

# 硅光电二极管自校准技术的 理论分析与实验结果

李 同 保

(中国计量科学研究院大邑分院)

## 提 要

本文在论述影响硅光电二极管外量子效率诸因素的基础上,着重讨论了器件的收集效率,给出了确定器件外量子效率的一般公式和简化公式。对三个器件进行了自校准实验,确定外量子效率的不确定度在 $\pm 0.05\%$ ,三个器件测量激光束功率的一致性在 $\pm 0.05\%$ ,与现有的绝对辐射计测量结果符合在 $0.2\%$ 。

## 一、引 言

到目前为止,通常都是用黑体辐射器或绝对辐射计来实现光辐射的绝对测量。这种技术所能达到的最高准确度(除十分复杂和昂贵的超低温量热计之外),通常只有千分之几的水平。现在讨论的以精密确定光量子效率为基础的硅光电二极管自校准技术,无论是简单性还是准确度都是传统的方法所不能比拟的。

在波长为 $\lambda$ ,辐射功率为 $W$ 的光辐射作用下,硅光电二极管产生的光电流 $I$ 可以表示为

$$I = \frac{e\lambda W}{hc} Q(\lambda), \quad R(\lambda) = \frac{I}{W} = \frac{e\lambda}{hc} Q(\lambda), \quad (1)$$

式中 $R(\lambda)$ 是器件的光谱响应度, $e$ 为电子电荷, $c$ 为真空中的光速, $h$ 为普朗克常数, $Q(\lambda)$ 称为器件的外量子效率,即单位时间流过硅光电二极管外回路的电子数与入射光子数之比。将目前认为最准确的 $h$ 、 $c$ 、 $e$ 值<sup>[1]</sup>代入(1)式可得 $R(\lambda) = 0.806549 \cdot \lambda Q(\lambda)$ 。显然,如果能够准确地确定 $Q(\lambda)$ ,那末就可以不依赖于现行的光辐射标准来确定硅光电二极管的光谱响应度,从而实现光辐射的绝对测量,这就是所谓的硅光电二极管自校准技术。

J. Geist等人最早进行了硅光电二极管自校准技术的研究<sup>[2~5]</sup>。他们利用不同的结前区载流子复合模型,给出了不同的确定器件外量子效率的公式。我们将在论述影响硅光电二极管外量子效率诸因素的基础上,着重讨论器件的收集效率,给出确定器件外量子效率的一般公式和简化公式,最后将自校准技术的实验结果与传统的绝对辐射计算定的结果作了比较。

## 二、硅光电二极管的外量子效率

这里讨论的硅光电二极管一般是指具有平面型结构的PIN器件。其结构可以分为四个层次,即SiO<sub>2</sub>抗反射及钝化层、重掺杂的 $p^+$ 层、轻掺杂的 $n$ 层和重掺杂的 $n^+$ 层。在 $p^+$

区前表面镀有集电环,  $n^+$  区后表面镀有欧姆接触的背电极。这种硅光电二极管的外量子效率可以表示如下

$$Q(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)] Y(\lambda) \int_0^{x_H} \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] P(x) dx, \quad (2)$$

式中  $\rho(\lambda)$  为器件前表面的反射比,  $\alpha(\lambda)$  是硅的光谱吸收系数,  $Y(\lambda)$  是硅的光量子产额,  $P(x)$  是器件内部不同位置 (仅考虑一维情况) 对光生载流子的收集效率。我们取坐标原点在  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}$  界面,  $x_H$  为整个  $p^+-n-n^+$  区域的厚度。在给出上式时我们还假定器件前表面  $\text{SiO}_2$  层的光吸收可以忽略 (误差小于  $1 \times 10^{-6}$ ), 光通过  $p^+-n-n^+$  区后衰减为零 (误差小于  $1 \times 10^{-5}$ ), 整个器件半导体参数是分区均匀的。

就目前关于半导体器件的理论数据和测试手段而言,  $\rho(\lambda)$  可用高精度的实验进行测定,  $\alpha(\lambda)$  已有数据可用<sup>[6]</sup>,  $Y(\lambda)$  仅在波长小于 400 nm 和波长大于 750 nm 时才与 1 有偏离<sup>[7]</sup>。着重需要讨论的是器件的收集效率  $P(x)$ 。收集效率被定义为在  $x$  点注入单位电流时流过  $p-n$  结的电流, 其物理含意是指非平衡少数载流子在被复合之前通过结区的几率。我们现在从讨论非平衡载流子的分布出发, 求出收集效率  $P(x)$ 。

我们将器件沿  $x$  方向划分为结前  $p$  型区 ( $0 \leq x \leq x_j$ )、结区 ( $x_j \leq x \leq x_j + w$ ) 和结后  $n$  型区 ( $x_j + w \leq x \leq x_H$ ) 三个区域。中间的结区内有很强的自建电场, 它能全部收集在该区产生的光生载流子。在结前  $p$  区和结后  $n$  区中没有自建电场的存在, 光生载流子仅仅作扩散运动。 $\text{SiO}_2$ - $\text{Si}$  界面的正电荷积累和表面态的存在, 以及  $n-n^+$  界面自建电场的作用都作为边界条件处理, 它们分别使前界面的电子复合速度增大和后界面的空穴复合速度变小。于是我们可以列出结前  $p$  区和结后  $n$  区当  $x$  位置有单位光生非平衡少数载流子产生时的扩散方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 N_n(s)}{ds^2} - \frac{N_n(s)}{L_n^2} + \frac{\delta(s-x)}{D_n} &= 0, & (0 \leq s \leq x_j) \\ \frac{dN_p(s)}{ds^2} - \frac{N_p(s)}{L_p^2} + \frac{\delta(s-x)}{D_p} &= 0, & (x_j + w \leq s \leq x_H) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以及边界条件  $N_n(s)|_{s=x_j} = 0$ ,  $N_p(s)|_{s=x_j+w} = 0$ ,  $dN_n(s)/ds|_{s=0} = v_n N(0)/D_n$ ,  $dN_p(s)/ds|_{s=x_H} = v_p N(x_H)/D_p$ 。这里  $D_n$ 、 $D_p$ 、 $L_n$ 、 $L_p$  分别对应于  $p$  区中电子和  $n$  区中空穴的扩散系数及扩散长度,  $v_n$  和  $v_p$  分别对应于电子在  $p$  区前界面和空穴在  $n$  区后界面的复合速度。

利用 Laplace 变换求解方程得到非平衡少数载流子浓度分布为

$$\left. \begin{aligned} N_n(s) &= \frac{\cosh \frac{s}{L_n} + \frac{v_n L_n}{D_n} \sinh \frac{s}{L_n}}{\cosh \frac{x_j}{L_n} + \frac{v_n L_n}{D_n} \sinh \frac{x_j}{L_n}} \cdot \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{x_j - x}{L_n} - \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{s - x}{L_n}, \\ N_p(s) &= \frac{\cosh \frac{x_H - x}{L_p} + \frac{v_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_H - s}{L_p}}{\cosh \frac{x_H - (x_j + w)}{L_p} + \frac{v_p L_p}{D_p} \sinh \frac{x_H - (x_j + w)}{L_p}} \\ &\quad \cdot \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{x - (x_j + w)}{L_p} - \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{x - s}{L_p}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

求得非平衡少数载流子浓度分布后很容易按下式计算收集效率

$$\left. \begin{aligned} P(x) &= -D_n dN(s \cdot x) / ds |_{s=x_j}, & (0 \leq x \leq x_j) \\ P(x) &= -D_p dN(s \cdot x) / ds |_{s=x_j+w}, & (x_j+w \leq x \leq x_H) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

于是我们就得到全部三个区域内的收集效率为

$$P(x) = \begin{cases} \cosh(x_j - x) / L_n - A \sinh(x_j - x) / L_n, & (0 \leq x \leq x_j) \\ 1, & (x_j \leq x \leq x_j + w) \\ \cosh[x - (x_j + w)] / L_p - B \sinh[x - (x_j + w)] / L_p, & (x_j + w \leq x \leq x_H) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$A = \frac{\operatorname{tgh} \frac{x_j}{L_n} + \frac{v_n L_n}{D_n}}{1 + \frac{v_n L_n}{D_n} \operatorname{tgh} \frac{x_j}{L_n}}, \quad B = \frac{\operatorname{tgh} \frac{x_H - (x_j + w)}{L_p} + \frac{v_p L_p}{D_p}}{1 + \frac{v_p L_p}{D_p} \operatorname{tgh} \frac{x_H - (x_j + w)}{L_p}} \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式并考虑到在400 nm~750 nm的波长范围内有 $Y(\lambda) = 1$ 和 $\exp[-\alpha(\lambda)x_H] \rightarrow 0$ , 可得到量子效率的一般理论表达式为

$$\begin{aligned} Q(\lambda) &= [1 - \rho(\lambda)] \left\{ \frac{\alpha(\lambda) L_n}{\alpha^2(\lambda) L_n^2 - 1} \left[ (A + \alpha(\lambda) L_n) \cosh \frac{x_j}{L_n} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1 + A \alpha(\lambda) L_n) \sinh \frac{x_j}{L_n} - \left( A + \frac{1}{\alpha(\lambda) L_n} \right) \exp(-\alpha(\lambda) x_j) \right] \right\} \\ &\quad + \frac{\alpha(\lambda) L_p}{\alpha^2(\lambda) L_p - 1} \left( \frac{1}{\alpha(\lambda) L_p} - B \right) \exp[-\alpha(\lambda)(x_j + w)]. \end{aligned} \quad (8)$$

虽然直接应用上式来确定器件的外量子效率是比较复杂的, 但在许多情况下可以加以简化。下面我们对一种典型的EG&GUV444B硅光电二极管确定器件的外量子效率。已知该种类型器件是在浓度约为 $10^{14}/\text{cm}^3$ 的轻掺杂 $n$ 型高阻硅上浅结扩散硼( $10^{19}/\text{cm}^3$ )而制成, 另外还在背面扩散磷形成 $n-n^+$ 结构, 使得 $v_p \rightarrow 0$ 。其典型参数 $x_H \doteq 300 \mu\text{m}$ ,  $x_j \doteq 0.1 \mu\text{m}$ , 其它参数由手册<sup>[8]</sup>可查出为 $L_n \doteq 200 \mu\text{m}$ ,  $L_p \doteq 500 \mu\text{m}$ ,  $D_n \doteq 30 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $D_p \doteq 4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,  $\alpha(\lambda = 0.633 \mu\text{m}) \doteq 0.365/\mu\text{m}$ 。参考上述数据可将(8)式简化为

$$\left. \begin{aligned} Q(\lambda) &= [1 - \rho(\lambda)] [1 - C_1(\lambda) - C_2(\lambda)], \\ C_1(\lambda) &= x_j^2 v_n \alpha(\lambda) / 2D_n, \\ C_2(\lambda) &= \operatorname{tgh}(x_H / L_p) \exp[-\alpha(\lambda)(x_j + w)] / \alpha(\lambda) L_p. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

现在我们来求 $\lambda = 0.63299 \mu\text{m}$ 时的外量子效率。如前所述,  $\rho$ 可以直接精确测量,  $C_1$ 和 $C_2$ 表达式中除 $v_n$ 和 $w$ 以外都已有数据可采用。器件前界面少数载流子复合速度 $v_n$ 是随工艺过程变动较大的参数, 其值对不同的器件约在 $1 \times 10^6 \text{ cm}/\text{sec} \sim 5 \times 10^6 \text{ cm}/\text{sec}$ 之间, 对应的 $C_1$ 值在 $0.03 \sim 0.006$ 之间变化。如果在 $\text{SiO}_2$ 层上施加饱和负偏压, 抵消 $\text{Na}^+$ 正电荷的影响,  $v_n$ 可降到 $10^3 \text{ cm}/\text{sec}$ 量级, 这时有 $C_1 \rightarrow 0$  (其值小于 $1 \times 10^{-5}$ )。另一个对不同器件变动较大的参数是结区宽度 $w$ , 其值通常为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ , 对应的 $C_2$ 值为 $0.001 \sim 0.0006$ 。当对器件施加饱和反向偏压时,  $w$ 增大到 $30 \mu\text{m}$ 以上, 这时有 $C_2 \rightarrow 0$  (其值小于 $1 \times 10^{-6}$ ), 于是我们可以对绝对值本来就很小的 $C_1, C_2$ 值通过实验方法进一步确定。

首先我们测量器件施加饱和 $\text{SiO}_2$ 层偏压时的响应度与零偏压下的响应度之比 $\varepsilon_0$ , 由(9)式可知

$$\varepsilon_0 = (1 - C_1 - C_2) / (1 - C_2). \quad (10)$$

然后我们测量器件施加饱和和反向偏压时的响应度与零偏压下的响应度之比 $\varepsilon_R$ , 由(9)式同

样可知

$$\varepsilon_R = (1 - C_1 - C_2) / (1 - C_1) \quad (11)$$

由(10)和(11)式求出  $C_1$  和  $C_2$  为

$$C_1 = [\varepsilon_R(1 - \varepsilon_0)] / [1 - (1 - \varepsilon_R)(1 - \varepsilon_0)], \quad C_2 = [\varepsilon_0(1 - \varepsilon_R)] / [1 - (1 - \varepsilon_R)(1 - \varepsilon_0)] \quad (12)$$

由(9)和(12)式就可以相当精确地确定  $Q(\lambda)$ 。

### 三、实验结果与讨论

我们就三个 EG&GUV444B 硅光电二极管按上述分析对  $\lambda = 0.63299 \mu\text{m}$  的光谱响应度作了自校准, 整个试验的方块图如图 1 所示。

He-Ne 激光器出射的单色光束经过 E-O 稳功率系统后作为实验光束, 经过稳功率系统后的光束功率稳定性为  $0.2\%/hr$ , 为了提高  $\rho$ 、 $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_R$  等比值的测量精度又使用了同步采样的参考光束系统, 这可以将光束功率波动时比值测量的影响减小至  $0.02\%$  以下。最后到达实验硅光电二极管上的光功率在  $1.4 \text{ mW}$  左右, 通过限束光阑后的光直径为  $\phi 4 \text{ mm}$ , 这对于受光面积为  $\phi 11 \text{ mm}$  的硅光电二极管来说很容易作到全功率测量。自校准实验中, 仅仅涉及相对比值的测量, 通过选择适当的测量程序和条件可以忽略器件响应度面积均匀性和直线性的影响, 这些特征对器件的应用无疑是重要的, 关于这方面的问题将在另外的文章中讨论。

由于器件的前表面都有光学级的加工精度, 其反射特性接近于理想的定向反射, 用两个硅光电二极管很容易互换位置测量确定  $\rho$  值。测量  $\varepsilon_0$  时, 为了能在器件的  $\text{SiO}_2$  层上施加负偏压, 使用了蒸馏水液滴。偏压源的负电极插在液滴里, 正电极连接器件的集电环, 在  $45 \text{ V}$  时观察到输出饱和, 于是就在该负偏下测量求出  $\varepsilon_0$  值。在反向偏压实验中, 取饱和偏压为  $6 \text{ V}$ , 测得  $\varepsilon_R$ 。

为了和目前的绝对辐射计为基础的光辐射测量标准相比较, 用一个电校准热释电辐射计相对我们保存的锥腔型绝对辐射计基准组标定了三支硅光电二极管的光谱响应度, 其结果如表 1~3 所示。

由表 1 可以看出,  $C_1$  和  $C_2$  的实际确定值基本上在理论分析估算值的变化范围之内。它们测定的相对精度虽然很差 ( $1\% \sim 100\%$ ), 但因其绝对值本身很小, 所以对  $Q(\lambda)$  不确定度的影响仍然在  $0.04\%$ 。表 2 的结果表明, 硅光电二极管自校准响应度和绝对辐射标定响应度之间的偏差在  $0.1\% \sim 0.2\%$  范围, 考虑到绝对辐射计的不确定度为  $0.3\%$ <sup>[9]</sup>, 所以可以认为两者符合得相当满意。表 3 的数据给出了不同器件自校准结果的一致性。用它们测量大约  $1.37 \text{ mW}$  的激光束功率呈现了  $\pm 0.0007 \text{ mW}$  的发散, 这相当于三个器件的自校准结

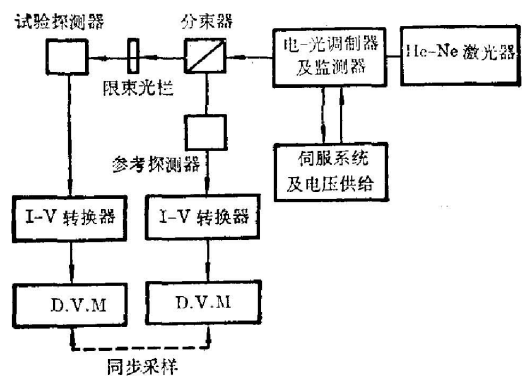


图 1 硅光电二极管自校准实验示意图

Fig. 1 Experimental schematic diagram of the self-calibration technique of silicon photodiode

表 1 硅光电二极管自校准实验结果( $\lambda=0.63299\ \mu\text{m}$ )

Table 1 The experimental results from self-calibration silicon photodiodes

	UV444B No. 28	UV444B No. 71	UV444B No. 1	不 确 定 度 (绝对单位)
$1-\rho$	0.9157	0.9171	0.9096	$\pm 0.0002$
$\epsilon_0$	0.9662	0.9680	0.9906	$\pm 0.0003$
$\epsilon_R$	0.9989	0.9998	0.9994	$\pm 0.0002$
$C_1$	0.0338	0.0320	0.0094	$\pm 0.0003$
$C_2$	0.0011	0.0002	0.0006	$\pm 0.0002$
$Q$	0.8837	0.8875	0.9005	$\pm 0.0005$

表 2 硅光电二极管自校准响应度( $R_{\text{自}}$ )与绝对辐射计标定响应度( $R_{\text{绝}}$ )的比较( $\lambda=0.63299\ \mu\text{m}$ )Table 2 Comparison of responsivity ( $R_{\text{self}}$ ) of self-calibration with responsivity ( $R_{\text{abs}}$ ) of absolute radiometer calibration for silicon photodiodes

	UV444B No. 28	UV444B No. 71	UV444B No. 1	不 确 定 度 (相对单位)
$R_{\text{自}}(\text{A/W})$	0.4512	0.4531	0.4597	$\pm 0.05\%$
$R_{\text{绝}}(\text{A/W})$	0.4508	0.4528	0.4590	0.3%
$R_{\text{自}}/R_{\text{绝}}$	1.0009	1.0007	1.0015	$\pm 0.3\%$

表 3 三个自校准硅光电二极管测量光功率的一致性( $\lambda=0.63299\ \mu\text{m}$ )

Table 3 Consistency of optical power measurements with three self-calibration silicon photodiodes

	UV444B No. 28	UV444B No. 71	UV444B No. 1	平均值及发散范围
光功率值(mW)	1.3694	1.3700	1.3686	$1.3693 \pm 0.0007$

果有  $\pm 0.05\%$  的一致性, 这个结果也和表 1 所示外量子效率  $Q$  的不确定度相符合。显然, 这大大优于目前保存的绝对辐射计基准组的不确定度。

硅光电二极管自校准技术的研究显然刚刚开始, 但它在实现光辐射绝对测量中已显示出广泛的应用前景。今后的任务是完善机理研究, 研制高性能的器件, 扩展光谱范围, 使其得到更普遍的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 《计量与测试》(中国计量科学院编辑, 1977)。
- [2] J. Geist; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 6(Mar), 760.
- [3] J. Geist; *Proc. SPIE*, 1979, **196**, 75.
- [4] E. Zalewski *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 8(Apr), 1214.
- [5] J. Geist *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 22(15 Nov), 3795.
- [6] W. C. Dash *et al.*; *Phys. Rev.*, 1955, **99**, No. 4(15 Aug), 1151.
- [7] O. Christensen; *J. A. P.*, 1976, **47**, No. 2(Feb), 689.
- [8] H. F. Wolf; 《Silicon Semiconductor Data》(Signetics corp., 1969)。
- [9] 中国计量科学院; 《科学通报》, 1977, **22**, No. 8(Aug); 405.

## The theoretical analysis and experimental results on the self-calibration technique of silicon photodiode

LI TONGBAO

(National Institute of Metrology, Chengdu)

(Received 5 June 1981, revised 25 February 1982)

### Abstract

The several factors on which the outer quantum efficiency of the silicon photodiodes depend upon, especially the collection efficiency of the devices have been discussed. The universal formula and simplified formula for determining the quantum efficiency of the devices have also been shown. For three silicon photodiodes on which the self-calibration have been done we obtained that the uncertainty of determining outer quantum efficiency was about  $\pm 0.05\%$ , the consistency of measuring laser beam power was about  $\pm 0.05\%$  also, and finally the agreement with the results from the absolute radiometers was better than  $\pm 0.2\%$ .

(上接第 444 页)

“高速摄影、光子学专业委员会”和“光学薄膜专业委员会”等四个专业委员会予以追认。并同意设立“中国光学学会光谱专业委员会”。常务理事们认为：光学科普工作是学会任务中很重要的一部分，由于没有成立科普工作委员会，因此两年多来科普工作开展得很少，决定于 1982 年下半年成立“中国光学学会科普工作委员会”，并尽快组建《光的世界》编辑部，试刊出版。

常务理事们仔细审议了“中国光学学会外事工作条例(讨论稿)”，认为在认真修改后，应交中国科协审查。常务理事们听取了筹备 1983 年在我国召开国际激光会议的情况介绍。认为这对促进我国激光事业的发展是有益的。同意 1983 年由我国主办国际激光会议。建议由理事长王大珩教授任会议主席报中国科协审批，并决定由激光专业委员会负责筹办这次会议。

《光学学报》编辑部向常务理事会作了工作汇报。许多常务理事肯定了学报在较短的时间内取得了可喜的成绩。根据光学发展的现状，常务理事会同意从 1983 年 1 月起，《光学学报》由双月刊改为月刊出版。

常务理事会同意聘请方线同志兼任中国光学学会常务副秘书长，免去尚惠春同志的中国光学学会常务副秘书长职务，并报中国科协备案。

为了筹备召开中国光学学会第二次代表大会，决定“二大”会议的主要内容是：修改会章、学会工作报告、改选理事会、学会经费使用的审查及学术报告。时间暂定于 1983 年第四季度，地点暂定在北京，人数约 400 人。

(广 能)