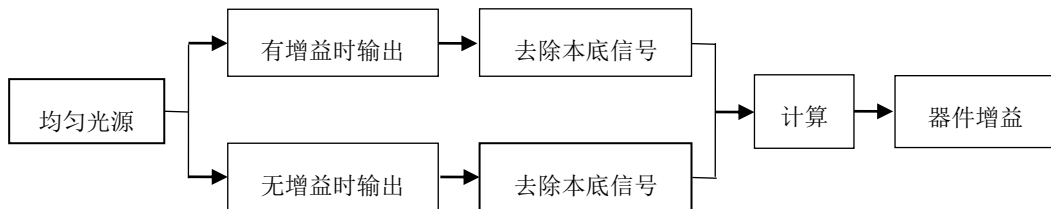


图 02-1 倍增增益测试原理图

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- 调节光源，确保器件在最大倍增增益时输出信号不超过饱和信号的 90%；
- 调节器件的倍增电压，使器件处于非倍增工作模式，测量器件在均匀光照条件下的输出信号均值 S_o 和无光照条件下的本底信号 B_o ；
- 逐渐增加器件的倍增电压，分别测量器件在不同倍增电压条件下的输出信号均值 S_x 和本底信号 B_x ；
- 按公式 (02-1)，即可获得在该温度条件下的器件增益 G 与倍增电压的关系曲线，取最大值。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

- a) 环境温度；
- b) 工作频率；
- c) 倍增模式。

方法 03 等效读出噪声测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的等效噪声。

2 测试原理

测试器件的读出噪声与倍增倍数，依据公式 (03-1) 计算等效噪声 $V_{e,RN}$ 。

$$V_{e,RN} = V_{RN}/G \quad (03-1)$$

式中：

V_{RN} —读出噪声，mV；

G —增益倍数。

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

a) 测试出器件的读出噪声 V_{RN} ；详细方法见下：

1) 测试原理

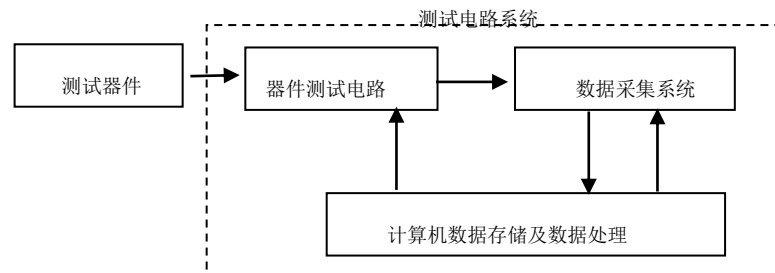


图 03-1 读出噪声测试原理框图

器件的输出噪声由器件移位寄存器的转移噪声、输出放大器级噪声、输出级复位噪声和器件信号（由光照或热暗电流引起的）上的散粒噪声构成。信号中过扫位或哑元的均方根起伏，与无信号电荷时输出电路的噪声特性相关联，测试原理框图见图 03-1。因此，测试出总噪声值 V_{Ntot} 与测试电路系统噪声值 V_{Nsys} ，按公式 (03-2) 可计算出器件的读出噪声 V_{RN} 。

$$V_{RN} = (V_{Ntot}^2 - V_{Nsys}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (03-2)$$

2) 测试被测器件与测试电路系统的总噪声 V_{Ntot}

按下列步骤进行测试：

a) 在规定条件下，采集 F 帧图像，按公式 (03-3) 计算此时器件每一像元的噪声电压 V_{ni} ；

$$V_{ni} = \frac{1}{G} \left(\frac{1}{F-1} \sum_{f=1}^F (V_{oif} - V_{oi})^2 \right)^{1/2} \dots\dots\dots (03-3)$$

式中：

V_{ni} ——器件每一像元的噪声电压；

G ——测试电路系统的增益；

F ——采集的图像帧数；

V_{oif} ——器件 i 像元第 F 帧的输出电压；

V_{oi} —— i 像元 F 帧的输出电压平均值。

b) 按公式 (03-4) 计算器件过扫位或哑元的均方根噪声值的平均值 V_{Ntot} 。

$$V_{Ntot} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{ni} \dots\dots\dots (03-4)$$

式中：

V_{Ntot} ——器件过扫位或哑元的均方根噪声值；

M ——过扫位或哑元数目；

V_{ni} ——器件 i 过扫位或哑元的噪声电压。

3) 测试电路系统的噪声 V_{Nsys}

在被测的器件 V_{RD} 和 V_{os} 端之间接入一个电阻，见图 03-2，该电阻等于器件输出阻抗；按 2 同样方法测出此时的噪声 V_{Nsys} 。

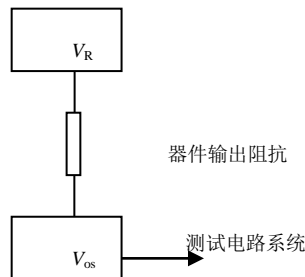


图 03-2 等效电阻连接图

4) 计算器件的读出噪声 V_{rn} 。

按公式 (03-2) 计算器件的读出噪声 V_{RN} 。

b) 测试出器件的增益倍数 G ；

c) 按公式 (03-1) 计算器件的等效噪声 $V_{e,RN}$ 。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

a) 环境温度；

b) 工作频率；

c) 倍增模式。

方法 04 噪声因子测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的噪声因子。

2 测试原理

测试原理框图见图 04-1。按公式 (04-1) 计算噪声因子：

$$F^2 = \frac{\sigma_{emout}^2}{G^2 \sigma_{emmt}^2} \quad (04-1)$$

式中：

σ_{emout}^2 —倍增寄存器输出信号方差；

σ_{emmt}^2 —倍增寄存器输入信号方差；

G —增益控制。

引入增益常数 K 后，噪声因子公式可推导为式 (04-2)。

$K=d/S_V$ (d : $\mu V/DN$)；器件测试电路的最终输出信号是将每个像元信号编码为数字信号 S (DN)，典型采用 8、12 或 16bits ($2^8=256$, $2^{12}=4096$, $2^{16}=65536$)，采用的比特位数是对应于输入的满档电压幅度，例如输入满档 2VAC，用 12 位，则 d 应为 $2000000/2^{12}$ ($\mu V/DN$)； S_V 为器件电荷电压转换因子。

$$F^2 = \frac{K[\sigma_{out}^2(DN) - \sigma_r^2(DN)]}{GS_{out}(DN)} \quad (04-2)$$

式中：

F —噪声因子；

K —增益常数， e^-/DN ；

$\sigma_{out}^2(DN)$ —倍增图像的方差；

$\sigma_r^2(DN)$ —倍增本底的方差；

$S_{out}(DN)$ —倍增图像的均值。

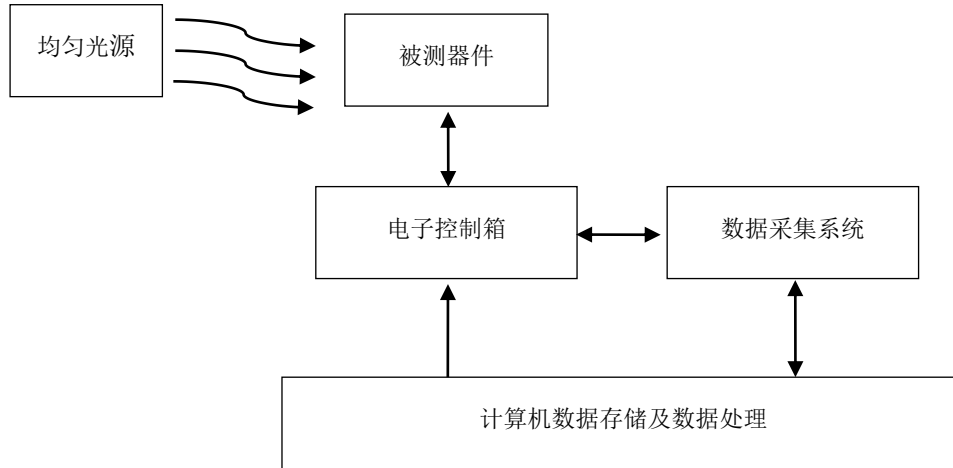


图 04-1 噪声因子测试原理框图

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- a) 按图 04-1 搭建测试系统；
- b) 调节光源，确保器件在最大倍增增益时输出信号不超过饱和信号的 90%；
- c) 测试电荷电压转换因子 S_V ，并计算增益常数 K ；
- d) 调节器件倍增电压，按方法 02 测试器件的增益控制 G ；
- e) 采集该增益控制下的本底信号，并计算其方差 $\sigma_r^2(DN)$ ；
- f) 采集该增益控制下的未饱和信号，并计算其方差 $\sigma_{out}^2(DN)$ 和均值 $S_{out}(DN)$ ；
- g) 将步骤(c)~ (f)的结果带入式 (04-2)，即可得到在该增益控制条件下的待测器件噪声因子；
- h) 改变倍增电压，重复步骤(d)~ (g)，将不同增益倍数(1 倍-最大增益倍数)与其对应的噪声因子绘制成曲线，其最大值即噪声因子。

4 测试条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

- a) 环境温度；
- b) 工作频率；
- c) 倍增模式。

方法 05 暗信号测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的暗信号。

2 测试原理

方法 1：在确定的积分时间内，电子倍增 CCD 的输出信号与水平位移寄存器哑元的输出信号差值。

方法 2：在无光照也无电注入条件下，器件的输出信号会随积分时间线性增加。测试原理框图见图 05-1。

在规定条件下，通过改变器件的积分时间，测试对应积分时间下的输出信号，然后以积分时间为横坐标，输出信号为纵坐标，由测试数据给出散点图，并按最小二乘法，拟合出一条直线，该直线的斜率即为器件的单位时间暗信号。

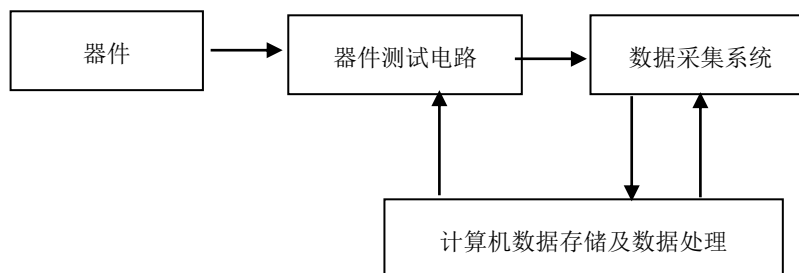


图 05-1 暗信号测试原理框图

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- 按图 05-1 连接测试系统，并进行仪器预置；
- 调节测试系统，给器件加上规定的电源电压，使器件处于正常工作状态；
- 通过图像采集软件采集图像数据，开始测试参数；

d) 方法 1：在确定的积分时间条件下，采集 F 帧数据，计算所选像元区域内的输出信号平均值与水平位移寄存器哑元的输出信号平均值的差值，该差值与积分时间的比值即为暗信号 K_D (mV/s)。

方法 2：在无光照时，增大积分时间，对每次积分值采集 F 帧，计算所选积分像元区域内的输出信号平均值，并把所得到的输出信号电压值与积分时间绘制关系曲线；按照最小二乘法计算输出信号与积分时间的直线方程系数，把新得到的直线绘入曲线上，得到直线的斜率 K_D (mV/s)；

e) 按公式 (05-1) 计算器件的暗信号 V_D ;

$$V_D = K_D \times t \quad (05-1)$$

式中:

V_D ——器件的暗信号, mV;

t ——器件的积分时间, ms。

g) 暗信号也可用暗电流密度表征。按公式(05-2)计算器件的暗电流密度 J_D 。

$$J_D = \frac{V_D \times q}{t \times A_d \times S_v} \quad (05-2)$$

式中:

J_D ——器件的暗电流密度, nA/cm²;

V_D ——器件的暗信号, mV;

q —— 1.6×10^{-19} 库仑(电子电荷);

t ——器件的积分时间, ms;

A_d ——器件的像元面积, cm²;

S_v ——器件的电荷-电压转换因子。

h) 暗信号还可以用暗电荷表征。按公式 (05-3) 计算器件的暗电荷 Q_D 。

$$Q_D = \frac{V_D \times q}{t \times S_v} \quad (05-3)$$

式中:

Q_D ——器件的暗电荷, e-/pixel/s;

V_D ——器件的暗信号, mV;

q —— 1.6×10^{-19} 库仑(电子电荷);

t ——器件的积分时间, ms;

S_v ——器件的电荷-电压转换因子。

5 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件:

- a) 环境温度;
- b) 工作频率;
- c) 积分时间。
- d) 倍增模式。

方法 06 暗信号非均匀性测试

1 测试目的

在无光照也无电注入条件下，测试器件的暗信号非均匀性。

2 测试原理

在无光照条件下，积分时间为 1s（除非详细规范里另外规定）时，测试各有效像元输出信号标准偏差，测试原理框图见图 06-1。

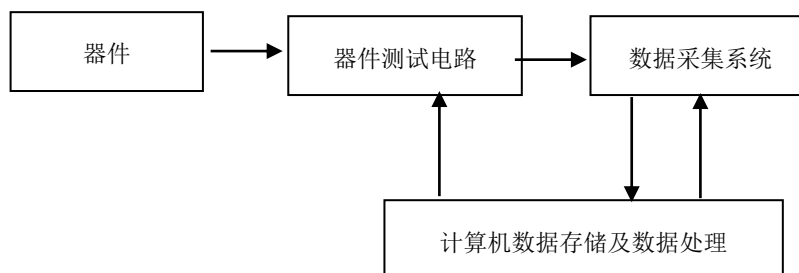


图 06-1 暗信号非均匀性测试原理框图

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- 按图 06-1 连接测试系统，并进行仪器预置；
- 调节测试系统，给器件加上规定的电源电压，使器件处于正常工作状态；
- 在规定条件下，设置积分时间为 1s（除非详细规范里另外规定），采集 F 帧信号，计算光敏像元区域内各有效像元输出信号标准偏差；按公式(06-1)计算器件的输出信号标准偏差 V_{DEV} ，即暗信号非均匀性 V_{FPN} 。

$$V_{FPN} = V_{DEV} = \left(\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (V_{oi} - V_o)^2 \right)^{1/2} \quad (06-1)$$

式中：

V_{FPN} ——器件的暗信号非均匀性，mV；

V_{DEV} ——输出信号标准偏差；

M——光敏面像元数；

V_{oi} ——i 像元的平均输出信号电压；

V_o ——器件的平均输出信号；

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

- a) 环境温度;
- b) 工作频率;
- c) 积分时间。
- d) 倍增模式。

方法 07 光响应非线性测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的光响应非线性。

2 测试原理

器件光响应输出信号是曝光量和曝光时间的线性函数（曝光量=辐射强度×曝光时间， $E \times t$ ）。因此，在一定的辐照强度下，增加积分时间 T 可以改变入射曝光量。器件光响应非线性测试原理框图见图 07-1。

测出对应曝光量下的输出信号，然后以曝光量为横坐标，输出信号为纵坐标，由测试数据给出散点图，并按最小二乘法，分别对线性区及饱和区拟合出两条直线，两条直线的交点的纵坐标即为器件的饱和输出信号，在规定线性统计范围内的测试点中，找出输出信号值与拟合直线上对应信号值差值最大的点，该最大差值比上饱和信号，转换成百分比即为光响应非线性 L_{lin} 。

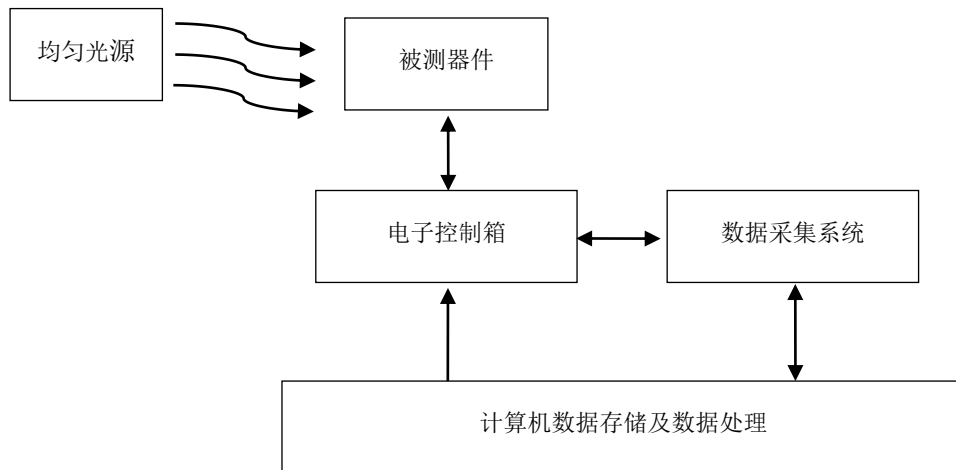


图 07-1 光响应非线性、饱和输出信号测试原理框图

按公式 (07-1) 计算 i 点的光响应非线性值 $L_{lin}(i)$;

$$L_{lin}(i) = \left[\frac{V_{oi}/E_{is}}{k} - \frac{E_i}{E_{is}} \right] \times 100(\%) \quad (07-1)$$

式中:

$L_{lin}(i)$ —— i 点的光响应非线性值;

V_{oi} —— i 点的信号值;

E_i —— i 点的曝光值;

k ——线性区直线斜率;

E_{fs} —— 饱和曝光值。

再按公式 (07-2) 计算器件的光响应非线性值 L_{lin} 。

$$L_{lin} = MAX[L_{lin}(i)] \quad (07-2)$$

式中：

L_{lin} —— 器件的光响应非线性值；

$L_{lin}(i)$ —— i 点的光响应非线性值。

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

a) 按图 07-1 连接测试系统，并进行仪器预置；

b) 给器件加上规定的电源电压，使其处于正常工作状态；

c) 改变器件的曝光量，并绘出输出信号与曝光量的关系曲线，按下列顺序进行测试；

1) 增加器件的曝光量并观察器件成像图形，当器件成像图形严重变形和电荷转移效率明显变差时，此时器件达到临界饱和，设定此时的曝光量为测试最大曝光量；

2) 在最大曝光量范围内逐步增加曝光量，在每个曝光量条件内采集 F 帧，统计输出信号平均值，并把在每个曝光量点所得到的输出信号值与曝光量绘入关系曲线上，直到达到设定的最大曝光量，输出信号值基本稳定，不再随曝光量的增大而增加为止；

3) 按要求分别选择线性区和饱和区的统计点，按照最小二乘法计算两个区域输出信号与曝光量的直线方程系数，绘出理想响应直线，两条直线的交点的纵坐标即为器件的饱和输出信号 V_s ；

4) 在规定线性统计范围内的测试点中，找出输出信号值与拟合直线上对应信号值差值最大的点，最大差值比上饱和信号，所取得的百分比即为光响应非线性 L_{lin} 。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

a) 环境温度；

b) 工作频率；

c) 线性统计范围。

d) 倍增模式。

方法 08 信噪比测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的信噪比。

2 测试原理

根据信噪比的定义，器件在规定的日照条件下，器件的输出信号与读出噪声之比，通常以比例或分贝（dB）表示。

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- a) 在规定的均匀日照条件下，测试器件的输出信号 V_o ；
- b) 在规定的条件下，测试出器件在规定的均匀日照条件下的读出噪声 V_{RN} ；
- c) 按比值表示时，按公式（08-1）计算器件的信噪比 S/N ；

$$S/N = \frac{V_o}{V_{RN}} \quad (08-1)$$

按分贝表示时，按公式（08-2）计算器件的信噪比 S/N ；

$$S/N = 20 \lg\left(\frac{V_o}{V_{RN}}\right) \quad (08-2)$$

式中：

S/N ——器件的信噪比；

V_o ——在规定的均匀日照条件下，器件的输出信号；

V_{RN} ——在规定的均匀日照条件下，器件的读出噪声。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

- a) 环境温度；
- b) 工作频率；
- c) 倍增模式。

方法 09 缺陷测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的缺陷。

2 测试原理

在均匀光照条件下，器件的缺陷是像元输出信号偏离平均像元输出信号的像元，测试原理框图见图 09-1。

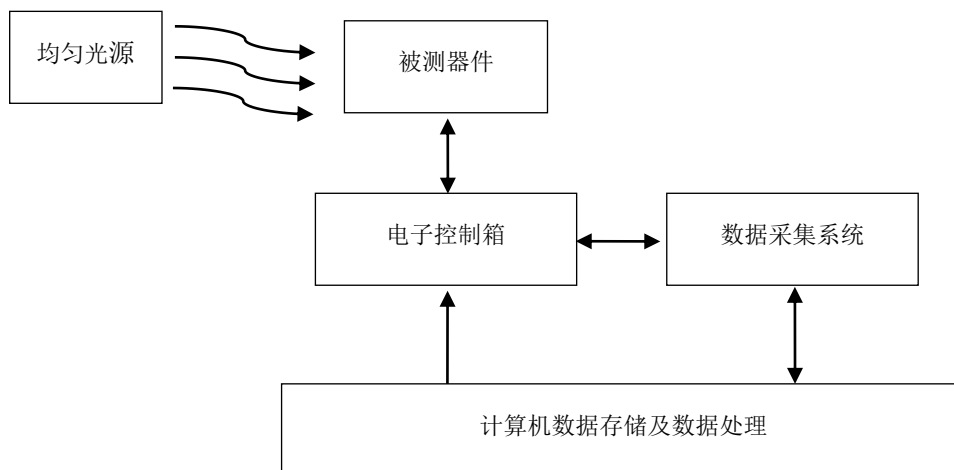


图 09-1 缺陷测试原理框图

在无光照条件下，像元输出信号偏离规定范围值，为亮像元缺陷；在均匀光照条件下，器件半饱和输出时，像元输出信号偏离规定范围值，为亮或暗像元缺陷，不响应的像元为盲像元缺陷。因此，在测试时，先在无光照条件下，找出亮像元；然后在均匀光照条件下，器件半饱和输出时，对像元输出信号进行统计计算时应剔除亮缺陷像元数。

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- a) 按图 09-1 连接好测试系统，并进行仪器预置；
- b) 调节测试系统，给测试电路加上规定的工作电压，使器件处于正常工作状态；
- c) 在无光照条件下，采集 F 帧图像，按公式 (09-1) 计算器件的平均输出信号 V_{od} ：

$$V_{od} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{odi} \quad (09-1)$$

式中：

V_{od} —— 在无光照条件下，器件的平均输出信号；

M —— 光敏面像元数目；

V_{odi} —— 在无光照条件下，器件 i 像元的平均输出信号。

d) 将符合公式 (09-2) 的像元标记为缺陷像元，总数计为 N_d ；

$$V_{odi} \leq xV_{od} \text{ 或 } V_{odi} \geq yV_{od} \quad (09-2)$$

x 、 y 的值在详细规范中规定。

e) 调节均匀光强，使器件处于半饱和输出，采集 F 帧图像；按公式 (09-3) 计算器件的平均输出信号 V_o ；

$$V_o = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{oi} \quad (09-3)$$

式中：

V_o —— 器件的平均输出信号；

V_{oi} —— 器件 i 像元的平均输出信号；

M —— 剔除满足公式 (09-2) 的缺陷像元后的光敏面像元数。

f) 将符合公式 (09-4) 的像元标记为缺陷,总数计为 N_e ；

$$V_{oi} \leq jV_o; \text{ 或 } V_{oi} \geq kV_o \quad (09-4)$$

j 、 k 的值在详细规范中规定。

g) 缺陷像元总数为 $N_d + N_e$ ；

h) 相邻 N 个缺陷像元连成簇判为簇缺陷；连续 M 个缺陷像元排成行或列，判为行或列缺陷。 M 、 N 的值在详细规范中规定。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

a) 环境温度；

b) 工作频率；

c) x 、 y 、 j 、 k 、 M 、 N 值。

d) 倍增模式。

方法 10 光谱响应范围测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件光谱响应范围。

2 测试原理

2.1 概述

在给定波长范围内测试器件波长对应的响应率，绘制波长与响应曲线，得到光谱响应曲线和光谱范围，测试方法如下（在详细规范中确定选择方法）。

采用测试波长和相对光波长的响应率方法，测试原理框图见图 10-1（单色光响应率测试原理框图）和图 10-2（相对光谱响应测试原理框图）。

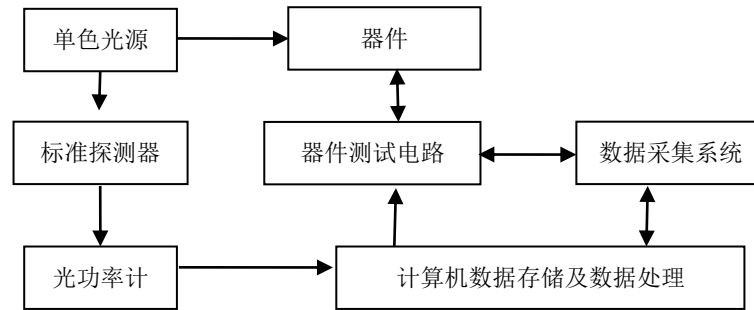


图 10-1 单色光量子效率测试原理框图

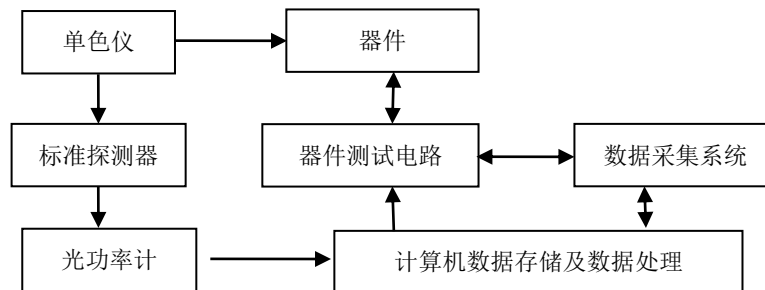


图 10-2 相对光谱响应测试原理框图

2.2 方法 1

用标准探测器测试在一定光强下的单色均匀光源的能量，再测试在该光强下器件的输出信号。根据标准探测器定标值的定义，按公式（10-1）计算 $R(\lambda)$ 。

$$R(\lambda) = \frac{V_o}{W_{\lambda}T} \quad (10-1)$$

式中：

$R(\lambda)$ ——器件波长 λ 处的响应率；

V_o ——输出信号；

W_λ ——单色均匀光源的能量；

T——积分时间。

2.3 方法 2

测试相对光谱响应：

a) 在波长为 λ 的单色光照射下，分别测得光功率计的输出信号 $V_{re}(\lambda)$ 和被测器件的输出信号 $V_o(\lambda)$ ；则可按公式（10-2）计算出光谱响应 $R(\lambda)$ ；

$$R(\lambda) = \frac{V_o(\lambda)}{V_{re}(\lambda)} \quad (10-2)$$

b) 器件在不同波长 λ ，可测得该波长下器件的光谱响应 $R(\lambda)$ ，器件峰值波长处的相对响应值 R_m ，作为归一化基数；按公式（10-3）进行归一化；

$$R_R(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R_m} = \frac{1}{R_m} \left[\frac{V_o(\lambda)}{V_{re}(\lambda)} \right] \quad (10-3)$$

式中：

$R_R(\lambda)$ ——器件的相对光谱响应；

R_m ——器件峰值波长处的相对响应值，即归一化基数。

c) 以波长 λ 为横坐标，相对光谱响应 $R_R(\lambda)$ 为纵坐标，即可绘制出相对光谱响应曲线；

2.4 光谱响应范围

响应率大于规定值时，所对应的入射光最短波长与最长波长之间的波长范围。在光谱响应曲线上，找出响应率最大的点所对应的波长即为峰值响应波长。

3 测试步骤

按下列步骤进行测试：

- a) 按图 10-1 连接测试系统，并进行仪器预置；
- b) 调节测试系统，给器件加上规定的电源电压，使器件处于正常工作状态；
- c) 在波长 λ 处，测试标准探测器的输出电流 I_λ ；
- d) 在波长 λ 处，测试器件的输出信号 V；
- e) 按公式（10-1）计算出在给定波长处的器件响应率；
- f) 根据一定波长范围内的相对光谱响应曲线（ λ 应落在光谱响应曲线谱段范围内），求得该波长范围内各点的响应率值，绘出光谱响应率曲线。

方法 2 按下列步骤进行测试：

- a) 按图 10-2 连接测试系统, 并进行仪器预置;
- b) 给测试电路加上规定的工作电压, 使器件处于正常工作状态;
- c) 调节光源强度, 使器件在所测的波长范围内都不处于饱和;
- d) 当单色仪的波长鼓在微机控制下, 进行规定波段扫描时, 分别测得各波长点下光强能量 $V_{re}(\lambda)$ 被测器件的输出信号 $V_o(\lambda)$;
- e) 按公式 (10-3) 计算出器件的相对光谱响应;
- f) 以波长 λ 为横坐标, 相对光谱响应 $R_R(\lambda)$ 为纵坐标, 绘制相对光谱响应曲线。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件:

- a) 环境温度;
- b) 工作频率;
- c) 测试波长的间隔;
- d) 响应率或相对光谱响应最小规定值。
- e) 倍增模式。

6 应用要求

各项性能测试的详细要求见本标准下列的各测试方法。

本标准规定的测试方法分类如下:

——方法 01 元素含量分析范围;

——方法 02 短期精度;

——方法 03 无故障运行时间;

本标准规定的测试仪器为: SparkCCD 全谱火花直读光谱仪

方法 01 元素含量分析范围测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的含量分析范围，达到如下表所示指标。

元素	波长/nm	含量范围
N	149.2	0.0009%~0.185%
C	193.1	0.0001%~ 5.0%
Si	251.6	0.0001%~6.0%
Mn	293.3	0.0001%~22.0%
P	178.3	0.00005%~0.8%
S	180.7	0.00005%~0.4%
Cr	267.7	0.0001%~35%
Ni	231.6	0.0001%~30%
Mo	203.9	0.0001%~4.0%
Cu	224.2	0.0001%~4.0%
Al	308.2	0.0001%~2.0%
Li	670.9	0.00001%~0.039%
Na	589.0	0.000014%~0.0011%
K	766.4	0.0001%~1.5%

2 测试原理

采用标准样品绘制各元素含量范围的工作曲线。

3 测试步骤

a) 用中低合金钢 SS406~SS410 绘制工作曲线，分别用含量-强度比绘线，统计各主要元素的线性系数 R^2 。

b) 用铸铁 CI12 (GBW01131a~GBW01137a) 绘制工作曲线，分别用含量-强度绘线，统计各主要元素的线性系数 R^2 。

c) 用不锈钢 SS9 (GSB03-2028-1~GSB03-2028-6) 绘制工作曲线，分别用含量-强度绘线，统计各主要元素的线性系数 R^2 。

d) 用铝基 E3012~3015、E3121、E3126、E3127 绘制工作曲线，分别用含量-强度绘线，统计各主要元素的相关系数 R^2 。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

环境温度：（10~30）℃；

相对湿度：（20~80）%。

方法 02 短期精度测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的短期精度，应达到如下表所示指标。

元素	RSD
P、S	小于 5.0%
其它常量元素	小于 3.0%

2 测试原理

连续激发 10 次测量钢铁光谱分析标准样品中“元素含量分析范围”中各元素的含量，计算 10 次测量值的相对标准偏差 RSD。

3 测试步骤

a) 用中低合金钢 RN14/46 连续激发 10 次，计算 10 次测量值的相对标准偏差 RSD。

b) 用铸铁 RG13-104 连续激发 10 次，计算 10 次测量值的相对标准偏差 RSD。

c) 用不锈钢 F/5 连续激发 10 次，计算 10 次测量值的相对标准偏差 RSD。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

a) 环境温度：（10~30）℃；

b) 相对湿度：（20~80）%。

方法 03 无故障运行时间测试

1 测试目的

在规定条件下，测试器件的平均无故障时间。

2 测试原理

每天 8 小时开机正常测试样品，统计无故障运行时间。

3 测试步骤

每天开机 8 小时，连续激发测试样品，长时间连续监测，最后统计出无故障运行时间。

4 规定条件

在相应详细规范中至少应规定下列测试条件：

环境温度：（10~30）℃；

相对湿度：（20~80）%。