

# 差分SPV法测量a-Si:H材料少子扩散长度的数学模型

张治国 宿昌厚

(北京工业大学电子工程学系,北京 100022)

**摘要** 用差分 SPV 法测量 a-Si:H 材料的少子扩散长度,可以消除被测样品背面结的影响。本文讨论了这种测量方法的数学模型,导出了测量公式,分析了影响测量结果的各种因素。

**关键词** a-Si:H 材料;差分 SPV 测量;扩散长度

## 一、前言

用表面光电压 (SPV) 法测量氢化非晶硅 (a-Si:H) 材料少子扩散长度时,样品结构大都采用液态或固态肖特基结、PIN 结等。这些结构的背面接触一般很难实现良好的欧姆接触,因而背面结也会产生一定的光生电压。特别是波长较长的时候。若用红偏置光压缩后结,用蓝偏置光压缩前结,则完全能够满足 SPV 法测量的 4 个必要条件<sup>[1-3]</sup>。当探测光的波长较长时,被压缩后的背结势垒仍有可能收集到探测光产生的电信号。该信号的极性与前信号的相反(肖特基结)。探测光波长变化时,背结对前结的影响也随之而变化。因为  $SPV = V_F + V_B$  ( $V_B$  为负)。这将影响测量结果。R. Shwarz<sup>[4]</sup> 等人提出了消除背结影响的差分测量方法,并示出了测量装置图。但他们并没有给出测量原理和数学模型的详细分析和推导。本文的目的就是对这种差分测量方法进行较为深入的分析 and 推导。

## 二、对 S-S 差分测量法的分析

为了简便,我们把 R. Shwarz 和 D.Slobodin<sup>[4]</sup> 提出的差分测量法称为 S-S 法。在 S-S 法中使用了红偏光(第一次测量),红偏光叠加蓝偏光(第二次测量)的偏置光。由于蓝偏光被前表面层吸收,所以在这两种偏置光条件下,背结收集到的探测光信号应该没有变化,即  $V_{B1} = V_{B2}$ , 这里脚标 1 代表红偏光,脚标 2 代表红偏光叠加蓝偏光。这样在两种偏置光条件下分别测量的 SPV 信号之差  $\Delta SPV$  就只留下了前结的贡献,即  $\Delta SPV =$

1992.04.13 收到,1992.10.24 定稿。

张治国 男,1955年生,副教授,现从事半导体器件与微电子技术的工作。现在呼和浩特内蒙古师范大学物理系工作,邮政编码 010022。

宿昌厚 男,1935年生,研究员,现从事半导体物理与器件的研究工作。

$SPV_1 - SPV_2 = (V_{F1} - V_{B1}) - (V_{F2} - V_{B2}) = V_{F1} - V_{F2} = \Delta SPV_F$ , 脚标 **F** 和 **B** 分别代表前后结. 在进行 SPV 测量时, 样品处于开路状态, 可以写出开路电压为

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \cdot \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right)$$

$J_{sc}$  是短路电流密度,  $J_0$  为反向饱和电流密度,  $n$  为品质因子. 当探测光和偏置光照射到样品上时,  $J_{sc} = J_{dc} + J_{ac}$ , 其中  $J_{ac}$  是由探测光和蓝偏光产生的光生电流密度. 于是

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{J_{dc} + J_{ac}}{J_0} + 1\right) \\ &= \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left[\frac{J_{dc}}{J_0} \left(1 + \frac{J_{ac}}{J_{dc}} + \frac{J_0}{J_{dc}}\right)\right] \end{aligned}$$

考虑到  $J_0 \ll J_{dc}$ , 故

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left[\frac{J_{dc}}{J_0} \left(\frac{J_{ac}}{J_{dc}} + 1\right)\right] \\ &= \left(\frac{nkT}{q}\right) \left[\ln\left(\frac{J_{dc}}{J_0}\right) + \ln\left(\frac{J_{ac}}{J_{dc}} + 1\right)\right] \end{aligned}$$

锁相放大器只对交变信号有放大作用, 所以有

$$SPV = V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{J_{ac}}{J_{dc}} + 1\right) \tag{1}$$

因为  $J_{ac} \ll J_{dc}$ , 则 (1) 式可以近似为

$$SPV \approx \left(\frac{nkT}{q}\right) \cdot \frac{J_{ac}}{J_{dc}}$$

这样

$$\Delta SPV = \left(\frac{nkT}{q}\right) \left(\frac{J_{ac}^F}{J_{dc1}^F} - \frac{J_{ac}^F}{J_{dc2}^F}\right) = nkT J_{ac}^F \cdot C_{dc} / q \tag{2}$$

式中  $C_{dc}$  是常数. 可见  $\Delta SPV$  只随  $J_{ac}^F$  而变化, 即  $\Delta SPV$  只取决于前结的光生电流.

其实这种测量模型的精确程度未必就比只进行红偏加蓝偏或者单红偏一次测量时来得高, 原因就是在加了蓝偏光之后仍需要保持  $J_{ac}^F$  不变才能把  $J_{ac}^F$  作为公共因子提到括号外.

但事实在红蓝偏叠加的第二次测量中, 为要保持  $J_{ac}^F$  与单红偏光时一致, 就必须提高探测光的光强, 使其由  $F_{01}$  增加到  $F_{02}$  ( $F_{01}$  和  $F_{02}$  分别是第一次和第二次测量时入射到样品表面的探测光强度). 这是因为加了蓝偏光后前结进一步被压缩, 要保持探测光产生的信号不变, 就必须提高探测光强度. 因为我们知道, 在 a-Si:H 膜内某点  $x$  处的光强为  $F_i = F_{0i}(1 - R)\exp(-\alpha x)$ , ( $i = 1, 2$ ),  $R$  是光的反射率,  $\alpha$  为吸收系数. 可见在  $x$  处 (设  $x$  点处在背结附近的一个扩散长度内或者背结耗尽区以内),  $F_{0i}$  由  $F_{01}$  变为  $F_{02}$ , 使  $F_2$  必然大于  $F_1$ . 这表明背结收集到的光生在电流信号在两种偏置情况下并不相等, 即  $V_{B1} \neq V_{B2}$ . 因此严格来说上述  $\Delta SPV$  表达式不能成立. R. Shwarz 等人虽然给出了 (2) 式, 但在实际测量中并没有采纳上述数学模

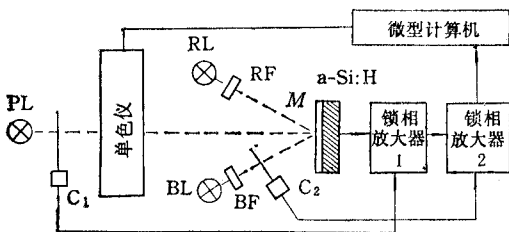


图 1 双锁相差分测量装置示意

型. R. Shwarz 等人虽然给出了 (2) 式, 但在实际测量中并没有采纳上述数学模

型。他们给出了图 1 所示的测试系统原理图。

### 三、双锁相差分方法的数学模型

正如图 1 所示,双锁相差分法实际上是立足于两个锁相放大器串联工作原理,采用调制-解调-再解调的双重滤波技术,对前后结的 SPV 信号进行分离。可以证明这种测量方法能够有效地消除背结对测量结果的影响。图 1 中的 RF, BF 分别为红色和蓝色滤光片, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 是两个光斩波器,对探测光和蓝偏置进行调制,斩波频率分别是  $\omega_1$  和  $\omega_2$ 。探测光由单色仪给出。总的光生电流为

$$J_{sc} = J_{dc} + J_1(\omega_1) + J_2(\omega_2) \quad (3)$$

$J_1(\omega_1)$  和  $J_2(\omega_2)$  分别是单色探测光和蓝偏置光产生的光生电流。蓝偏光波长短,只能入射到很浅的距离,对背结无影响。由于锁相放大器只对脉动交变信号有响应,故其脉动电流为

$$J_{ac} = J_1(\omega_1) + J_2(\omega_2) \ll J_{dc} \quad (4)$$

把该式代入理想肖特基结光生电压表达式,则所测量到的 SPV 信号可表示为

$$\text{SPV} = (nkT/q) \ln [(J_1(\omega_1) + J_2(\omega_2))/J_{dc} + 1] \quad (5)$$

基于(4)式的条件,把(5)式展开为级数,能更清楚地显示其物理意义。为保证足够的精确度,又不至太繁杂,将(5)式展开并保留到二次项:

$$\text{SPV} = \frac{nkT}{q} \left[ \frac{J_1(\omega_1) + J_2(\omega_2)}{J_{dc}} - \frac{J_1^2(\omega_1) + J_2^2(\omega_2)}{2J_{dc}^2} - \frac{J_1(\omega_1)J_2(\omega_2)}{J_{dc}^2} \right] \quad (6)$$

设交变分量按下列规律变化

$$J_1(\omega_1) = J_1 \cos \omega_1 t, \quad J_2(\omega_2) = J_2 \cos \omega_2 t$$

(6) 式可以写成

$$\text{SPV} = \frac{nkT}{q} \cdot \left[ \frac{J_1 \cos \omega_1 t + J_2 \cos \omega_2 t}{J_{dc}} - \frac{J_1^2 \cos^2 \omega_1 t + J_2^2 \cos^2 \omega_2 t}{2J_{dc}^2} - \frac{J_1 \cos \omega_1 t \cdot J_2 \cos \omega_2 t}{J_{dc}^2} \right]$$

进一步化简可展现出 SPV 信号中的频谱成份:

$$\text{SPV} = \frac{nkT}{q} \left\{ \frac{J_1 \cos \omega_1 t + J_2 \cos \omega_2 t}{J_{dc}} - \frac{J_1^2 + J_2^2}{4J_{dc}^2} - \frac{J_1^2 \cos 2\omega_1 t}{4J_{dc}^2} - \frac{J_2^2 \cos 2\omega_2 t}{4J_{dc}^2} - \frac{J_1 J_2}{2J_{dc}^2} [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] \right\} \quad (7)$$

可见 SPV 信号中的主要频谱有:探测光的基波  $\omega_1$ , 倍频波  $2\omega_1$ , 蓝偏光的基波  $\omega_2$ , 倍频波  $2\omega_2$ , 探测光与蓝偏光的和频波  $(\omega_1 + \omega_2)$  和差频波  $(\omega_1 - \omega_2)$  以及直流信号等。对于前结而言,(7)式中的全部分量构成了它的 SPV 信号;而对背结来说,如前所述,  $J_2$  信号对它无影响,可以取  $J_2 = 0$ ,所以背结的 SPV 信号为(加注脚标 B 以资区别)

$$\text{SPV}_B = \frac{nkT}{q} \left[ \frac{J_{1B} \cos \omega_1 t}{J_{dcB}} - \frac{J_{1B}^2}{4J_{dcB}^2} - \frac{J_{1B}^2 \cos 2\omega_1 t}{4J_{dcB}^2} \right] \quad (8)$$

整个被测样品前后结的合成信号应该是

$$SPV_0 = SPV - SPV_B \quad (9)$$

对于第一级锁相放大器起作用的只是  $SPV_0$  中的交变成份, 亦即第一级的输入电压信号为

$$SPV_{01} = \frac{nkT}{q} \left[ \frac{J_1 \cos \omega_1 t}{J_{dc}} + \frac{J_2 \cos \omega_2 t}{J_{dc}} - \frac{J_1^2}{4J_{dc}^2} \cos 2\omega_1 t \right. \\ \left. - \frac{J_2^2}{4J_{dc}^2} \cos 2\omega_2 t - \frac{J_1 J_2}{2J_{dc}^2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t - \frac{J_1 J_2}{2J_{dc}^2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t \right. \\ \left. - \frac{J_{1B} \cos \omega_1 t}{J_{dcB}} + \frac{J_{1B}^2}{4J_{dcB}^2} \cos 2\omega_1 t \right] \quad (10)$$

根据锁相放大器工作原理, 第一级锁相放大器输出应当是输入电压与参考电压  $\tilde{V}_{ref1}$  之乘积

$$V_{1sc} = SPV_{01} \cdot \tilde{V}_{ref1} \quad (11)$$

设参考电压信号  $\tilde{V}_{ref1}$  也是正弦波

$$\tilde{V}_{ref1} = V_{10} \cos(\omega_1 + \Delta\omega_1)t \quad (12)$$

选择适当的低通滤波器的时间常数, 第一级锁相放大器的输出为

$$V_{1sc} = \frac{nkTV_{10}}{q} \left[ \frac{J_1}{2J_{dc}} \cos \Delta\omega_1 t + \frac{J_2}{8J_{dc}^2} \cos(\omega_1 - \Delta\omega_1)t \right. \\ \left. - \frac{J_1 J_2}{4J_{dc}^2} \cos(\omega_2 - \Delta\omega_1)t - \frac{J_1 J_2}{4J_{dc}^2} \cos[-(\omega_2 + \Delta\omega_1)t] \right. \\ \left. - \frac{J_{1B}}{2J_{dcB}} \cos \Delta\omega_1 t + \frac{J_{1B}^2}{8J_{dc}^2} \cos(\omega_1 - \Delta\omega_1)t \right] \quad (13)$$

一般情况下  $\Delta\omega_1 = 0$ , 第一项与第五项可看作直流信号而被剔除后, 就得到了第二级锁相放大器的输入信号, 而第二级的输出信号应该是  $V_{1sc}$  与第二级锁相放大器参考信号  $\tilde{V}_{ref2}$  之乘积。设

$$\tilde{V}_{ref2} = V_{20} \cos(\omega_2 + \Delta\omega_2)t$$

第二级锁相放大器输出为

$$V_{2sc} = V_{1sc} \cdot \tilde{V}_{ref2} = SPV_{01} \cdot \tilde{V}_{ref1} \cdot \tilde{V}_{ref2} \quad (14)$$

结果得到

$$V_{2sc} = \frac{nkT}{q} V_{10} \cdot V_{20} \left[ -\frac{J_1 J_2}{4J_{dc}^2} \cos(\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1)t \right. \\ \left. - \frac{J_1 J_2}{8J_{dc}^2} \cos 2\Delta\omega_1 t - \frac{J_1 J_2}{8J_{dc}^2} \cos(\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2)t \right] \quad (15)$$

同理  $\Delta\omega_2 \approx 0$ , 故  $\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1 \approx 0$ ,  $\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2 \approx 0$  (对于良好的光斩波器来说这些都是正确的)。 (15) 式可以写成

$$V_{2sc} = (nkT/q) \cdot V_{10} \cdot V_{20} \cdot [-J_1 J_2 / 2J_{dc}^2] = \Delta SPV \quad (16)$$

(16) 式就是双锁相 SPV 法差分工作模式的数学表达式。注意, 该式中没有带角标 B 的因子, 这表明这种技术已经把背结的影响消除了。由该式可知, 我们所得到的结果只与探测光和蓝偏光在前结产生的电流成正比。与红偏光产生的电流平方成反比。式中的负号则表示  $J_1$  电流方向与  $x$  轴相反, 实际测量过程中可以用锁相放大器的倒向开关去掉。(16) 式还可以写成

$$J_1 = 2\Delta\text{SPV} \cdot q \cdot J_{sc}^2 / (nkT \cdot V_{10} \cdot V_{20} \cdot J_2) \quad (17)$$

这就是探测光在前结上形成的光生电流的表达式。可以证明<sup>[4]</sup>, 照射在前结势垒上的光强  $F$  与探测光光生电流  $J_1$ 、少子扩散长度  $L_p$  和材料的吸收系数  $\alpha$  之间的关系为

$$F = (1/qL_p) \cdot J_1(L_p + \alpha^{-1}) \quad (18)$$

把(17)式代入(18)式,得到

$$\frac{F}{\Delta\text{SPV}} = \frac{2J_{sc}^2}{nkTV_{10} \cdot V_{20}L_p \cdot J_2} (L_p + \alpha^{-1}) \quad (19)$$

这就是双锁相 SPV 差分测量法的数学模型。由于测量时保持  $\Delta\text{SPV}$  不变, 上式可写成

$$F = K(L_p + \alpha^{-1}) \quad (19a)$$

$K$  为斜率, 是常数。可见  $F$  与  $\alpha^{-1}$  之间呈线性关系。做  $F \sim \alpha^{-1}$  关系图并令  $F = 0$ , 可得到扩散长度  $L_p = -\alpha^{-1}$ 。

#### 四、测量结果和比较

图 2 是用图 1 所示装置所得差分法的测量结果。图 3 是采用单锁相放大器的测量结果(装置图从略)。从图 2, 图 3 中可以看出, 它们的  $L_p$  值是相同的, 所不同的是图 3 中直线的下端出现了一个翘勾。这是因为当探测光波长长于 700nm 时(对应的  $\alpha^{-1}$  约为  $0.5 \mu\text{m}$ ), 背结和前结处的光强之比接近于 1,  $\Delta\text{SPV} = V_F + V_B$  ( $V_B$  为负) 急剧减小,  $F/\Delta\text{SPV}$  随之增大, 出现了前面的翘勾。从差分测量的结果来看并没有出现翘勾。这充分体现了差分测量可以消除背结影响的优点。这也证明了本文导出的差分测量数学模型是正确的。

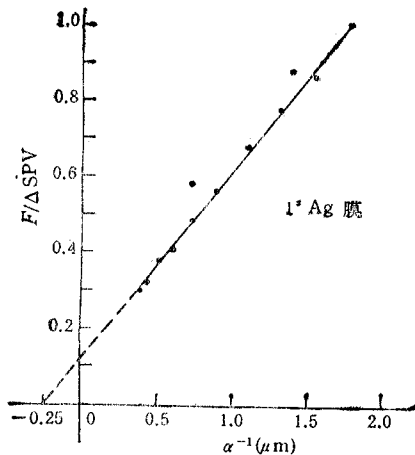


图 2 1\* 样品差分测量曲线

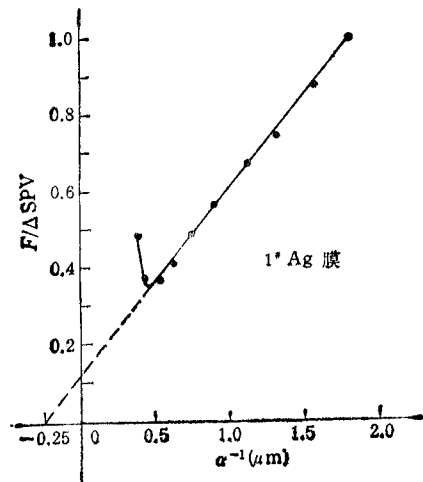


图 3 1\* 样品单锁相法测量曲线

#### 五、讨 论

观察(19)和(19a)两式发现, 斜率  $K$  与红偏光光生电流  $J_{sc}$  成正比。这就是说红

偏光的轻微波动能灵敏地改变直线的斜率。红偏光光源的电源不稳定将导致  $J_{dc}$  的不稳定,使测试数据偏离直线,或者使采集数据困难。若偏置光电源在某个值附近随机波动,则所测数据也在直线两侧随机波动。如果这个电源随时间缓慢上升或下降,则这种变化也会严重影响测试结果的准确度。蓝偏光电源的稳定度也有类似影响,只不过其影响比红偏光弱得多。因为它在斜率  $K$  中是一次方的关系而且其偏光强度也比红偏光弱得多(红偏光强度为  $2.55\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;蓝偏光强度仅为  $0.29\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),相比之下显得不十分重要。另外,保持测试环境的温度  $T$  尽可能稳定也是十分重要的。这在我们的实际测量中有很深的体会,因此提高测量设备中偏光电源的性能是改进测量精度的一个方向。

### 参 考 文 献

- [1] A.R. Moore, *J. Appl. Phys.* **56**(1984)10, 2796—2802.
- [2] A.R. Moore, *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 1, 222—228.
- [3] I. Sakata, *J. Appl. Phys.* **61** (1987)5, 1916—1927.
- [4] R. Schwarz, D. Slobodin, *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985)7, 740—747.
- [5] 张治国, 金属-非晶硅 Schottky 结的形成及其用于 SPV 法少数扩散长度的测量暨非晶硅中电子态的研究, 京北工业大学电子工程系硕士论文,北京,1991年.

## THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DIFFERENTIAL SPV TECHNIQUE FOR MEASURING MINORITY CARRIER DIFFUSION LENGTH OF a-Si:H FILM

Zhang Zhiguo Su Changhou

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract** The differential measuring mode for minority carrier diffusion length of a-Si:H film by SPV technique can eliminate the influence of back junction of the sample. This paper analyses mathematical model of such mode, deduces formula for practical use, and discusses various elements which affect the measured results.

**Key words** a-Si:H material; Differential SPV measurement; Diffusion length