

2009年第五届中国太阳级硅及光伏发电 研讨会 (5th CSPV)

多晶硅的质量检验

及若干问题的探讨

主讲人 王世进 总工

目 录

- 一、多晶硅的结构与晶界效应
- 二、电阻率及补偿度的测量
- 三、单晶硅的少子寿命测量
- 四、样品制备与热处理

一、多晶硅的结构与晶界效应

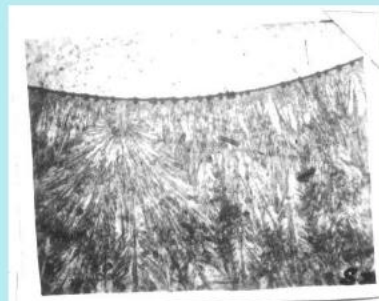
1、多晶硅的结构

三氯氢硅法及硅烷法生长的多晶硅横截面放大照



×2

照片1 三氯氢硅多晶棒
横截面的晶粒分布照



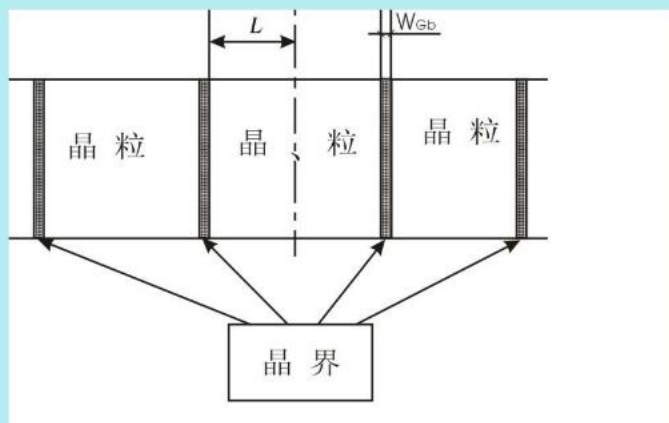
×100

照片2 硅烷多晶沿硅芯
生长的显微照

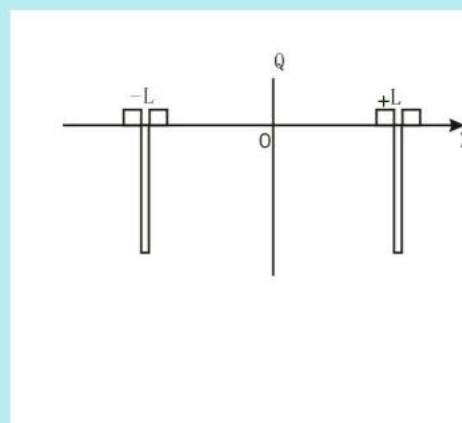
从以上照片可以看出三氯氢硅多晶的晶粒较大，有的晶粒尺寸达“毫米”数量级，硅烷多晶的晶粒呈“羽绒状，晶粒大小仅有“亚微米——数十微米”。

多晶就是由这些结晶方向不一，外形不规则的小晶粒组成。每个小晶粒内的原子按周期排列，构成单晶，两个晶粒交界区的情况比较复杂。

2、晶粒间界及晶界效应

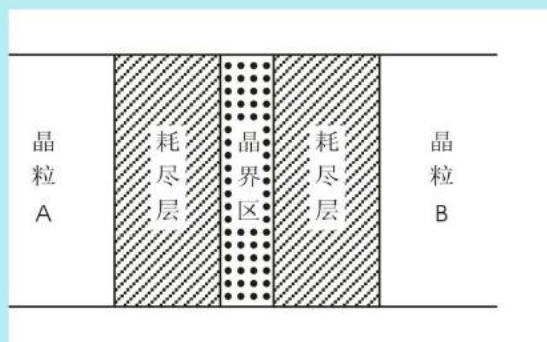


(a) 晶粒之间的界面

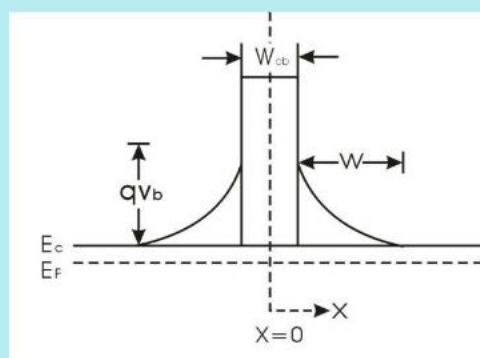


(b) 电荷分布

因为晶粒内整齐排列的原子键到了晶粒与晶界区的交界处，即中断或产生严重变形，形成许多交迭悬挂键和键形变，与这些残缺键相接的又是若干层无序排列的硅原子。在这样的晶界区内，无疑会存在着高密度的缺陷，在缺陷附近形成一种易于捕获载流子的能量状态——陷阱态。一旦它们捕获了晶粒内的载流子，处于荷电状态，便在两个晶粒之间形成一个势垒区。（以下均针对N型多晶硅讨论），如图上所示。



(a) 晶粒内侧的耗尽层



(b) 空间电荷区的电势分布

图2

晶界两侧的晶粒中，由于载流子被陷阱捕获，产生一个有相当厚度的空间电荷区，空间电荷区的电势变化可根据泊松方程：

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN}{\varepsilon} \quad \text{其解为：} \quad V(x) = \frac{qN}{2\varepsilon} \left[\left(W + \frac{W_{Gb}}{2} \right) - |x| \right]^2$$

多晶是由大量的小晶粒组成，也就是一块不大的多晶中就存在数量众多的晶界和势垒，载流子要在多晶中运动就非常困难，往往是晶粒的电阻率并不高，而晶界电阻却要高上几十倍甚至几千倍。



因此不消除晶界的影响就无法准确测量电阻率、少子寿命、型号以及磷、硼含量，国内或国外评价多晶硅质量的标准方法都要先把多晶硅用区熔法生长成单晶后才能测量。

例如：

国标：GB/T 4059 - 1983 硅多晶气态区熔磷检验方法

GB/T 4060 - 1983 硅多晶真空区熔基硼检验方法

送审稿： 低温傅立叶变换红外光谱法测量硅单晶中值V族杂质含量的标准方法
(2008年南京会议通过)

国际：SEMI MF1723 -1104 (2004年版本)

标准 PRACTICE FOR EVALUATION OF POLYCRYSTALLINE SILICON RODS
BY FLOAT-ZONE CRYSTAL GROWTH AND SPECTROSCOPY)

(通过区熔晶体生长及光谱鉴定多晶硅棒的方法)

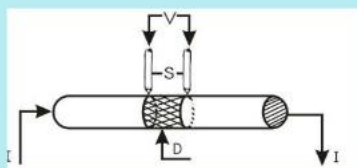
无论是我国标准还是国际标准中都规定：要鉴定多晶硅的质量，首先要对多晶硅钻取样棒，然后将样棒放入区熔炉生长成单晶，彻底消除晶界对测量带来的干扰，才能取得比较真实的结果。

3、用二探针法测量基磷电阻率及基硼电阻率

在GB/T 4059及GB/T4060中都明确规定检验棒的纵向电阻率的测试均采用GB 1551-76《硅单晶电阻率直流二探针测量方法》测试。从第一熔区起到检磷棒长约80%处的电阻率为未扣除基硼补偿的检磷电阻率值。从第一熔区起到检硼棒长的60%的电阻率为硅多晶的基硼电阻率值。国际标准：SEMI MF 43、MF397同样也推荐二探针法为验收硅材料的方法。

为什么检验棒的电阻率要用二探针而不用四探针法测量呢？这里要说明一下二种方法的区分。

直流二探针法与四探针法测量电阻率的区别



$$\rho = \frac{V A}{I S} = \frac{V \pi D^2}{4 I S}$$

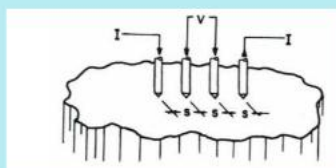
二探针测硅棒

SEMI MF43-0705、SEMI

MF397-02推荐的材料验收检测方法。

计算公式由电阻率定义及欧姆定律推演产生，经典可靠。修正因素及副效应少，测量的是二探针之间区段的平均电阻率，更能反应体内的情况。

早期的设备要求在棒两端电镀、涂导电浆料、超声焊接做电极，广州市昆德科技有限公司采用了弹性导电材料做电接触，免除了做电极的麻烦，减少了对样品的污染。

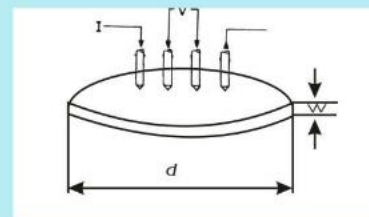


$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I}$$

四探针测硅单晶

SEMI MF43-075、GBT-1552认定的硅单晶电阻率标准测试方法。

计算公式由两源的拉普拉斯方程解出，求解偏微分方程的边介条件是半无限大的介质，实际使用时要求任一探针与边介的距离要大于4S，否则误差会大于5%，因此不用于细圆棒的纵向电阻率测量，而适用于测量大直径单晶的横断面电阻率。它测量的是四探针接触区的局部电阻率。标准中明确指出四探针测量法不推荐用来测量多晶材料的电阻率。



$$\rho = \frac{V}{I} W F \left(\frac{w}{S} \right) F \left(\frac{S}{D} \right)$$

四探针测硅片

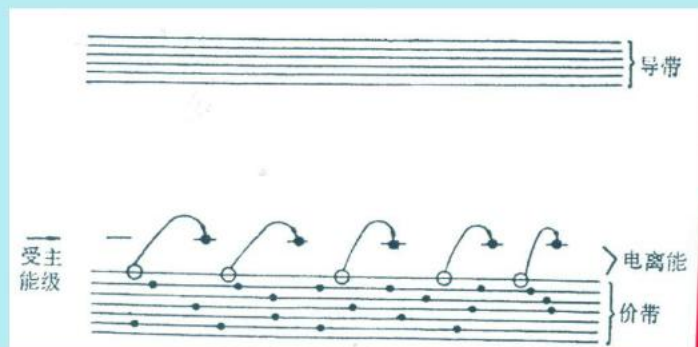
SEMI MF86-01、SEMI MF84-02

认定的硅片电阻率测试方法。

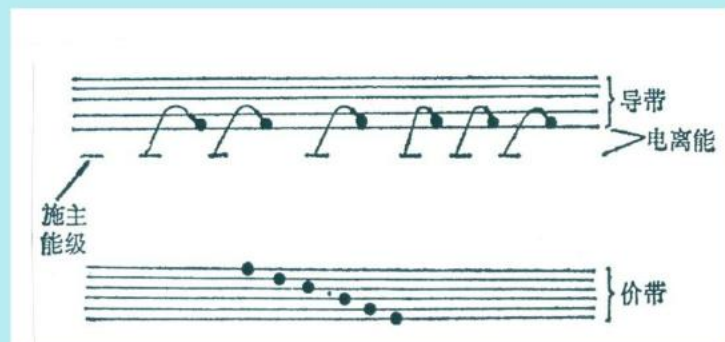
针对硅片厚度的不等以及测点与硅片边介距离的不同，精确地计算出了厚度修正因子 $F(w/S)$ 和直径修正因子 $F(S/D)$ ，使测试结果准确可靠，因此无接触测量仪器以及扩展电阻设备所需的标准样片都是由四探针法测量标定。这是国内外公认的最准确的硅片测量电阻率的方法。同样也是测量探针压触区的电阻率，因此可以测量电阻率的均匀性。

二、多晶硅的基磷电阻率及补偿度

1、硅单晶中的Ⅲ、Ⅴ族杂质



(a) Ⅲ价杂质的受主能级



(b) Ⅴ价杂质的施主能级

图3

Ⅲ价杂质 (B、Al、Ga、In) 在硅中形成受主能级 (图3a)，满带的电子跃迁到受主能级上便产生了空穴。Ⅴ价杂质 (P、As、Sb) 在硅导带下面形成施主能级，施主上的电子跃迁到导带上形成可以导电的电子。在硅晶体中杂质浓度不超过 10^{17} 原子/cm³ 时，掺杂浓度和载流子浓度在数值上是相等的。以N硅为例，载流子浓度 n 等于掺杂浓度 N_D : $n=N_D$



2、电阻率与杂质浓度的关系

电阻率和载流子浓度的基本理论公式（以N硅为例）是：
$$\rho = \frac{1}{ne\mu_n} = \frac{1}{N_D e \mu_n}$$

e — 电子电荷， 1.6×10^{-19} 库仑； μ_n — 电子迁移率， $1200 \sim 1400 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$ ； N_D —施主杂质浓度。

由于理论计算难以包纳很多实际需要修正的所有情况，因此实际使用时，是用实验方法确定电阻率和掺杂浓度的关系，这就是 MF-723 “掺硼和掺磷硅单晶电阻率和掺杂浓度换算的校准规程”。

我们可以比较一下（以掺磷N型硅为例）。

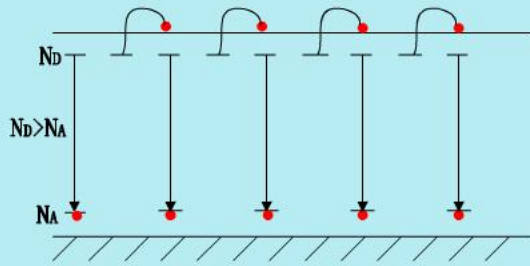
理论计算和实验换算得出结果的比较

电阻率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)	实验换算 (MF-723) (cm^{-3})	理论计算 (cm^{-3})	μ_n 取值 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$)
0.523	1.0×10^{16}	9.96×10^{15}	1200
1.02	4.8×10^{15}	4.7×10^{15}	1300
5.07	8.8×10^{14}	8.8×10^{14}	1400
10.2	4.3×10^{14}	4.37×10^{14}	1400
50.4	8.5×10^{13}	8.8×10^{13}	1400
102	4.2×10^{13}	4.37×10^{13}	1400
500	8.5×10^{12}	8.9×10^{12}	1400

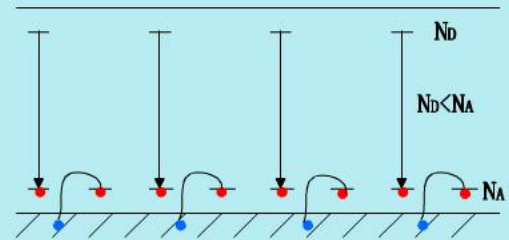
从上表可以看出：理论计算与实验数据还是很接近（不超过5%），只不过以实验数据为基础进行换算要比理论计算容易得多，上述实验数据主要是由Thurber等人用电容、电压法测定出的掺杂剂浓度。

3、补偿材料

以上计算公式和实验换算都有一个前题，即硅单晶是非补偿的，发生明显补偿的样品就不适用了，什么叫补偿呢？当半导体中同时存在施主和受主两种杂质元素时则产生补偿（Compensated），如下图所示：



N型补偿半导体



P型补偿半导体

以N型为例，图上9个V价杂质（例如：磷原子），其中5个原子未形成共价键的电子没有跃迁到导带，而落到能量位置低的III价受主杂质能级上，只有4个磷原子的电子跃迁到导带。此时为电导率做贡献的电子：

$$n \neq N_D \quad n = N_D - N_A$$

在补偿半导体中测出的电阻率并不代表 N_D ，而是代表 $N_D - N_A$ ，因此电阻率的公式变成：

$$\rho = \frac{1}{(N_D - N_A)e\mu_n}$$

国标GB/T 4059“硅多晶气纷区熔磷检验方法”中所表述的检磷电阻率值前面有一个重要的定语：“未扣除基硼补偿的”。完整的说法是：“取从第一熔区起到检验棒长的80%处的电阻率值为未扣除基硼补偿的检磷电阻率值”。

目前用作太阳能电池的多晶硅，一般都是补偿半导体材料。磷、硼含量常常在同一数量级，补偿程度比较大。

按检验棒80%处的电阻率通过理论推算或查经验换算表得到的都不代表磷含量，而是磷被硼补偿后的差值： $N_D - N_A$

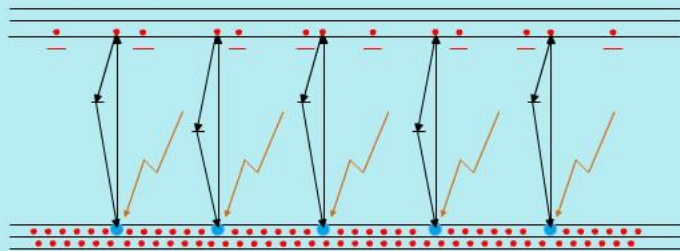
要真正知道磷含量 N_D ，必须知道检磷棒中的硼含量 N_A ，只有对 $(N_D - N_A)$ 加上（扣除） N_A 才是真正的磷含量 N_D ： $(N_D - N_A) + N_A = N_D$

这个硼含量 N_A 可以通过低温红外傅立叶变换光谱测出，也可以通过液氮温度下的霍尔效应或磁阻效应测出，还有一个途径就是“硅多晶真空区熔基硼检验方法”。真空区熔法的难点不仅仅是要做十几次真空区熔，而且检硼棒中的磷未必能完全挥发。建议未购进低温红外傅立叶变换光谱仪的单位，可用成本较低的液氮霍尔法 / 磁阻法测量 N_A 。

只有向使用多晶的用户，确切地报出真正的磷含量，而不是未扣除基硼的磷含量（ $N_D - N_A$ ），才能使单晶厂在拉制单晶时前投入适量的掺杂剂，生长出达到目标电阻率的硅单晶。

1、少子寿命的概念

我国著名的科学家黄昆和谢希德老师在“半导体物理学”一书中是这样表述寿命的概念。“n型半导体在一般平衡的情况下只有极少数空穴，因此我们称它为少数载流子，同样，在p型半导体中，电子就是少数载流子。在外来作用下，有可能增加（或减少）半导体中少数载流子的数目，例如：光照把满带中的一些电子激发到导带中去，就造成这种情况”。



这种比平衡情况多余出来的少数载流子（非平衡载流子）在光照消失后，由于半导体内部存在由重金属杂质形成的深能级起到复合中心的作用，通过复合中心不断地和多数载流子复合，数目逐渐减少，非平衡载流子的数目指数地随时间衰减。

$$\Delta P \text{ (或 } \Delta n) \propto e^{-t/\tau}$$

常数 τ 标志非平衡载流子平均存在时间，称为寿命。上述定义具有体寿命的含意。半导体内的杂质（或缺陷）除上述能起促进复合作用之外，还有另一种杂质（或缺陷）对非平衡少子起收容的作用，就是所谓的陷阱效应，延长了非平衡少子的存在时间，使测量出的寿命是虚假的数字。

2、体寿命与表面复合寿命

除了体内的重金属杂质会产生复合中心，单晶表面缺陷也会起到复合中心的作用，因此非平衡少子寿命测量值不仅取决于体内重金属杂质数量也与表面缺陷数量有关。

表面复合用表面复合速度S来表示：单位表面复合率= $S \Delta P$ ΔP ——非平衡少子（空穴）在表面的浓度

对不同硅表面，表面复合速度相差很大，SEMI MF 1535 标准中给出的最佳酸腐蚀表面，表面复合速度很低 $S=0.25\text{cm/s}$ ，最差的表面（研磨面）复合速度 $S \approx 10^7 \text{ cm/s}$ （饱和速度），二者相差八个数量级。

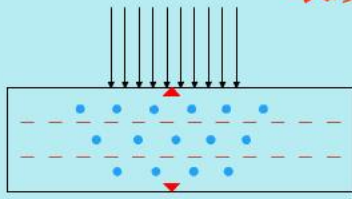
然而酸腐蚀后的低复合速度是不稳定的，在空气中存放，复合速度会很快升高，因此还要对表面做钝化处理。我们平时用寿命仪测出的寿命习惯称为表观寿命 τ_p ，实际上大家最关心的是体寿命 τ_b （由体内重金属杂质浓度决定其大小），但是由于光生非平衡少子会不断流向表面，并在表面复合，因此MF1535标准中又引入一个表面复合寿命 τ_s (Surface recombination lifetime)

概念 $\tau_s = \tau_{diff} + \tau_{sp} = L^2 / \pi^2 D + L / 2s$

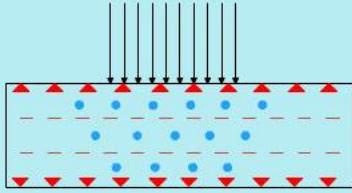
L — 硅片厚度 S — 表面复合速度 (cm/s) D — 少子扩散系数 电子为： $D_n = 33.5 \text{ cm}^2/\text{s}$

空穴为： $D_p = 12.4 \text{ cm}^2/\text{s}$

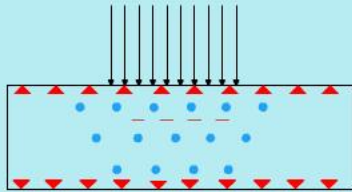
τ_s 、 τ_b 、 τ_p 三者之间的关系见下页：



$\tau_s > 10\tau_B$
 $\tau_s \approx \tau_B$
 (a)



$\tau_s = \tau_B$
 $\tau_F = \tau_B/2$
 (b)



$\tau_B > 10\tau_s$
 $\tau_F \approx \tau_s$
 (c)

$$1/\tau_F = 1/\tau_B + 1/\tau_s$$

τ_F —表观寿命，在寿命测试仪显示屏上读出的寿命值，它是体复合和表面复合的综合结果。

τ_B —单晶体寿命，取决于在硅中形成复合中心的重金属杂质数量多少，是评价单晶质量的基本参数。

τ_s —表面复合寿命，取决于表面复合率与表面缺陷密度相关，它由两项构成：

$$\tau_s = \tau_{diff} + \tau_{sp} = L^2 / \pi^2 D + L/2s$$

τ_{diff} —少子扩散到表面引起， τ_{sp} —表面复合引起

测试硅片与测块状单晶不一样，由于硅片较薄，体表比较小，正、背两个表面的复合中心均起很大作用，我们分三种情况讨论：

(a) 在 $\tau_s > 10\tau_B$ 时，非平衡少子主要被体内重金属杂质能级复合，可从10%精度测出 τ_B 。这种情况一般发生在表面经抛光钝化，表面复合速度很低。

(b) 当不满足上述条件时，只要 τ_B 与 τ_s 相差不要太悬殊仍可检测出体寿命的相对变化。

(c) 测出寿命 τ_F 值实际上只是表面复合寿命，对判定单晶质量毫无意义。

但是由于生产中用研磨（切割）片直接测量特别方便，因此我们也计算出研磨片厚与可测体寿命的关系表，见下页。



研磨（切割）硅片可测准最大体寿命与厚度关系表

研磨切割片厚度 (mm)	型号	可准确测量的最大体寿命 τ_B (μs)	测量体寿命 τ_B 的相对变化 (μs)	表面复合寿命 τ_S (μs)
0.15	N	0.18	0.18-18(180)	1.8
	P	0.068	0.068-6.8(68)	0.68
0.18	N	0.26	0.26-26(260)	2.6
	P	0.098	0.098-9.8(98)	0.98
0.50	N	2	2-200	20
	P	0.76	0.76-76	7.6
1.00	N	8.2	8.2-820	82
	P	3	3-300	30
2.00	N	32.7	32.7-3270	327
	P	12.1	12.1-1210	121
3.00	N	73.5	73.5-7350	735
	P	27.2	27.2-2720	272

注：上表根据SEMI MF 1535-0707提供的数据及公式计算，设研磨、切割片表面复合速度 $s \approx 10^7 \text{cm/秒}$ ， $\tau_S \approx L^2 / \pi^2 D$ 。N型硅片， $D_p = 12.4 \text{cm}^2/\text{s}$ ；P型硅片， $D_n = 33.5 \text{cm}^2/\text{s}$ 。测准条件： $\tau_S > 10 \tau_B$ ，精度10%； $\tau_B > 10 \tau_S$ 时，在 τ_B 的第二位有效数字上会有变化； $\tau_B > 100 \tau_S$ 时， τ_B 第三位有效数字有变化。

3、高频光电导寿命测试与微波光电导寿命测试

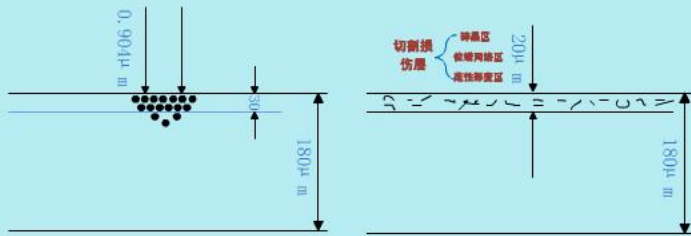
目前我国使用的寿命仪基本上有两种，一是国内已使用了二十多年的高频光电导寿命仪，另一种是近几年来国外引进的微波光电导寿命仪，这两种寿命仪用的都是光电导衰退法，前者是hfPCD、后者是 μ PCD。两者之间的差别如下表：

(以广州市昆德科技有限公司的LT-1D型与匈牙利Semilab Rt.WT-1000型为例)

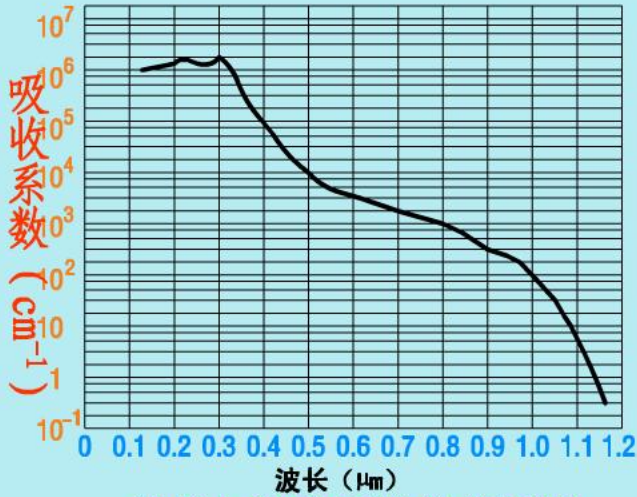
(设备) 参数	方法	hfPCD(LT-1D)	μ PCD(WT-1000)
光源波长		1.07 μ m	0.904 μ m (904nm)
光在硅单晶中的贯穿深度		$\approx 500 \mu$ m	$\approx 30 \mu$ m
寿命可测范围		1 μ s $\sim > 6$ ms	0.25 μ s $\sim > 1$ ms
工作频率		30MHz	10GHz
电阻率下限		0.01 $\Omega \cdot$ cm	0.1 $\Omega \cdot$ cm
读数方式		用示波器读数	通过数据处理软件由电脑读数
校核方法		配0.7、1mm校核片，偏差 $\leq \pm 10\%$	

我们在这里关注一下光的贯穿深度，因为它与寿命测量时受表面复合干扰的程度有很大关系。根据光吸收公式： $I = I_0 e^{-\alpha x}$

α ——光在硅单晶中的吸收系数，X为光进入深度，光进入单晶表面时的强度为 I_0 ，随着深度的增加，光强度下降，当光强 I_0 下降到 I_0/e 时的深度叫贯穿深度。



0.9 μm波长的贯穿深度



波长与吸收系数的关系图

波长 (μm)	0.50	0.90	0.904	1.0	1.07	1.10	1.16
吸收系数 (cm ⁻¹)	1×10 ⁴	4.1×10 ²	4×10 ²	1.3×10 ²	2.0×10 ¹	6.0	4×10 ⁻¹
贯穿深度 (μm)	1.0	24	≈30	77	500	1667	25×10 ³

光波长与贯穿深度的关系

根据吸收系数 α 与波长 λ 之间的关系曲线，我们可计算出不同波长光的贯穿深度。

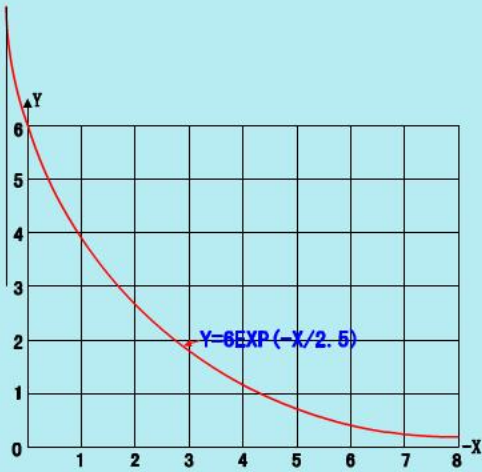
在测量硅单晶块体寿命的MF28标准中，规定光源的波长为：1.0—1.1 μm。

在测量硅片寿命的MF1535标准中，规定光源的波长为：0.9—1.1 μm。

测量硅片可以用较短的波长，因为硅片比较薄。光的贯穿深度可得做得浅些。

切割后的硅片表面会有机械损伤层，包括碎晶区、位错网络区和范性形变区，加起来厚度约20 μm，用波长较短的光（0.9 μm），照射这样的硅片表面，大部份的光在机械损伤层中被吸收，不可能测出硅片的体寿命，必须把损伤层腐蚀干净，才可能测出我们真正需要的体寿命。

从这里也可以看出波长较长的光贯穿深度较大，大部份光生少子分布在体内，表面干扰的影响相对较小。



在块状单晶的情况下，即使是有损伤层，如果光注入深度较深只要把衰退曲线的头部去掉就可以避开表面复合的干扰，这就是用MF28标准测单晶块，不需要做表面处理（研磨面）也可以测准体寿命的原因，但是它对样品的大小有一定的限制。硅片太薄，两个表面相距很近，不作抛光钝化处理也无法免除表面复合的干扰，所以在单晶生长后，最好在切片前对整根单晶测量，切成片后再测量就要多做许多表面处理工作。同时要指出用短波长的光源不适合测量块状单晶，正如MF28规定光源波长 $\lambda \geq 1.0 \mu m$ ，因为短波光会在表面附近被吸收，表面带来的干扰太大。

高频光电导法与微波光电导法都是国标认可的方法，高频光电导法相对微波而言频率较低，各种测试条件比较接近直流光电导法。因此更适合于测量块状单晶。微波反射光电导法是专门针对硅片寿命测量发展的方法，它是通过监测样片微波反射来测定样片电导率的变化，实现了无接触测量，因此更适合于测量抛光硅片。无论哪种方法，测量硅片时，对表面都必须做严格的腐蚀钝化处理才能获得较准确的结果，考虑实际使用的方便也可由供方和需方对测试中的表面处理达成共识，观测寿命的相对变化。对较薄的研磨硅片直接测量，往往得到的只是表面复合寿命。

1、样品制备

我们在检验多晶硅质量过程中，往往关心最终的测试结果，其实要顺利地取得正确的检测结果，必须将样品制备作为分析检验工作很重要的一部份来考虑，按国际标准：SEMI MF1723的要求，对钻取的多晶棒、区熔用的籽晶及环境工艺设备都有一定的要求，现列表说明如下：

多晶棒	籽晶	环境、清洗工艺及设备
无破裂、无高应力区、无深度支蔓状生长、表面无孔隙、去油、去润滑脂、无手沾污。	无位错 受主杂质浓度 $<0.05\text{ppba}$ 施主杂质浓度 $<0.05\text{ppba}$ 碳含量 $<0.1\text{ppma}$ 直径：3~5mm （III）晶向，偏离度 $<0.5^\circ$ 清洗后36小时内使用	室内空气、墙面、地面、设备对样品的污染要减到最小。 确保酸、离子水、容器中的杂质数量都不致于干扰测试分析精度，要监控、检测： 手套或包裹硅棒的材料以及任何接触到检验棒的舟皿、容器，使用这些材料器皿之前都必须充分清洗，监控样品的冲洗次数以及在空气中暴露的时间。

试剂、水、空气、氢气、容器、籽晶及区熔设备对检验棒都可能造成污染，如何在工艺上避免沾污是区熔检验中的关键，也是保证检验结果可靠的前题，因为污染对测量结果带来的影响远大于仪器测量误差。

2、样品处理

多数样品从检验炉取出冷却后，经过必要的表面处理便可以立即测量，但对有的区熔检验棒需要进行适当的处理后才能测出真实的结果，就如同直拉单晶（CZ）要经过退火处理消除氧施主才能测出真实、稳定的电阻率。

在P型含硼硅单晶中或在补偿度较高的N型硅中，Fe原子如是以间隙式存在，将起深施主能级的作用，是十分有效的复合中心（电子俘获截面 $6 \times 10^{-14} \text{cm}^2$ ），但在室温下Fe经过数小时，到几天的变动期，这些施主缺陷将与替位式的硼受主结成稳定的FeB偶，FeB偶的俘获截面是 $6 \approx 5 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ ，比Fe小10倍。这样的络合物，测试前必须加以消除，方法是在210℃经10分钟退火，接着在水中淬火至室温保存，这时试样中的铁原子即恢复原有状态，测量出的寿命值比较真实而不会虚高。

有的研究工作还发现硅中氧浓度较高时，氧吸附在重金属杂质Cu、Fe等周围，对复合中心Cu、Fe等起屏蔽作用，同时这部份氧对“少数载流子”又起粘附作用，导致少子寿命增长，这种高寿命有人称假寿命。当热处理后吸附的氧变成（si-o）复合体，上述作用消失，少子寿命降低，接近真实值。

因此在多晶硅检验中，有时还需对样品进行适当的处理，去除虚假的现象，以获得真实的测量数据。

目前太阳能级多晶硅的杂质不但数量较多而且成分复杂，检测中出现了一些电子级多晶硅中没有出现过的现象，需要我们进一步开展研究工作，去认识这些新现象。



最后归纳所讲要点：

- 1、目前尚未有简便、准确检验多晶硅的方法——这是由于多晶硅结构比较复杂引起的。
- 2、国际标准及国家标准早已明确规定：测硅棒（特别是细硅棒）纵向电阻率要用二探针法；测量单晶硅、硅片横断面（横向）电阻率要用四探针法，不要用四探针去测硅棒电阻率。
- 3、千万不要把基磷电阻率和未扣除基硼补偿的检磷电阻率混为一谈 ——重视补偿度的测量。
- 4、不要把表面复合寿命误当作体寿命。
- 5、既要看测量数据，更要重视防止制样过程中的污染及正确处理样品。

广州市昆德科技有限公司

王世进



谢谢!