

样品厚度对表面光电压法测试 少子扩散长度的影响

杨恒青 姜国庆 陈玉金 包宗明

(复 旦 大 学)

1982年10月25日收到

提 要

本文定量分析了样品厚度 d 及单色光的透入深度 α^{-1} 对表面光电压法测试少子扩散长度的影响,并从实验上进行了验证。本文还讨论了样品厚度对两点法直读少子扩散长度测试结果的影响,并给出从测得的表观扩散长度定出真实扩散长度的方法。观察了光生非平衡载流子的注入水平对扩散长度测试结果的影响。

一、引 言

表面光电压法可以用来非破坏性地检测抛光片及单晶锭中少子扩散长度及其在表面各点的分布。由于表面光电压法避免了受光面表面复合的影响,其测试结果与受光表面复合速度无关。因此对于硅抛光片,采用表面光电压法测试少子扩散长度是一种方便可靠的测试手段。

根据文献报道^[1],表面光电压法要求样品厚度大于四倍少子扩散长度,但文献中未见有详细的定量分析。特别是样品的光吸收系数倒数与样品厚度的相对关系对测试结果的影响未见有人定量讨论。为了将表面光电压法用于随工艺测试,分析样品厚度对测试结果的定量影响是很必要的。本文从理论上分析了样品厚度对表面光电压法测试少子扩散长度的影响及其修正方法,并在实验上证实了该理论分析的结果。

二、原 理

当半导体受到光子能量略大于半导体禁带宽度的光照射时,在样品表面附近产生大量非平衡的电子-空穴对。由于晶片表面常常存在表面势,表面附近的非平衡载流子在表面势的作用下将发生分离,从而建立表面光电压。表面光电压是一个复杂的效应,受到表面复合、表面陷阱的影响。一般认为,它是表面势垒边界上非平衡载流子浓度的函数。以 n 型半导体为例,表面光电压

$$\Delta V = f[\Delta p(0)].$$

式中, $\Delta p(0)$ 为表面势垒边界上非平衡空穴浓度,它与注入光子通量密度 I 、光吸收系数

α 以及少子扩散长度 L 有关。

对于图 1 所示的情况, 若入射单色光的波长及光强满足:

$$\alpha d_1 \ll 1, \Delta p(0) \ll n_0;$$

并且样品厚度不能看作无穷大, 样品背面的表面复合速度可视作无穷大, 即背面非平衡少子浓度可作为 0, 这时一维少子扩散方程及边界条件为:

$$D \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta p(x)}{\tau} = -\alpha \eta I (1-R) e^{-\alpha x}$$

$$D \frac{d \Delta p(x)}{dx} \Big|_{x=0} = S \Delta p(0)$$

$$\Delta p(d) = 0$$

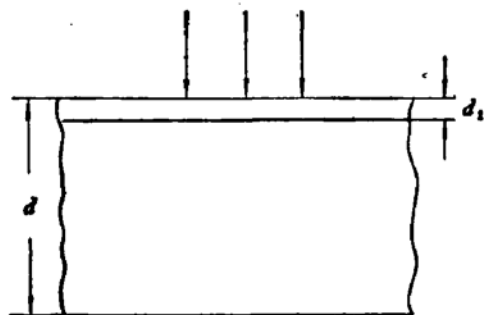


图 1 单色光照到样品表面

其中 d_1 是样品表面势垒厚度; n_0 为平衡电子浓度; x 为从表面算起的距离; $\Delta p(x)$ 为 x 处的非平衡空穴浓度; D 为少子扩散系数; τ 为少子寿命; η 为量子效率; R 是样品的光反射系数; S 为光照面表面复合速度; d 为样品厚度。

解方程得

$$\Delta p(x) = \frac{\theta - \zeta e^{d/L}}{2 \operatorname{ch} d/L} e^{-x/L} + \frac{\theta + \zeta e^{-d/L}}{2 \operatorname{ch} d/L} e^{x/L} + \frac{\alpha \eta I (1-R)}{\frac{1}{\tau} - D \alpha^2} e^{-\alpha x}$$

其中

$$\zeta = L \left[\frac{S}{D} \Delta p(0) + \frac{\alpha^2 \eta I (1-R)}{\frac{1}{\tau} - D \alpha^2} \right],$$

$$\theta = - \frac{\alpha \eta I (1-R)}{\frac{1}{\tau} - D \alpha^2} e^{-\alpha d}.$$

从而求得表面非平衡少子浓度为:

$$\Delta p(0) = \frac{\eta I (1-R)}{D/L + S} \cdot \frac{\alpha L}{1 + \alpha L} \cdot \frac{1}{\xi'}.$$

其中

$$\xi' = \frac{\left(1 + \frac{LS}{D} \operatorname{th} d/L\right) (1 - \alpha L)}{\left(1 + \frac{LS}{D}\right) \cdot \left(1 - \frac{e^{-\alpha d}}{\operatorname{ch} d/L} - \alpha L \operatorname{th} d/L\right)}.$$

记 $I(1-R)$ 为 Y , α^{-1} 为 X , 使得

$$\alpha Y = (X + L) \xi. \quad (1)$$

其中

$$\alpha = \frac{\eta L \left(1 + \frac{LS}{D}\right)}{(D/L + S) \Delta p(0) \left(1 + \frac{LS}{D} \operatorname{th} d/L\right)},$$

$$\xi = \frac{1 - \alpha L}{1 - \frac{e^{-\alpha d}}{\operatorname{ch} d/L} - \alpha L \operatorname{th} d/L}. \quad (2)$$

实验时改变入射光波长,同时调节光子通量密度 I , 以保持表面光电压 ΔV 不变,从而达到保持 $\Delta p(0)$ 不变的要求,这时 α 是常量. 当 $d \gg L$ 、 $\alpha d > 1$ 时, $\xi \rightarrow 1$, 方程(1)就简化成一般文章中所用的直线方程^[2]. 将 $I(1 - R)$ 对 α^{-1} 作图可得一条直线,该直线在 α^{-1} 轴上的截距的绝对值就是少数扩散长度. 由于 $(1 - R)$ 实际上变化甚微,可以看作是常量,故只需作 $I - \alpha^{-1}$ 图即可. 若条件 $d \gg L$ 、 $\alpha d > 1$ 不能满足, ξ 值将大于 1, 并取决于 α 、 d 、 L 的数值,因此 $I - \alpha^{-1}$ 的关系就偏离直线,从而对测定少数扩散长度引进误差. 由此可见, ξ 值实际上代表了测试点偏离直线的程度. 为了计算薄样品测试时引进的误差,必须由(2)式计算 ξ 值.

在两点法直读少数扩散长度的方法中^[2], 这种 $I - \alpha^{-1}$ 的非线性对测试结果同样也将产生影响. 为此,我们讨论样品厚度 d 对两点法直读少数扩散长度测试结果的影响.

如图 2 所示,在所选取的两个波长下,硅的吸收系数分别为 α_1 、 α_2 . 当满足 $d \gg L$ 、 $\alpha d > 1$ 条件时, $I - \alpha^{-1}$ 为直线关系. 在该选定的两个波长下,测得的光子通量密度分别为 I_1 及 I_2 , 少数扩散长度为 L (即样品的真实扩散长度). 若不满足上述条件, $I - \alpha^{-1}$ 关系由(1)式决定. 测试时,在这两个波长下保持表面光电压不变得到的光强为 $\xi_1 I_1$, $\xi_2 I_2$, 这时求得的扩散长度为表观扩散长度,记为 L' , 它显然比真实扩散长度短.

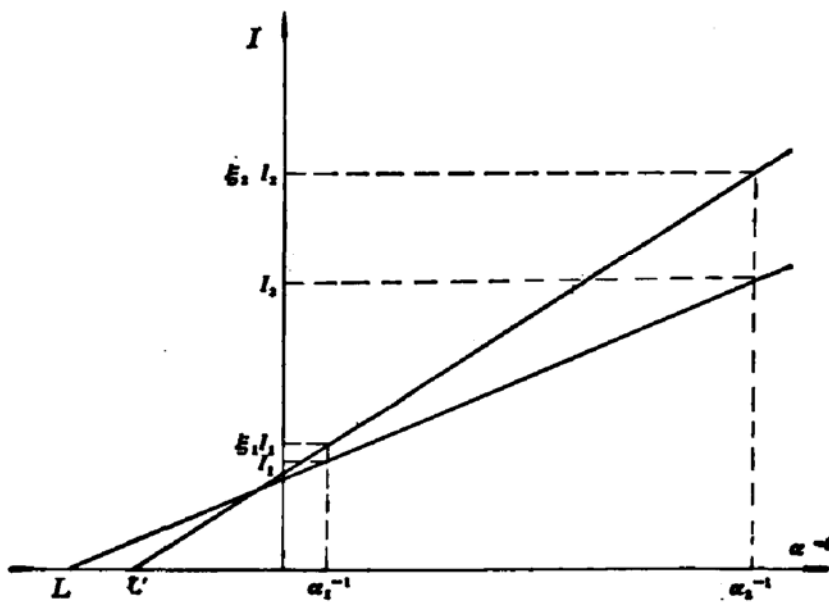


图 2 真实扩散长度 L 与表观扩散长度 L' 的关系

由图 2 各相似三角形的关系得:

$$L = \frac{\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1}}{\frac{I_2}{I_1} - 1} = \frac{1}{\alpha_1},$$

$$L' = \frac{\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1}}{\frac{I_2 \cdot \xi_2}{I_1 \cdot \xi_1} - 1} - \frac{1}{\alpha_1}$$

令 $\gamma = \frac{\xi_2}{\xi_1}$, 于是求得少子扩散长度直读法的相对误差为:

$$\frac{L - L'}{L} = \frac{(\gamma - 1) \left(1 + \frac{c}{\alpha_2 d} \right)}{\gamma - 1 + \frac{1 - \alpha_2/\alpha_1}{\frac{\alpha_2 d}{c} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \cdot \gamma} \times 100\% \quad (3)$$

其中 $c = d/L$.

由所选定的两个单色光的波长可以算出硅的吸收系数 α_1 、 α_2 , 求出 $\gamma = \frac{\xi_2}{\xi_1}$, 从而算出两点法直读扩散长度的相对误差.

三、结 果

1. 理论计算结果

样品厚度对少子扩散长度测试的影响完全由 (2) 式的 ξ 值决定. 为了直观起见, 将 (2) 式作成图表的形式, 如图 3 所示. 其中 $c = d/L$, 作为参变量. 横坐标为 αd , 纵坐标即 ξ 值.

对于不同的样品厚度 d , 少子扩散长度 L 以及测试所用单色光的波长 (由此算出吸收系数 α), 可从图上查出 ξ 值, 此值即代表测试点偏离直线的大小, 从而很容易估计测试误差.

采用两点法直读少子扩散长度时, 样品厚度对测试结果带来的误差与所采用的两个波长数值有关. 实际测量时, 测得的为少子表观扩散长度 L' , 它和样品的真实扩散长度 L 、样品厚度 d 以及所用两个单色光波长等量的关系完全由 (3) 式决定. 为了由测得的表观扩散长度 L' 方便地求出真实扩散长度, 我们根据 (3) 式画出一簇曲线如图 4 所示. 图中以 $\alpha_2 d$ 作为参变量, 以 d/L 作为横坐标, L/L' 作为纵坐标. 在绘制该图时,

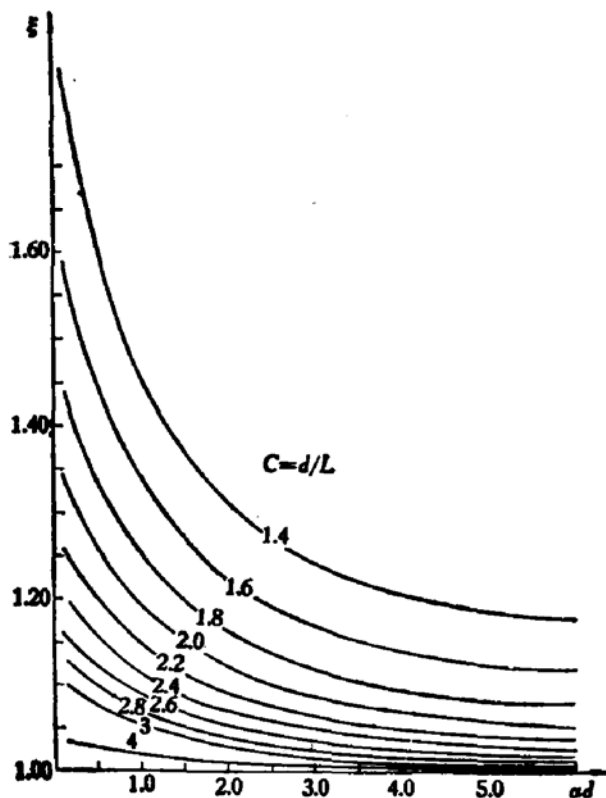


图3 ξ 值与 α 、 d 、 L 的关系

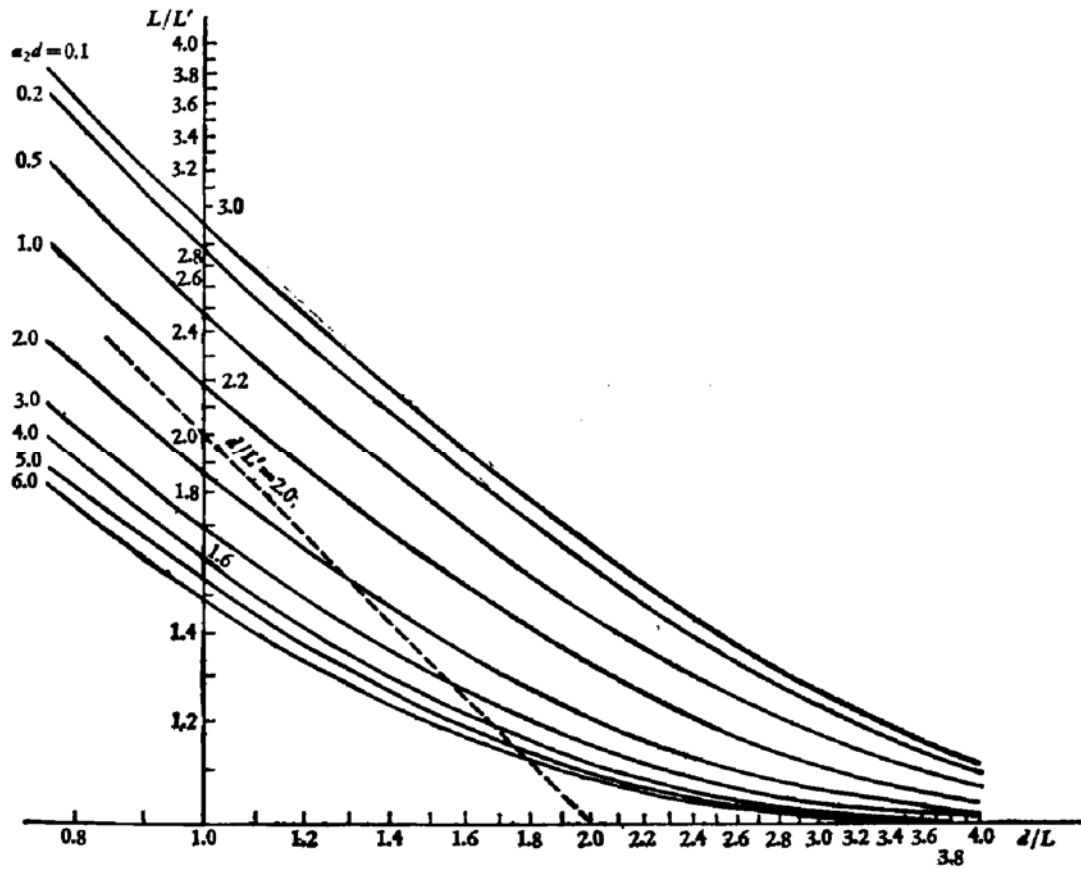


图 4 由样品厚度 d 及表观扩散长度 L' 决定真实扩散长度 L

我们采用的两个单色光波长值为: $\lambda_1 = 0.917 \mu\text{m} \left(\frac{1}{\alpha_1} = 37.7 \mu\text{m} \right)$; $\lambda_2 = 1.025 \mu\text{m} \left(\frac{1}{\alpha_2} = 235.5 \mu\text{m} \right)$, (3) 式中的 $r \left(= \frac{\xi_2}{\xi_1} \right)$ 值从图 3 由相应的点求得。

实际使用时,由样品的厚度 d 便可决定使用图 4 中哪根曲线。另外,由于 $\frac{L}{L'} \cdot \frac{d}{L} = \frac{d}{L'}$ 在双对数图中,该方程为直线,即

$$\lg \frac{L}{L'} = \lg \frac{d}{L'} - \lg \frac{d}{L}.$$

该直线在纵坐标和横坐标的截距都为 $\lg \frac{d}{L'}$ 。因此只需由样品厚度 d 及测得的表观扩散长度 L' 求出 $\frac{d}{L'}$ 值,在纵坐标和横坐标上找出该值,用直线联接这两点,如图 4 中虚线所示。该直线与所选定的曲线相交一点。由其交点的 $\frac{L}{L'}$ 值及测得的 L' 值可定出样品的真实扩散长度 L 。由图 4 可见,样品越厚即样品 d/L' 值越大、 $\alpha_2 d$ 值越大,直线和曲线交点的 $\frac{L}{L'}$ 值越接近于 1,即表观扩散长度越接近真实扩散长度。若样品越薄,即样品的 $\frac{d}{L'}$ 值越小、 $\alpha_2 d$ 值越小,则交点的 $\frac{L}{L'}$ 值越大,即表观扩散长度将大大小于真实扩散长

度,从而引进较大误差。由此可见,用两点法测试薄样品的扩散长度时,由图4很容易将测得的表现扩散长度换算成真实扩散长度。

2. 实验验证

实验装置如文献[2]所示。实验时,在 $0.8\mu\text{m}-1.03\mu\text{m}$ 的波长范围内改变入射光波长,调节光子通量密度,保持样品上光电压讯号不变,由探测器测得不同波长时光子通量密度的相对值,把入射的相对光子通量密度 I 对 α^{-1} 作图,从而验证理论计算结果。实验中所选用的光吸收系数倒数由下式给出

$$\alpha^{-1} = (0.526367 - 1.14425\lambda^{-1} + 0.585368\lambda^{-2} + 0.039958\lambda^{-3})^{-1} \mu\text{m}^{[1]}.$$

图5给出一抛光硅片的 $I-\alpha^{-1}$ 图,图中测试点与直线符合得相当好。该样品厚度为 $300\mu\text{m}$,测得的扩散长度为 $70\mu\text{m}$, $\frac{d}{L} = 4.29$ 。按照图3的理论计算结果,对于所有的 αd 值, ξ 值与1的偏差小于5%,该值处于实验误差范围以内,因此确实应该看不出实验点与直线的明显偏离。

图6为另外两片抛光硅片的 $I-\alpha^{-1}$ 图。在波长较短时,即光的透入深度较小时,实验点仍为一很好的直线,由该直线可以求得少子扩散长度。但在波长较长的部分,即光在样品中的透入深度较大时,实验点明显偏离直线,这是因为不满足 $d \gg L$, $\alpha d > 1$ 所致。这和理论分析一致。从图6中可以求得波长较长时测试点与直线偏离的大小,从而由实验上求得 ξ 值。其实验结果和理论计算结果的比较如图7所示。图中实线为理论计算结果,可以看到实验和理论符合得相当好。

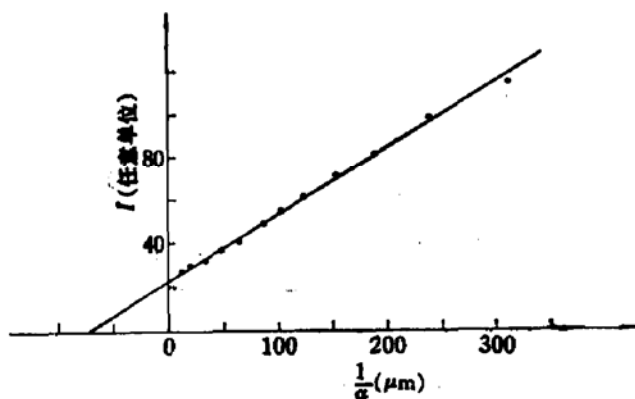


图5 “厚”样品 $I-\alpha^{-1}$ 图

$$d = 300\mu\text{m}, L = 70\mu\text{m}, \frac{d}{L} = 4.29$$

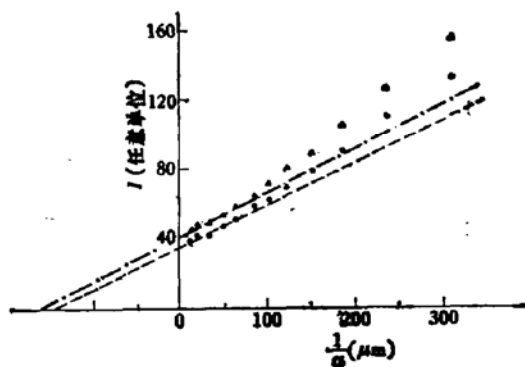
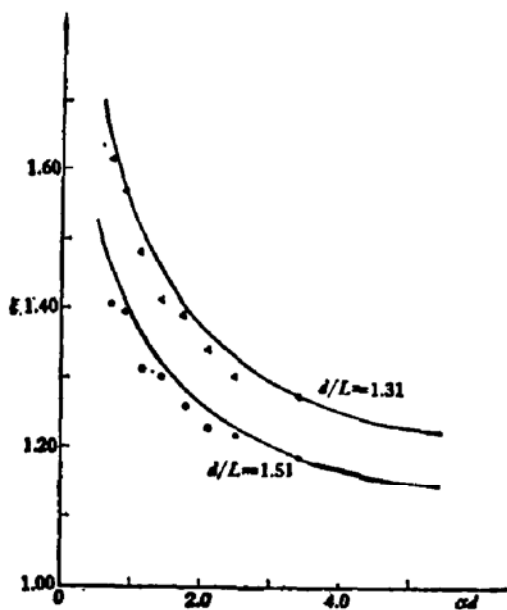


图6 “薄”样品的 $I-\alpha^{-1}$ 图

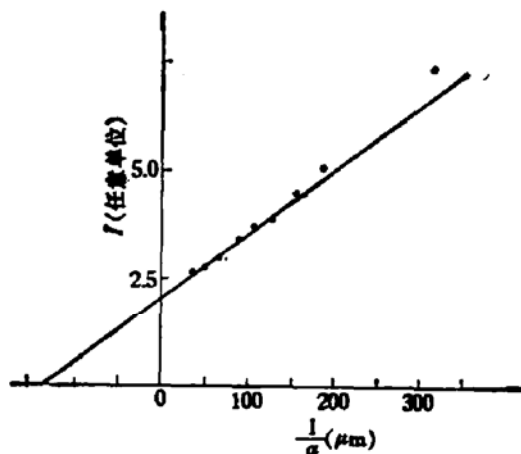
$$\begin{aligned} \triangle & \text{ 1号样品 } d = 215\mu\text{m}, L = 164\mu\text{m}, \frac{d}{L} = 1.31 \\ \bullet & \text{ 2号样品 } d = 220\mu\text{m}, L = 146\mu\text{m}, \frac{d}{L} = 1.51 \end{aligned}$$

图8表示一个硅太阳电池的 $I-\alpha^{-1}$ 图,在波长较长的部分测试点也偏离直线。由该图求得的实验 ξ 值和理论计算结果也基本一致,结果示于图9中。

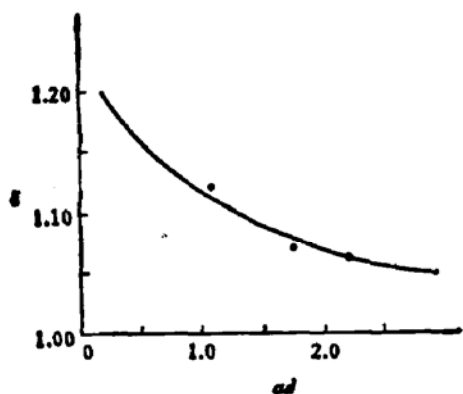
上述实验结果表明,本文所提出的理论分析结果与实验基本符合。因此可用该理论分析结果来分析样品厚度对少子扩散长度测试结果的影响。鉴于两点法的基础仍是通常

图7 “薄”样品实验 ε 值与理论 ε 值的比较

- ▲ 1号样品 $d/L = 1.31$
● 2号样品 $d/L = 1.51$

图8 某一硅太阳能电池 $I-\alpha^{-1}$ 图

$d = 330\mu\text{m}$ $L = 138\mu\text{m}$, $d/L = 2.4$

图9 硅太阳能电池实验 ε 值与理论 ε 值的比较

$d/L = 2.4$

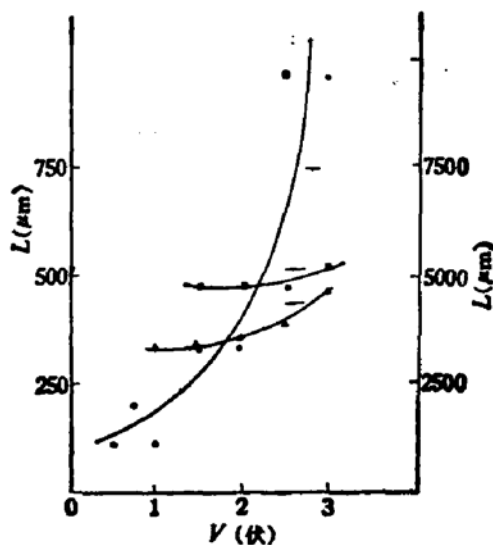


图10 硅单晶少子扩散长度随注入水平的变化

- ▲ N-Si $\rho = 7.9\Omega \cdot \text{cm}$
■ N-Si $\rho = 155\Omega \cdot \text{cm}$
● N-Si $\rho = 185\Omega \cdot \text{cm}$

所采用的直线法,故前面所述的实验验证实际上也证明了两点法理论计算结果的可靠性。对于直读扩散长度的两点法,为了由测得的表观扩散长度 L' 推算出真实扩散长度 L ,图4给出的理论曲线显得更为重要,并且使用方便。

另外,我们采用两块干涉滤光片取代单色仪作为单色光源,使测试比较方便并且可以得到较强的单色光。用该设备采用两点法测量了光生非平衡载流子的注入水平对扩散长度测试结果的影响。测试结果如图10所示。图中纵坐标为用直读法测得的少子扩散长

度, 横坐标波长为 λ_1 时光源电源电压, 它实际上反映了少数载流子的注入水平。由图 10 可见, 随着注入浓度的增加, 测得的扩散长度变长, 并且对于电阻率高的样品, 这种效应更加明显。这些结果表明, 在用表面光电压法测试少子扩散长度时, 对于电阻率高的样品, 仍须考虑注入比对测试结果的影响。

参 考 文 献

- [1] 1981 Annual Book of ASTM Standards, Electronics, Part 43, F 391—78.
- [2] 包宗明、杨恒青、黄淑蓉, 太阳能学报, 2, 81(1981)。

Effect of Sample Thickness on Measurement of Minority Carrier Diffusion Length in SPV Method

Yang Hengqing, Jiang Guoqing, Chen Yujin and Bao Zongming
(Fudan University)

Abstract

In SPV method, if the thickness of sample is comparable with the penetration depth of monochromatic light, the former will effect the measurement of minority carrier diffusion length. A quantitative analysis and experimental examination on this object are reported. Similarly, in the simple SPV method of fast reading minority carrier diffusion length by taking measurements at two wave lengths, the thickness of sample also effects the measurement of diffusion length. A method of finding the real diffusion length from the apparent one is suggested. The effect of non-equilibrium carrier level on the measurement of diffusion length is observed as well.