

半导体光电探测器件光谱响应和响应度的测试

赵庆添 杨连生 耿秀珍

本文对各种半导体光电探测器件的光谱响应，响应度的测试系统，原理，方法等做了较详细的介绍。其中对于直径为 $\phi 100\mu$ 光敏面积的探测器，在灵敏度测试中采用自制显微镜二次聚焦方法进行观察测量，得到了满意的结果。此外，对测试结果进行了分析，并讨论了测试误差，为完善测试方法及改进器件性能提供了有益的参考。

一、前言

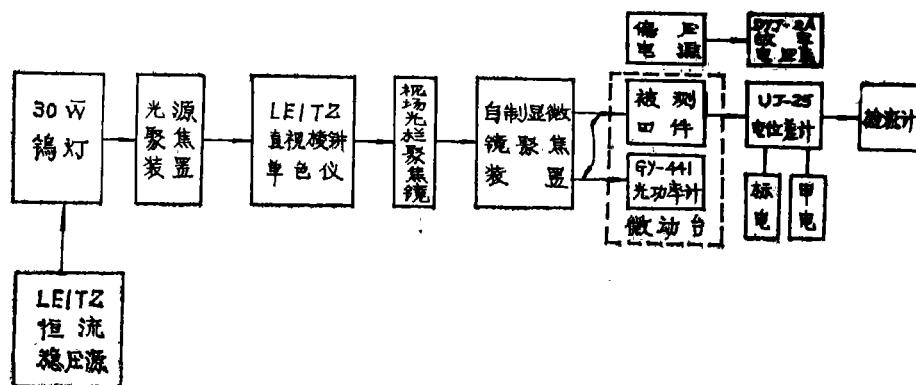
为了适应激光通讯，信息处理，遥感技术的迅速发展，目前已出现多种半导体光电探测器件。虽然各种光电探测器的性能并不完全相同，但都具有三个基本参数：响应度，响应时间和噪声。考虑实际工作的需要，以及现有的测试条件，我们仅对本所器件室研制的半导体光电探测器，如Si-PIN光电二极管，Si-四象限探测器，Si-光电压探测器，光电二极管列阵，Si-保护环雪崩二极管(GAPD)，Si-拉通型雪崩二极管

(RAPD)等探测器件的光谱响应和响应度进行测试。后二者是具有内增益的光电探测器(GAPD，RAPD)，其响应度是用没有倍增时的灵敏度计算量子效率来评价的。现将测试结果分述如下。

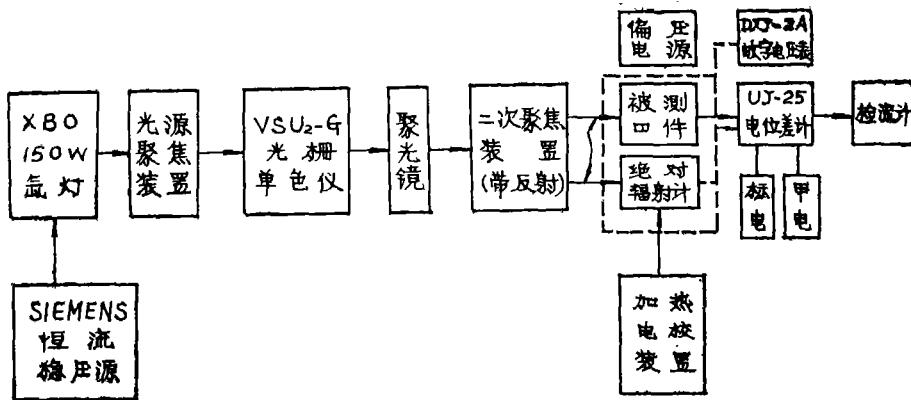
二、光谱响应的测试

半导体光电探测器的光谱响应，基本上是由半导体Si材料光电性质决定的。Si探测器对于近紫外——可见——近红外波长范围内的光都有响应。但其光谱响应对于不同器件差异很大。即使是同一种器件，同批和不同批相同工艺生产的器件其变化也很大。峰值光谱响应(即最大值)主要取决于器件结构参数和工艺条件。通常情况下，将相当于峰值的10%的响应度分别取之为初始波长与截止波长。

在固定波长下，输入单位光功率所产生的输出信号的大小定义为器件的响应度，常用的单位为 $\mu A/\mu W$ 。其响应度随波长变化的



图一 系统 (1) 方框图



图二 系统(2) 方框图

曲线称为器件光谱响应曲线。

1. 光谱响应测试原理及方框图

根据被测器件光敏面积大小分别选用测试系统。当光敏面积直径大于 $\phi 4\text{mm}$ 时选用系统(1)；当光敏面积直径小于 $\phi 4\text{mm}$ 时选用系统(2)。系统(1)和系统(2)的方框图分别如图一、图二所示。

2. 测试系统介绍及基本要求

光源：150W高压钨灯(西德 Leitz)30W钨灯(西德 Leitz)

电源：150W钨灯专用恒流稳压源。稳定度 $\geq 0.5\%$ 。

30W钨灯恒流稳压源。稳定度 $\geq 0.1\%$ 。

单色仪：VSU₂-G光栅单色仪(东德 Zeiss) 波长范围：0.16~1.6μ。

分辨率：当狭缝为0.01mm时， $<2\text{\AA}$ ，当狭缝为2mm时 $<30\text{\AA}$ 。

波长准确度由自带高压汞灯校准。直视棱镜单色仪(西德 Leitz)

波长范围：0.37~1.1μ。

波长分辨率：当波长小于6000 \AA 时， $\leq 6\text{\AA}$ ，当波长大于10000 \AA ，狭缝为1mm时 $\leq 60\text{\AA}$ 。

波长的准确度分别用Na、Hg、K等光谱灯进行波长校准。

显微聚焦装置

自行设计加工的二次聚焦装置。用来观察辐射光通量是否全部照射到被测器件的光

敏区内。明视距离可根据光斑大小要求自行调节。最小可聚成直径为 $\phi 50\mu$ 的光斑。其直径大小用测微标尺测量，测量误差 $<\pm 2\%$ 。

微动台

用测量显微镜改装成四维微动测试架，以保证被测器件与辐射通量的测试探头在同一平面内，且垂直入射。此外还用特制的反射镜检查探头光敏区内是否全部接收辐射通量。

绝对辐射接受器

当被测辐射通量大于100 μW 时，采用以下三个标准。

a 绝对辐射功率计(腔体式)〈中国计量院大邑分院〉，准确度 $\pm 1\%$ ，精确度0.37%。

b Lw-1激光功率计(平板式)〈西安无线电十一厂〉，准确度 $\pm 3\%$

c OPM-102型功率计(日本ANDO'')，准确度 $\pm 2\sim 5\%$ ，精确度0.1~1%。

GY-441型光功率计：〈四机部1444所〉当被测辐射通量小于100 μW 时，用

GY-441型功率计测量，准确度 $\pm 3\%$ ，精确度 $<1\%$ 。如果用OPM-102型功率计测量，测量值必须经过定标换算。

UJ-25型电位差计：0.01级。

检流计：AC15/2型，0.01级。

电阻：Z $\times 54$ 标准电阻箱，0.01级。

3. 测试方法的选择及其操作

探测器光谱响应主要包括二个参数的测定，即辐射通量和器件光生电流的测定。

a、辐射通量的测定：

在工作波长范围内($0.3-1.2\mu$)，准确测量辐射通量(光功率 W)或光通量(流明 $1m$)是光谱响应测试首要条件。其辐射通量是属于辐射度学中的计量工作，光通量是属于光度学中的计量工作，但二者在可见光区彼此有一一对应的关系，二者相差一个可见度 K_1 。

目前探测器的响应度有时分别采用单位辐射通量或光通量下，信号电流或电压大小来衡量。根据上述对应关系，只要能正确测定辐射通量，即可解决光谱响应测试问题。然而正确计量辐射通量的困难也是较多的。要使测试结果准确度好，精密度高，除考虑测试标准外，更主要的是应选择足够强的辐射源并具有较好稳定性。

测试系统的光谱能量分布曲线，一般采用稳定辐射光源经单色仪分光后，各种单色光的辐射功率分别用无波长选择的探测器进行计量的。也可以用已知各波长下的响应度的探测器进行测量。按其准确度大体分为一级标准和二级标准。

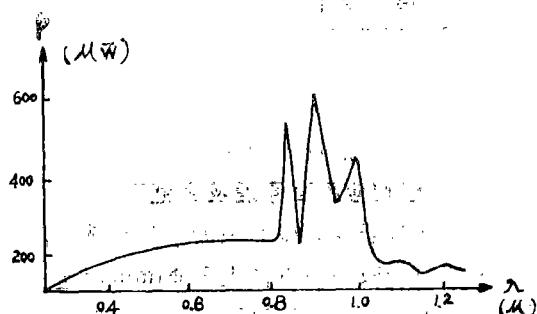
称之为一级标准的有绝对接受器($\phi = \text{常数} \cdot p$)，黑体接收器($S(\lambda) = \text{常数}$)，绝对量热计($\theta = \text{常数} \cdot p \cdot t$)以及电子同步加速器，氩等离子体等。本测试采用绝对接受器。其优点在于可用电加热接受面，再现辐射功率，以便准确校准辐射功率值。使用范围 $100\mu\text{W} \sim 100\text{mW}$ 。

称之为二级标准的有热电偶 $S(\lambda)$ ，热电堆 $S(\lambda_0)$ 、激光功率计 $S(\lambda)$ ，热丝灯 E ，能量计 Q 等。其测量准确度包括用一级标准定标过程中的传递误差。以上探测器可使用在 $100\mu\text{W}$ 以下的功率测量中，这是高灵敏度探测器光谱响应测试不可缺少的标准。

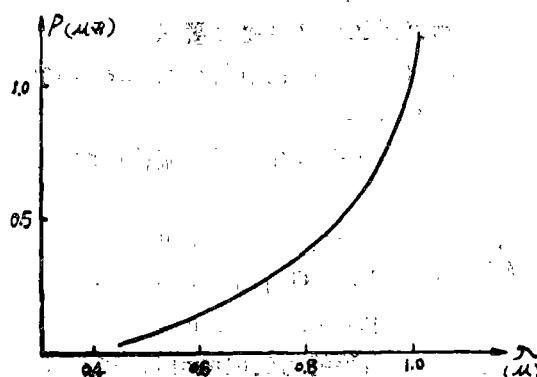
此外光谱响应测试尤其应注意二点：其一是辐射在各种探测器的辐射面积应小于探测器的光敏区面积，否则要进行计算；其二

是辐射在各种探测器光敏区上的辐射照度(瓦/米 2)不得超过各探测器的饱和辐照度。但是辐照度太小，输出信号太弱，应考虑适中。

测试系统(1)的光谱能量分布曲线，实际上是高压氙灯和单色仪能量分布曲线的综合结果。测试系统(1)，(2)光谱能量分布曲线参照图三，图四。



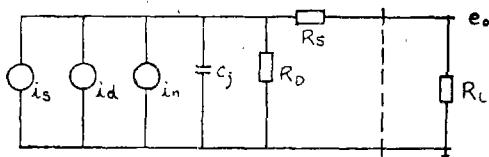
图三 测试系统(1)光谱能量曲线



图四 测试系统(2)光谱能量曲线

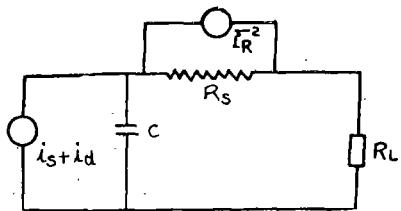
(b)、被测器件光电流的测试

光电流采用在标准电阻上测电压降计算而得。上述被测器件光电流测试基本分三种状态。一是在零偏压下测光电流，如Si—光电压器件。二是在低偏压下测光电流，如PIN光电二极管，四象限等。三是在一定偏压下产生倍增光电流，如GAPD、RAPD。不论哪种状态都应考虑暗电流，噪声电流对信号电流测试的影响。不同状态器件的等效运算电路^{[4][5]}如图五，图六，图七所示。

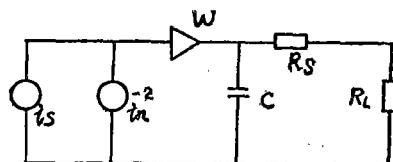


图五 零偏压下PIN等效电路

注: i_s —信号电流 C_j —二极管结电容
 i_d —暗电流 R_D —二极管实际动态电阻
 i_n —噪声电流 R_s —二极管实际串联电阻
 R_L —负载电阻



图六 偏压下光电二极管的等效电路。 i_n^2 代表散粒噪声电流, 其它符号意义同图五



图七 雪崩光电二极管等效电路, i_n^2 —噪声电流

在图五中有 R_D 存在, 并且 R_D 数值很大, 它是与正向电压成反比的指数函数。当 $R_L \ll R_D$ 时, R_s 对最大光电流输出影响很小。所以零偏压工作的Si—光电压器件应在“短路”下测光电流才正确。负载电阻根据不同情况选择在 $0.1 \sim 1\text{ k}\Omega$ 之间。

从图六, 图七中可知, R_s 是光电二极管内部的串联电阻, 在光电导模式中, R_s 很小, 当 $R_L \gg R_s$ 时, R_s 对最大输出电流影响很小。因此在测试中 R_L 选择在 $10 \sim 10\text{ k}\Omega$ 左右。

4. 各种探测器光谱响应测试结果

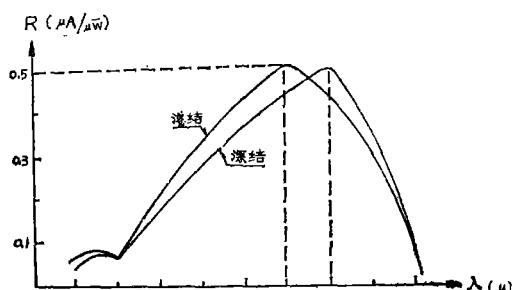
a Si—光电压探测器。光敏面直径 $\geq 10\text{ mm}$

测试条件: 工作电压 $V_R = 0$, $R_L \ll R_D$

$R_L = 100\Omega$,

辐照度 $H < 1\text{ W/cm}^2$ 。

典型光谱响应曲线如图八所示。



图八 硅光电压探测器的 $R \sim \lambda$ 曲线

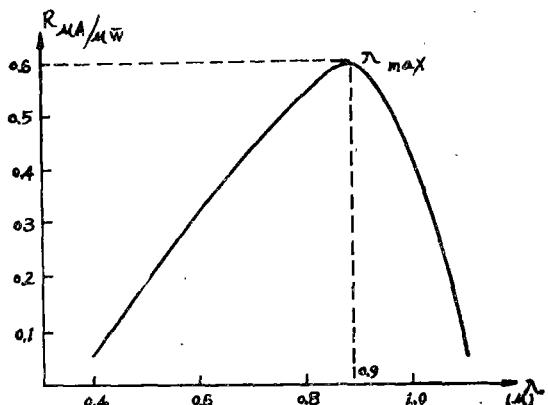
本器件暗电流 I_d 可以忽略不计。

b PIN 光电二极管。光敏面直径 $\phi 500\mu$

测试条件: $V_R = -15\text{ V}$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$

$I_d < 10^{-8}\text{ A}$, $H < 25\mu\text{W/mm}^2$

典型光谱响应曲线如图九所示:



图九 PIN二极管的 $R \sim \lambda$ 曲线

c Si—四象限探测器。光敏面直径 $\phi 4\text{ mm}$

测试条件: $V_R = -40\text{ V}$, $R_L = 100\Omega$

$I_d < 10^{-7}\text{ A}$, $H < 56\mu\text{W/mm}^2$

典型光谱响应曲线如图十所示:

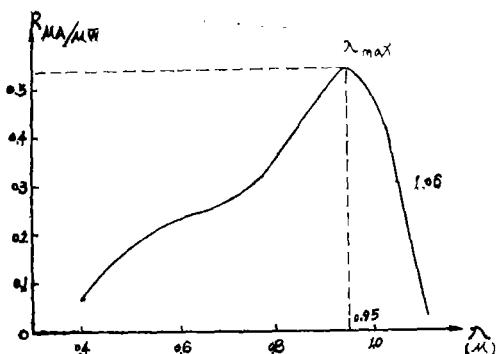
d 保护环雪崩光电二极管 (GAPD)

光敏面直径: $\phi 200 \sim 300\mu$ 。

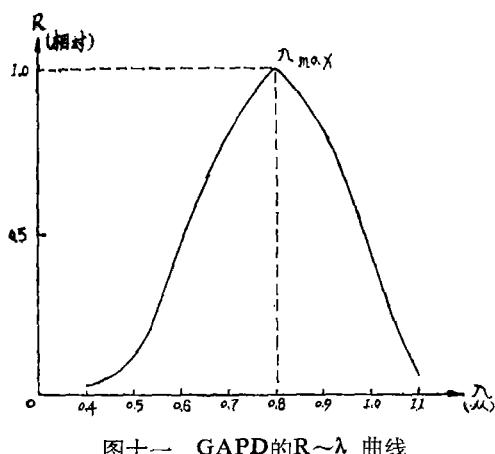
测试条件: $V_R = -80 \sim -90\text{ V}$,

$R_L = 100\Omega$ $H < 56\mu\text{W/mm}^2$

典型相对光谱响应曲线如图十一所示:



图十 硅四象限PIN探测器的R~λ曲线



图十一 GAPD的R~λ 曲线

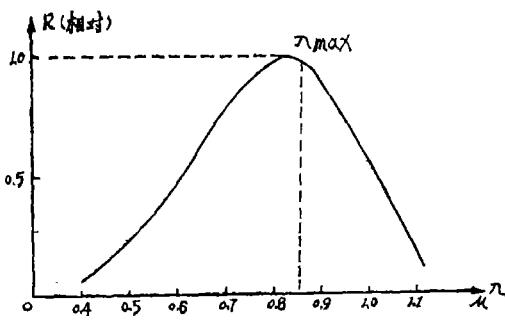
e, 拉通型雪崩二极管 (RAPD)

光敏面直径 $\phi 200\mu$ 。

测试条件: $V_R = -100V$, $R_L = 100\Omega$

$$H < 56\mu\text{W/mm}^2$$

典型相对光谱响应曲线如图十二所示:

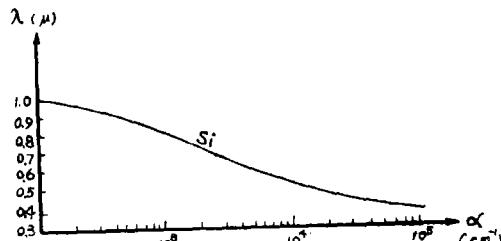


图十二 RAPD的R~λ曲线

5. 测试结果讨论与分析

探测器件光谱响应的决定因素是半导体

材料在不同波长下的吸收系数 α 。以上器件都是用硅材料制作的器件, 其吸收系数与波长的关系^[4]如图十三所示:



图十三 硅材料的α—λ曲线

从图十三可以看出 α 强烈地依赖波长, 波长越短吸收系数越大。在 0.3μ 时 $\alpha > 10^6\text{cm}^{-1}$, 因此大部份光在非常靠近表面被吸收, 光生载流子在那里复合很厉害, 对光电流无贡献。短波截止主要决定于表面高浓度区有效厚度和表面反射率。相反地在长波上由于 α 值太小不足以产生显著吸收, 而长波截止是由半导体的禁带宽度决定的, 其表达式如(2)

$$\lambda_C = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.24(\mu)}{E_g(\text{ev})} \quad (2)$$

E_g 为禁带宽度。

除此以外光谱响应均受器件光窗, 表面介质膜反射与吸收等影响。要提高器件在短波上的响应度必须设法降低表面死区厚度及减少反射等。要提高长波上的响应度则需采取改变材料禁带宽度等措施。目前, 波长大于 1μ 的探测器件多采用 Ge, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, GaInAsSb 等材料制做^[1]。^[8]

从光谱响应曲线测试中, 不仅可以了解器件使用范围, 还可以将响应曲线根据不同要求补偿成平直或视觉函数等形状的曲线。

三、响应度的测试

探测器响应度又称灵敏度或响应率。它是器件对辐射光探测能力的标志, 是器件一个重要参数。其定义为输出信号电流或电压与单位为瓦特流明的输入通量之比。常用单

位是 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$, $\mu\text{V}/\mu\text{W}$, $\mu\text{A}/\text{m}$ 。

半导体探测器件对波长是有选择性的, 即在相同辐射通量不同波长下其响应度是不同的。通常标定的灵敏度是在某一波长下或峰值波长下的典型值。数学表达式如(3)

$$R(\lambda) = \frac{i_s}{\phi_e \cdot d\lambda} \quad (3)$$

i_s : 信号电流, ϕ_e : 单位波长辐射通量。

dλ, 波长增量

现将响应度测试简介如下:

1、测试原理方框图: 同前。

2、测试系统: 同前。

3、测试方法: 同前。

4、响应度测试结果:

a、无增益探测器响应度测试条件同前。

各种类型探测器峰值响应度及起始与截止波长响应度见表一:

表一 探测器灵敏度表

型号	波长A 灵敏度 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$	峰值波长 (A)					截止波长A
		起始波长A	4000	8000	9000	9500	
Si-光电压二极管	0.05~0.1	浅结扩散 0.40~0.50	深结扩散 ~0.5				0.04~0.05
PIN-光电二极管	0.05			~0.6			0.05~0.1
Si-四象限 PIN探测器	0.05~0.08				~0.55	0.25~0.30	0.1~0.2

b、具有内增益GAPD、RAPD的量子效率。

对于GAPD、RAPD的响应度是用量子效率^[2]来反映的, 而量子效率的定义为: 在入射光作用下, 没有信号倍增时流经Pn结的光生载流子数与入射光子数之比, 即:

$$\eta = \frac{I_0}{e \cdot h\nu} / \frac{P_0}{h\nu} \quad (4)$$

$$\text{或 } \eta = \frac{R(\lambda) \cdot h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (5)$$

式中: e 为电子电荷, I_0 为没有倍增时的光电流, P_0 为入射光功率, $h\nu$ 为光子能量, λ 为测定时波长(μ), $R(\lambda)$ 为无倍增时响应度。

$$\frac{hc}{e} \approx 1.23958 \mu\text{W} \cdot \mu/\mu\text{A}$$

(i)、GAPD量子效率测试结果。

测试条件: GAPD光敏区直径 $\phi 300\mu$, 辐射光直径 $\leq \phi 150\mu$, $V_R = -20$ 伏, $H < 25 \mu\text{W}/\text{mm}^2$, $\lambda_{\max} = 0.8\mu$ 。

测得 $R_e: 0.30 \sim 0.40 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。

按(5)式计算得 $\eta = 50 \sim 60\%$

由于GAPD量子效率测量是属于微光低信号测量, 那么测量准确度如何呢? 可以和在全耗尽模式下工作的GAPD量子效率计算公式的计算结果进行比较。计算公式可近似表示为^[6]:

$$\eta = (1 - r) e^{-2d_1} [1 - e^{-a(w + d_2)}] \quad (6)$$

其中: r 为表面反射率。

d_1 : n^+ 区有效厚度;

d_2 : 杂质浓度成梯度分布的 p^+ 层厚度;

w : Pn结耗尽层宽度。

在GAPD工艺制做中分别采用如下数据:

$$r < 10\%, d_1 = 0.8\mu, d_2 = 10\mu, w = 6\mu, a \cdot 0.8\mu \approx 950 \text{ cm}^{-1}$$

按(6)式计算得: $\eta = 65.2\%$

由此说明测试结果接近计算值。反复多次测量结果表明精度较好。

(ii)、PAPD量子效率测试结果。

测试条件: 光敏区直径 $\phi 200\mu$, 辐射光直径 $\leq 150 \mu$, $H < 25\mu \text{W/mm}^2$, $V_R = -15 \text{V}$, $\lambda_{\max} = 0.86 (\mu)$, 测得 $Re: 0.50$

$$\eta = \frac{(1-r_1)e^{-\alpha d_1}(1-e^{-\alpha w})[1+r_2e^{-\alpha(w+2d_2)}]}{1-r_1r_2e^{-2\alpha(w+d_1+d_2)}} \quad (7)$$

式中: r_2 为背面反射率, 采用蒸铝时 $r_2 > 90\%$ 其余符号与(6)式相同。

用(7)式计算结果表明: 测试值接近计算值。

5. 结果的讨论与分析

根据接受器件的设计, 常用的是耗尽层探测器。当光照射光敏区时, 半导体吸收光产生空穴-电子对, 在耗尽区中或在离耗尽区一个扩散长度内产生的空穴-电子对最后被电场分开。当载流子漂移通过耗尽层时, 在外电路就有信号输出。选择适当的耗尽层厚度可使器件灵敏度及频率响应都实现最佳化。

从以上讨论可知: 若提高响应度(或量子效率), 应使表面反射率 r_1 越小越好、背面反射率越大越好, 而 $d_1 \cdot d_2$ 应尽可能小, 耗尽层 W 应尽量厚。然而, 耗尽层厚, 其载流子在耗尽区渡越时间越长, 器件的响应也越差。因此应根据实际要求, 考虑响应度与响应时间取舍问题。

从另一方面讲, 要提高响应度, 必须减少暗电流, 降低噪声。为了降低暗电流, 要求材料无位错、寿命尽量高, 并且希望在高温处理后下降少。

总之, 探测器件响应度测试不仅反映器件的探测能力, 同时也反映器件工艺设计取舍以及衬底材料选取等问题。此外, 响应度中光电流测试尚可反映内增益探测器倍增因子 M 的大小; (用倍增下与无倍增下光电流之比来反映) 同时在噪声等效功率(NEP)测试中, 也可用响应度换算正弦调制的辐射功率大小。因此响应度测试是探测器件不可缺少的重要参数之一。

$\sim 0.55\mu\text{A}/\mu\text{W}$

按(5)式计算得 $\eta = 70\text{--}80\%$

同理 RAPD 全耗尽下工作模式的量子效率可用(7)式近似表示^[8]:

四、测试误差分析

1. 测试系统误差

测试的系统误差主要包括: 光电流, 光功率测试中所用仪器, 仪表本身准确度带来的误差; 以及所采用方法带来的误差, 还包括个人视觉读数误差等……。

a. 测试仪器本身的误差

光电流测试仪器 $\leq \pm 0.1\%$

光功率测试仪器 $\leq \pm 1 \sim \pm 3\%$

b. 测试方法所带来误差

光电流测试采用在标准电阻上用电位差计测电压并计算而得:

$$i_s = \frac{V}{R}$$

$$\ln i_s = \ln V - \ln R$$

等式两边微分得:

$$\frac{di_s}{i_s} = \frac{dv}{v} - \frac{dR}{R}$$

因 $\frac{\Delta v}{v}, \frac{\Delta R}{R}$ 皆为 0.01 级

所以 $\frac{\Delta i_s}{i_s} \leq \pm 0.02\%$

光功率测试采用一级标准绝对辐射计测量, 并用加热电校方法确定光功率, 即用

$$P = I \cdot V = \frac{V^2}{R}$$

$$\text{同理 } \frac{dP}{P} = 2 \frac{dV}{V} - \frac{dR}{R}$$

所以 $\frac{\Delta P}{P} \leq \pm 0.03\%$

由此可以说明测试方法误差可以忽略不计, 关于个人偏差可以根据情况加以校正消除。

2. 偶然误差(随机误差)

在光电流, 光功率等测试中偶然误差有

表二 系统光功率测试标准误差表

光功率 波长A μW	序号								算术 平均值 μW	标准 误差 μW	标准误 差系数 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8			
6328	229	227	228	230	230	230	231	235	230	2.39	1.04
8300	449	447	440	442	445	447	442	450	445	3.63	0.82

表中标准误差为在有限测试次数中

$$\text{标准误差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

x_i 为单次测试值。

\bar{x} 为算术平均值。

n 为测试次数。

同理光电流测试误差 $\leq 0.1\%$ (误差表省略)

综合以上所述, 根据测试误差在传递过程中叠加原理, 光谱响应和响应度测试误差 $\leq \pm 5\%$ 左右。

五、结束语

本文介绍的测试方法有准确度高($\leq \pm 5\%$)、精密度好($\leq 1\%$)等优点, 并用显微镜聚焦方法验证了测试方法的可靠性。但是, 本测试还有不少工作要改进, 如寻找能量分布曲线平坦(无峰谷)、近红外能量高的强光源, 以及设法提高辐射功率测量准确度等问

题大, 有时小。但在相同条件下, 对同一物理量做多次测量, 测量次数足够多时, 则可发现偶然误差符合统计规律。如表(2)所示的光功率测试误差表。

题。

以上有不当之处, 请批评指正。

主要参考资料:

- 〔1〕电子通讯学会誌。Vol. 63, №1, 1980 27~34
- 〔2〕J. Appl. Phys. 1978 Vol. 49, №10, 5324~5331
- 〔3〕Appl. Phys., 1978 Vol. 47 №11, 1076~1079.
- 〔4〕S. M. SZE(史西蒙)著《半导体器件物理》1972年, 369~378
- 〔5〕半导体光电 1980, Vol. 1 28~38.
- 〔6〕RCA Review Vol. 35, №2, 234~278. 1974