

离子注入讲义

(离子注入工艺部分)

(中)

北京师范大学物理系

一九七七·九·

第四章 工艺测量

离子注入技术作为半导体器件制造的新工艺，在国外已经广泛采用。注入杂质原子或施主（受主）中心沿靶片深度方向的浓度分布，是器件制造中最关心的问题之一。但是我们如何了解和控制这种分布呢？只有掌握了这种分布规律，才能选择合适的注入条件，人为地控制注入杂质原子的浓度分布。对于非晶体靶，LSS理论所预言的射程分布和实验结果较为符合；然而对于器件制造中各种不同情况的靶片来说，实验结果和理论预言出入较大。尤其是退火后注入层的载流子浓度分布规律，已不是LSS理论所能解决的。因此，注入层的各种参数的工艺测量，是十分重要的。它既为器件的设计和制造提供了可靠的数据，又是注入机的鉴定和改进的工艺依据。同时这种基本测量工作，也是我们研究离子束与固体相互作用机理的重要手段。

本章将要对于离子注入层的型号、深度、杂质浓度分布、载流子浓度分布、损伤情况等物理量的测试方法做一概略介绍。

§1 剥层技术

以后我们将要讲到用中子活化分析及质谱分析法测量离子注入半导体中的杂质浓度分布，以及用微分电阻率法和霍尔剥层法测量半导体中电活性杂质分布。以上几种方法都需要对被测样品进行微分剥层，剥层的方法是多种的，在这里我们仅介绍阳极氧化及化学腐蚀两种剥层技术并且还要谈 SiO_2 薄膜厚度的测量方法。

一、阳极氧化

阳极氧化是在样品表面用电化学方法生长 SiO_2 层，然后用稀释的氢氟酸去掉 SiO_2 ，如此剥去的硅层厚度正比于所生长的氧化物层厚度。而阳极氧化生长的 SiO_2 层是可控的，均匀的，并且重复性好，因此是较好的一种剥层技术。

1. 简单原理

阳极氧化法就是用适当的化学药品配制成电解液，然后把要剥层的样品作为阳极，用铂、金或镍等金属薄片做阴极，把阳极和阴极放在电解液中，接上直流电源，这时就有电流通过，电化学的作用使样品表面层氧化。在恒定电流的情况下，样品上的电压降逐渐增加，用样品上电压降的大小来控制氧化层的厚度。然后将氧化层去掉。根据氧化层的厚度可以得到去掉样品的薄层厚度。

2. 几种电解液

用于阳极氧化硅材料的电解液有以下几种：

(1) 硼酸、四硼酸钠的水溶液

硼酸：四硼酸钠：水 = 6.2克：38.1克：1000ml

(2) 乙二醇 (EG) - KNO_3

(3) 乙二醇 (EG)：磷酸 = 10：1

(4) N-甲基乙酰胺 (N.M.A) - KNO_3

NMA： KNO_3 ： H_2O = 360cc：1.6g：10cc

(5) 四氢糠醇 $C_5H_{10}O_2$ ： KNO_3 = 50ml：50mg

以上电解液有人曾进行过比较。观察出用乙二醇 (EG) - KNO_3 溶液有以下优点：此溶液可用于室温，不同于 (N.M.A) 溶液要在 $34-35^\circ C$ 下工作；给出较光亮的干涉色；EG 溶液能给出好的重复性，对膜的氧化层厚度能较准确的控制。

而对于工作电压高要求生成 SiO_2 膜较厚的剥层工艺来说使用 (N.M.A) 中含有 KNO_3 或四氢糠醇电解液较为有利。

在我们测量注入层载流子浓度分布中，多选用剥层较差、控制较好的乙二醇电解液。我们实验室选用的是乙二醇 - 磷酸电解液。

3. 装置

阳极氧化的装置分为溶液缸和电极及阳极氧化电源三个主要

部分。而电极的装置基本上有两大类。阴极都选用了铂电极，阳极装置一种是将硅材料固定在电解槽内部，另一种是用吸附的方法将硅材料放在电解槽的表面。这两种办法都是可取的。

第一种装置图4.1.1.(1) 阳极氧化面积由硅橡胶O形环规定，它保证和电解液紧接，一个薄铂片环绕电解槽的壁作阴极。电解液需要搅拌，否则气泡将附着于硅表面或沿着优先的路程分散，这样生长的氧化层不均匀。

第二种装置图4.1.1.(2) 是我们的实验室的装置。硅片是用空心石墨棒做阳极抽气吸附的，通过空心石墨棒引出阳极。并将硅片放入电解液表面浸润。阳极采用有机玻璃支撑的铂片。搅拌电解液是用转动的磁铁带动一个用玻璃封装的铁棒来完成的。

另外关于阳极氧化电源部分，有两种，一种是恒流源，另一种是恒压源，其中恒定电压工作的氧化层厚度强烈地依赖于材料电阻率。而恒流源可以通过形成电压的记录作最精确的厚度控制，所以说恒流电源方式的阳极氧化有一定的可取之处，我们也就选用了恒流电源。

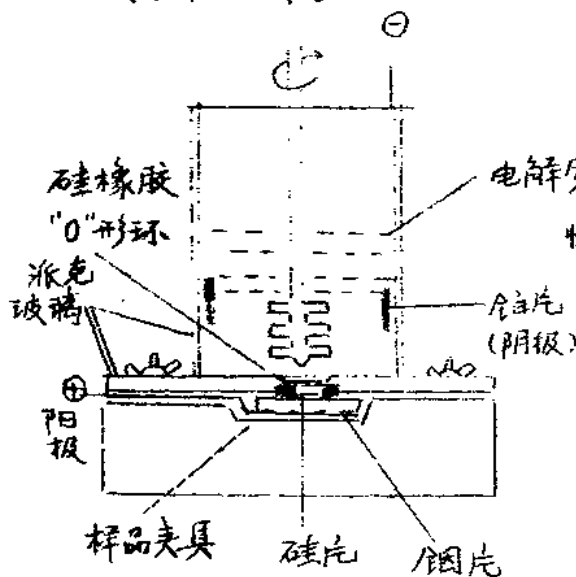


图4.1.1.(1)装置1

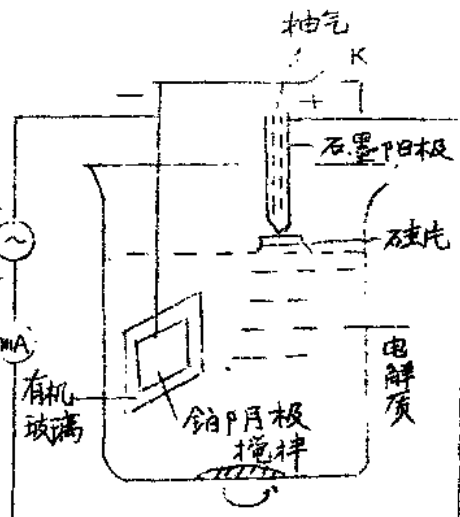


图4.1.1.(2)装置2

4. 阳极氧化工艺

阳极氧化前的硅片，必须经过严格清洗。不然硅片不清洁的表面，对氧化的起始电压 V 或氧化的速度有明显的影晌，会使氧化层均匀性变坏，同时也影响了对氧化层厚度的控制。

用恒流电源装置对硅片氧化时，可以用样品上形成电压的大小来控制氧化层厚度，也可以在一定的电流密度下用一定的氧化时间来控制。氧化后用氢氟酸去掉 SiO_2 层后，仍要严格清洗方可再进行氧化。

另外，实验证明对于同一电解液样品形成电压大小和氧化层厚度的关系与硅的晶向无关。但是如果晶体的晶格是无序的（如注入后未退火样品）阳极氧化在同样条件下会增厚一些。例如：在硅单晶上以 $7.5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 的磷离子在 80 KeV 下轰击，发现氧化层厚度比在没有辐照的晶体上生长的厚 8%。如果这种样品经过退火后再阳极氧化，就不再有增厚的现象，从中看到这种效应是由于在受损伤晶体上阳极氧化速率的增大所致。

5. 阳极氧化的基本规律

我们对恒流电源装置用乙二醇 (EG) - KNO_3 水溶液做电解液的情况对硅片做阳极氧化的一般规律做一简单介绍。

在恒流电源情况下对硅片进行氧化。这时电极上的电压降随着时间的增加而加大，氧化层的厚度也在增加，这样就提供了判定氧化层厚度的一个方法。图 4.1.2 是一个总电压降与阳极氧化时间的关系曲线。图 4.1.3 是形成电压与阳极氧化层厚度的关系曲线。所谓形成电压即为电极间总电压降去掉电解液和硅中的电压降后剩余的氧化层上的电压降。

图 4.1.2 与图 4.1.3 见下页

从图中看到我们可以用氧化的时间也可以用氧化所形成的电压来控制氧化层的厚度，用氧化时间来控制的方法，受到工作时的温度，电解槽的参数等的影晌，会造成生成氧化层厚度的不重

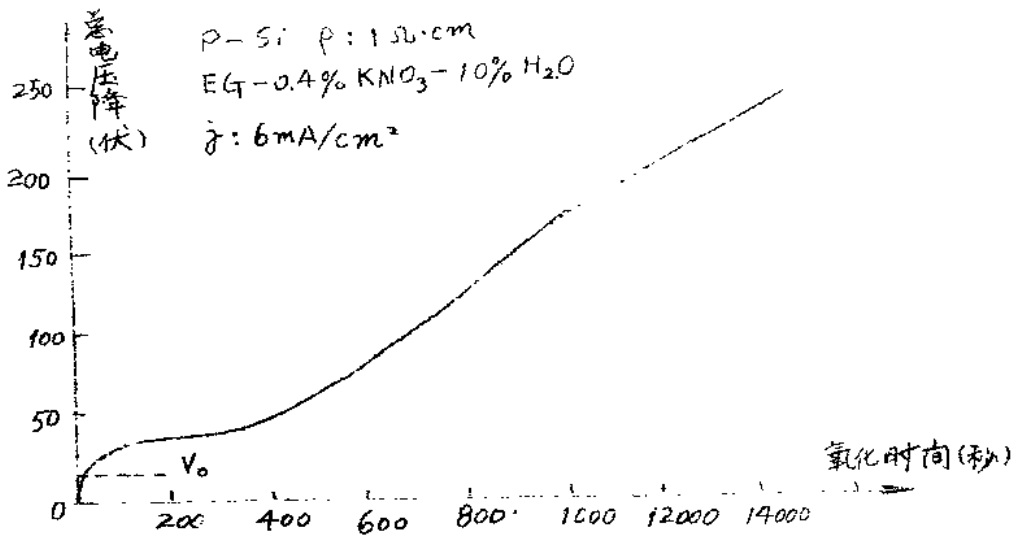


图 4.1.2. 总电压降和氧化时间的关系

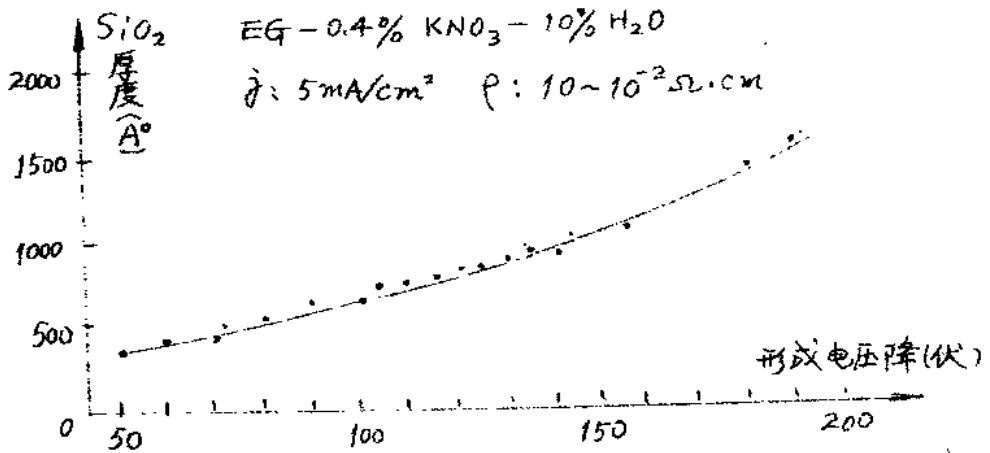


图 4.1.3 形成电压与生成 SiO_2 厚度关系

复性。但是用形成电压来控制氧化层的厚度则不受上面因素的影响。因而用形成电压来控制氧化层厚度有一定的优越性。

以上介绍可以看到我们对于不同的样品及工艺要求，选定氧化的电解液、装置及控制 SiO_2 厚度的方法就可以达到我们将硅片一次次剥层的目的。

6. SiO_2 厚度与 Si 厚度的换算

在我们对样品进行测量时，利用阳极氧化技术剥层时必须把

测出的 SiO_2 厚度转换成 Si 的厚度。

阳极氧化生成的 SiO_2 比热氧化的 SiO_2 密度要低。而且不同氧化条件下生成的 SiO_2 折射率、密度等也有所不同。例如：氧化液中含水分的多少对 SiO_2 层折射率影响就很大。另外电解槽和实验条件的变化都会对生成 SiO_2 的折射率有影响。

有人对电解液 $EG - 0.4\% KNO_3 - 10\%$ 水,在电流密度为 $5mA/cm^2$ 下进行了实验。结果 $Si:SiO_2$ 厚度比在生长厚度为 $1000A^\circ$ 时有最小值约为0.35 在 $500A^\circ$ 及 $1500A^\circ$ 处比值上升到0.4左右,并且氧化层厚度再增加时其值急剧地增大到0.5-0.7。(表一)

氧化层厚度(A°)	$Si:SiO_2$ 厚度比
500	0.43 ± 3
1000	0.38 ± 3
1500	0.41 ± 5

对于离子注入后的样品进行阳极氧化,因为有晶格损伤等存在,问题比较复杂,因此我们必须对各种条件的样品通过实验找到 SiO_2 厚度与 Si 厚度的转换系数 α ,才能知道剥掉的 Si 层厚度。

下面介绍两种测量转换系数 α 的方法:

(1) 制作硅台阶测量法

我们选定阳极氧化条件后,将硅片进行氧化。再用上述方法测出 SiO_2 层厚度 d_{SiO_2} 。

再选用相同的硅片,在硅片上热氧化一层 $3000A^\circ$ 左右的 SiO_2 ,然后光刻窗口,开窗口并留下光刻胶。对此窗口用上面测 SiO_2 厚度时同样的条件进行阳极氧化。氧化后去掉阳极氧化的 SiO_2 层,再进行第二次氧化。这样周而复始数次。最后把 $3000A^\circ SiO_2$ 和光刻胶掩膜都除去,得到了几次氧化后的 Si 台阶。用于干涉显微镜测量其 Si 台阶厚度,可以得到每次氧化剥去的硅层厚度 d_{Si} 。工

工艺流程如图 4.14 所示。

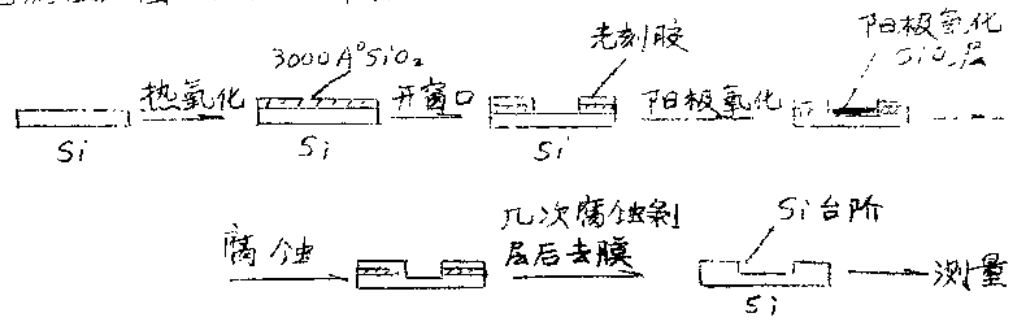


图 4.14. 形成阳极氧化硅台阶的工艺流程

通过上面的测量，我们可以找到在一定阳极氧化条件下 SiO_2 和 Si 厚度间的转换系数 α ($\alpha = dSi/dSiO_2$, 其中: dSi 为每次阳极氧化去掉的硅层厚度, 而 $dSiO_2$ 为每次氧化时生长的 SiO_2 厚度)

(2) 微量天平称量法:

先把一片硅样品的面积测出为 A , 用微量天平称其重量为 m_1 。然后在一定的条件下进行阳极氧化, 氧化后去掉 SiO_2 层, 再去氧化。这样在同样条件下氧化几次。再把样品用微量天平称量, 得到重量为 m_2 。

于是 $dSi \times A \times Si$ 的比重 = $\frac{m_1 - m_2}{n}$

则 $dSi = \frac{m_1 - m_2}{nA \times Si \text{ 的比重}}$ 这样就可以得出, 在上面的阳

极氧化条件下氧化一次去掉的硅层厚度 dSi 。而一次氧化生长的 SiO_2 厚度 $dSiO_2$ 同样可以用上面讲的方法测出。这样在一定的阳极氧化条件下就可以找到 SiO_2 和 Si 厚度的转换系数

$\alpha = dSi/dSiO_2$ 。

利用上面两种方法, 我们可以在一定的电压、温度等条件下改变不同的形成电压, 找到对应不同形成电压的转换系数, 从而做出不同形成电压下对应的剥去 Si 层厚度的曲线。

利用上述的方法求出的阳极氧化转换系数 α 一般在0.3~0.45之间,我们选用时因条件不同要通过实验方能测量的准确。

7 GaAs的阳极氧化

前面介绍的阳极氧化方法是硅的阳极氧化。对于GaAs的阳极氧化基本上与硅相同,装置与硅氧化一样,氧化电流源也采用恒流源。

氧化GaAs选用电解液有多种,现只介绍二种:一种为(30%) H_2O_2 电解液用 H_2PO_4 调整pH值为2。另一种为,甲替乙酰胺 ($CH_3CONHCH_3$) 一般用NMA表示,在NMA中加到20%的水然后再用 NH_4OH 调节pH值为8.3。

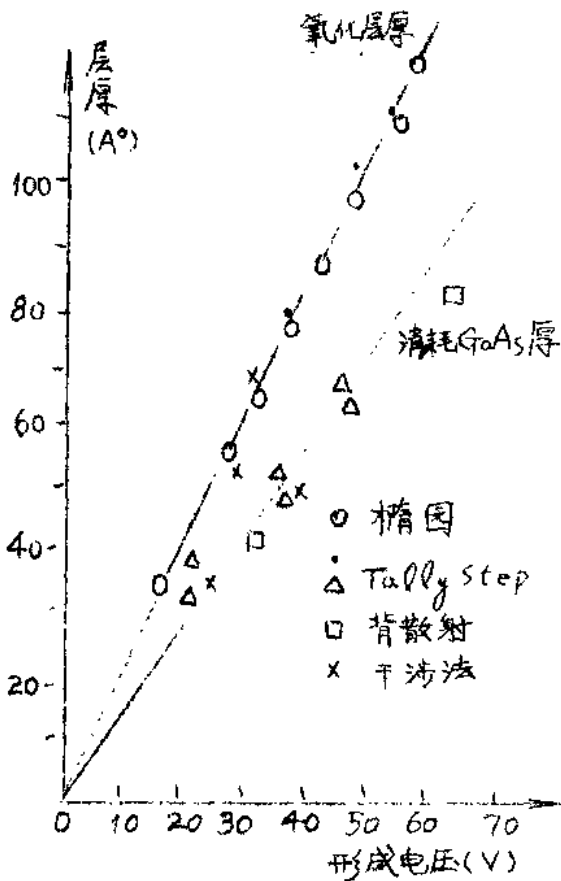


图4.1.5. 形成电压与氧化层GaAs厚度关系

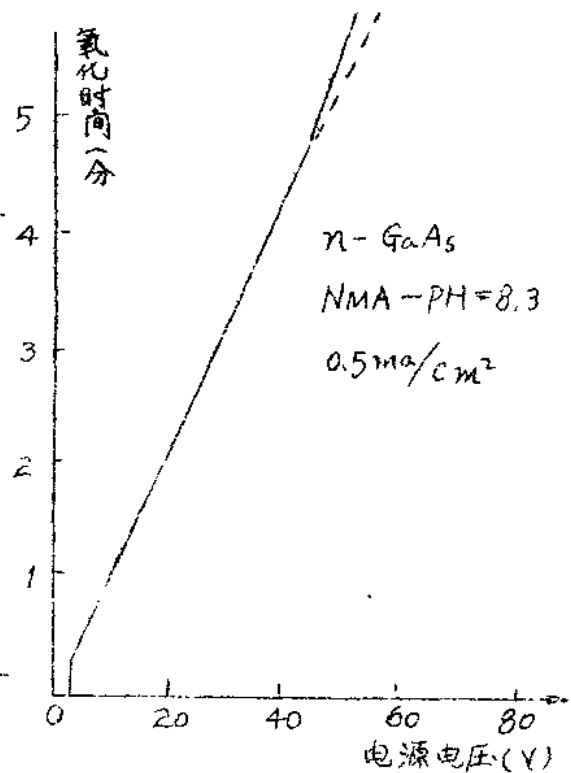


图4.1.6. 电源电压与氧化时间关系

以上电解液对 n -GaAs, p -GaAs 浓度 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 进行了氧化, 氧化规律如图 4.1.5, 图 4.1.6 所示。

氧化电流密度要比较小, 一般选用 0.5 mA/cm^2 , 不然氧化后会产生一些麻坑。

从图 4.1.5 中看到在上面条件下氧化时, 产生的形成电压以 9.5 伏/分钟 的速度上升, 在 40 V 以内是直线上升的, 而在 40 V 以后有些偏离, 实验证明如果加大一些电流密度可以在 80 V 以前都是线性的。

图 4.1.6 中表示 3 测量出的氧化层厚度和消耗 GaAs 厚度的关系。氧化生长的速率为 $20.2 \text{ \AA}^\circ/\text{伏}$, 并且在氧化层中 GaAs 的消耗量为 $13.4 \text{ \AA}^\circ/\text{伏}$ 。从中得到 GaAs 和氧化层厚度的转换系数 α 为:

$$\alpha = 13.4 \text{ \AA}^\circ / 20.2 \text{ \AA}^\circ = 66.4\%$$

二. 化学腐蚀剥层法:

在没有阳极氧化设备的情况下, 可以采用化学腐蚀剥层。这种剥层方法缺点较多, 主要是厚度不好控制并且剥层很薄直接用于干涉显微镜测量误差较大, 所以一般不采用。

如果用化学腐蚀剥层则必须选用腐蚀速度很慢的腐蚀液, 且要把它的腐蚀速度实验好才能采用。

对于硅我们一般采用下面表中几种腐蚀液

腐蚀液名称	成 分
CP_4 腐蚀液	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{Br}_2 = 5 : 3 : 3 : 0.06$
碘腐蚀液 A	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 100 : 50 : 110$ (加少量碘)
碘腐蚀液 B	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 125 : 25 : 110$ (加少量碘)
碘腐蚀液 C	$\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 150 : 60 : 120$ (加少量碘)
硝酸腐蚀液	$\text{HNO}_3 : \text{HF} = 95 : 5$
双氧水腐蚀液	$\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HF} : \text{Br}_2 = 5 : 5 : 1$
	$\text{H}_2\text{O}_2 : \text{HF} : \text{HCl} = 10 : 10 : 1$

上表：硅的几种腐蚀液

对于 $GeAs$ 我们采用硫酸双氧水腐蚀液或氢氧化化的双氧水腐蚀液。对于 $NaOH$ 腐蚀液的速度曾作过实验，情况如表

硫酸腐蚀液为： $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 3 : 1 : 1$ 。

氢氧化钠腐蚀液为： $NaOH : H_2O : H_2O_2 = 4克 : 186 ml : 10 ml$ 。

配合时间	腐蚀速度	剥层厚度	剥层厚度
1 小时	18400 A°/分	3" 920 A°	3.5" 1000 A°
1.5 小时	12000 A°/分	6" 1200 A°	5" 1000 A°
2 小时	9000 A°/分	6" 900 A°	6.5" 1000 A°
2.5 小时	8000 A°/分	7" 933 A°	7.5" 1000 A°
3 小时	5500 A°/分	12" 1100 A°	11" 1000 A°
3.5 小时	4840 A°/分	12" 968 A°	12" 1000 A°
4 小时	4250 A°/分	12" 850 A°	14" 1000 A°
4.5 小时	3700 A°/分		
5 小时	3600 A°/分		

表：NaOH 腐蚀液在 37°C 恒温时腐蚀速度

三、 SiO_2 层厚度的测量

1. 椭圆偏光法

(1) 简单原理

用椭圆偏光法可以测量 SiO_2 薄膜的厚度及折射率。这种方法的基本原理是利用单一波长的椭圆偏振光照射到待测样品上，入射光透射过薄膜到达衬底与薄膜的交界面，在界面处反射回去，经过薄膜又折回空气中。入射的椭圆偏振光的两个互相垂直的分量的振幅比和位相差在反射光中将发生变化，其变化值与透明薄膜的折射率和厚度有关。于是根据测量得到的振幅比和位相差的变

化量就能测出薄膜的折射率和厚度。

测量时转动起偏器和检偏器的方位角，接收讯号强度发生变化。在某起偏器方位角时，反射光变为线偏光，这时光束再经检偏器，转动检偏器，可出现消光状态。光的状态变化如下：

自然光 $\xrightarrow{\text{起偏器}}$ 线偏光 $\xrightarrow{\text{波片}}$ 椭圆偏光 \rightarrow 样品
 $\xrightarrow{\text{反射}}$ 线偏光 $\xrightarrow{\text{检偏器}}$ 消光。

在消光时起偏器的方位角 P 由反射光的位相移动差 Δ 决定，而检偏器的方位角 A 由反射光的相对振幅衰减 $\tan \psi$ 来定。又因为 ψ 和 Δ 与样品上的薄膜厚度 d 与折射率 n 有函数关系，则我们可以标出一系列 (P, A) 值对应的 (d, n) 值来，在测量时我们只要测出 (P, A) 值通过查表即可找到 (d, n) 的对应值。

(2) 测量方法

(i) 调节样品台位置将样片对准。

(ii) 调节起偏器和检偏器位置使其反射光消光，这时 λ 波片放在 $+45^\circ$ 角或 -45° 角，读出在 $0 \sim 180^\circ$ 中两个消光位置时的 (P_1, A_1) 及 (P_2, A_2)

(iii) 将其中 A 值为正值时对应的 P 值加 90° 后将 (P_1, A_1) 与 (P_2, A_2) 取平均为 \bar{P}, \bar{A} 。

(iv) 根据一般经验判断出周期数，椭圆法本身不能判断周期，只有用其他方法对 SiO_2 厚度的周期数有一个估计。

(v) 查 $(P, A) - (d, n)$ 表找到被测样品的 d, n 值。

这种方法测量 SiO_2 厚度精度高，一般精确到 $\pm 10\text{\AA}$ ，并且对样品无破坏，又能同时测出折射率。所以是比较好的一种测透明薄膜厚度的方法。详细原理见附录。

2. 干涉显微镜测量法

将被测 SiO_2 薄膜用真空黑胶保护一部分，用 HF 腐蚀掉未保护部分的 SiO_2 ，再用甲苯去掉黑胶，从而形成一个 SiO_2 的台阶。因为 SiO_2 是透明的，则光线不能从 SiO_2 表面全反射，因此往

往在SiO₂台阶上蒸一层Al后再测量SiO₂台阶厚度

测量方法是将带有SiO₂台阶的样品在干涉显微镜下测量找到如图4.1.7的干涉条纹,在SiO₂台阶处干涉条纹产生偏移。在



图 4.1.7

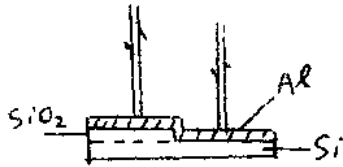


图 4.1.8

白光下可以看到条纹偏移的条数,单色光下做精确测量(用测微目镜或目镜中的刻度)。这种偏移是因为台阶造成了晶片一

部分使膜厚度增加 d ,反射光光程增加。台阶上下反射光光程不同,而光程差是由台阶厚度 d 所决定。而一个条纹的偏移说明厚度差为 $d_2 - d_1 = \lambda/2$ ($n=1$)。所以我们测出台阶处条纹的偏移数就可得到台阶的厚度 $d = \lambda/2 \cdot X$ (X 为条纹的偏移数)

如图4.1.7情况偏移了一个条纹,单色光 $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$ (绿光波长)则台阶厚度 $d = \frac{\lambda}{2} \times 1 = 0.27 \mu\text{m}$ 。

如果SiO₂台阶上不蒸Al直接在干涉显微镜下测量,则情况就不相同了。蒸Al后台阶上下对光线都可以认为是全反射的,

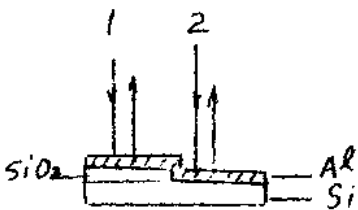


图 4.1.9

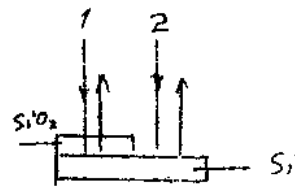


图 4.1.10

如图4.1.9则光线1和2造成的光程差为 $2d$ 。若不蒸铝,如图4.1.10

SiO₂薄膜为透射膜,则光线1和2的光程差

为 $2nd - 2d = 2(n-1)d$

(其中 n 为SiO₂的折射率)所以公式为 $d = \frac{\lambda}{2(n-1)} X$ (其中 X 为偏移条纹数, λ 为单色光波长。)

有时也利用这样测出的厚度 d_1 ,乘上一个修正系数为实际厚度,修正系数为 $1/(n-1)$ 。

$$\text{则 } d = \frac{1}{n-1} d_1 \quad (\text{对于SiO}_2 \quad n \approx 1.5)$$

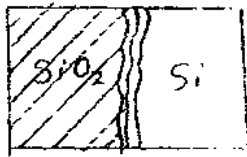
3. 干涉条纹法

首先与上节相同的被测样品做出SiO₂台阶,再用显微镜观察台阶,有如图4.1.1所示的明暗相间的等厚条纹。一般我们从一个最暗的条纹到另一个最暗的条纹认为这是一个干涉条纹,可用下式计算出SiO₂的厚度d。

$$d = \frac{\lambda}{2n} \times \quad (\text{其中 } n = \text{SiO}_2 \text{ 折射率约为 } 1.5)$$

$\times =$ 干涉条纹的条数

$\lambda =$ 单色光入射波长)



若用白色光,在显微镜下看到五彩干涉条纹,一般绿光最强常以绿光干涉为准,将 $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$ 代入式中,计算出SiO₂膜厚。

图4.1.1 干涉条纹

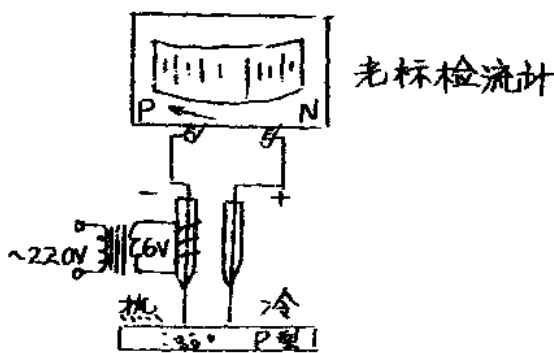
§2 导电类型和结深的测量

关于型号、结深、p-n特性等参量的测量和一般器件生产中所用的测试原理完全相同。这里仅就离子注入工艺中遇到的一些特殊情况加以说明。

一. 注入层的导电类型

注入层的导电型号,可以用霍尔系数的测量或整流特性来确定。但是简便易行的办法是采用温差电动势判断的方法(我们习惯的说法是冷热笔探针测型号)。其装置如图4.2.1所示。热笔用一低压交流电加热(一般比室温高五到十度即可),冷笔一端处于室温。两根笔头(探针)均用钨丝腐蚀而成。实验中发现:对于P型半导体,热笔一端电压为负,冷笔一端电压为正(如图1.2.4所示);

对于n型半导体则完全相反。



4.2.1. 冷热笔测型号

所以利用这种现象，可以判断半导体的电导类型。这种冷热笔测试型号的原理是：半导体材料的本征载流子浓度 n_i 和半导体所处的环境温度有关，对于硅来说，在室温附近，温度每升高 80°C 左右， n_i 就增加一倍。因此，在热笔所接触附近，半导体中将会发生热激发，使 n_i 增加。随着温度的升高，热激发产生的电子、空穴对不断增加。在杂质半导体中，这种热激发所引起少数载流子浓度增加的比例，远大于多数载流子所增加的比例。所以，当被测样品为P型半导体时，热激发的电子就被热针头吸收（即热笔一端电压为负），被测样品为N型时，热激发的空穴被热针头吸收（即热笔一端电压为正）。上述仅指热激发的电子—空穴对的作用。如果同时考虑到杂质所提供的载流子浓度和速度将随着温度的增加而增加，它们由热端向冷端扩散，也造成上述的温度电势。两种作用效果相同，不再重复。

在去层测量中，快到结附近，或者被测样品掺杂浓度不均匀时，往往用图4.2.1的装置不能正确判断所测表面的电导类型。这时可用一只笔放入样品下面衬底接触，同时加光照，并对调冷热笔的接触位置，观察光标检流计偏转的方向，这样利用P-n结的光生电势来判断导电类型，并且可以判断出是否已经到了P-n结位置。

二、结深的测量

在扩散工艺中结深多采用磨角染色、和滚槽法测量。因为这两种测量方法误差都比较大，一般可达 $1000\sim 1500\text{\AA}$ 。所以对于深结还可采用，但离子注入制作的P-n结一般都做浅结，有时甚至浅到 $1500\text{\AA}\sim 3000\text{\AA}$ 。这种浅结用上面两种测量方法就无法测量。下面介绍两种测量浅结的方法。

1. 干涉显微镜法

将样品用黑胶保护一部分，用硅腐蚀液一次次地腐蚀未保护部分。每次腐蚀后用冷热笔辨别型号变化，看是否到P-n结。

当腐蚀到p-n结后，即将黑胶去掉，就形成了厚为p-n结深度的一个硅台阶，在干涉显微镜下测出台阶厚度即为结深。这种方法测量误差一般在 300\AA 左右。对于浅结这个误差基本上还允许。

2. 阳极氧化法

这是一种精度较好的测量方法。

测量时将被测样品进行阳极氧化，每次剥层后用椭圆偏振光法测出生长 SiO_2 厚度 d_{SiO_2} 。并用四探针测方块电阻或用冷热笔测型号变化。这样每次的方块电阻逐渐增大，当到某一次时方块电阻突然变化成衬底方块电阻时，即为结深，用冷热笔也同样可测出p-n结的位置。这一层如果为第 n 层，则结深即为：

$$x_j = \alpha \cdot (d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n)$$

其中 α 为 SiO_2 厚度与Si厚度的转换系数，而 d_1, d_2, \dots, d_n 为每次剥层生长 SiO_2 厚度。

3. 测浓度分布得结深。

当我们测量出样品的载流子浓度时，即当浓度分布中浓度为衬底浓度时的位置则为p-n结位置。此位置到表面的距离即为结深。

§3 注入杂质浓度分布的测量

注入杂质浓度分布是指注入杂质原子的总量在靶片中沿深度方向的分佈（一般以每立方厘米中所包含的原子数为计量标准）。如果不考虑杂质原子的扩散效应，这种分佈实际上就是很多资料中提到的射程分佈（严格讲是平均投影射程分佈）。关于这种分佈的测量方法有背散射测量（沟道技术）、放射性活化分析、质谱仪分析、离子探针和俄歇（Auger）电子能谱仪等。本课主要介绍前三种测量方法，对后两种方法只做一个简单介绍。

一. 放射性活化分析

放射性活化分析技术又分为中子活化分析技术和注入放射性同位素分析技术两种方法。其原理是根据，一定的粒子如中子、

质子和 α 粒子束照射样品后，能够产生 (n, γ) , (n, α) , (p, α) 等核反应。对其放射性强度的测量，可以确定被测的原子数。所以采用放射性活化分析和适当的剥层技术相结合，便能测定注入杂质原子在样品材料中的浓度分布。

1. 中子活化分析

硅中注入磷，采用中子活化分析技术测量其杂质浓度分布的具体步骤是：

- (1) 向硅材料中注入磷。(非放射性物质 P^{31} 或砷)
- (2) 将注入样品进行退火。(仅求射程分布可不退火)
- (3) 照射样品

将被测样品经过适当处理后，用铝箔包好，并将一定量的磷酸氢二铵 $(NH_4)_2HPO_4$ 即标准样密封于石英瓶中，外包铝箔，标准样和样品同时放入原子反应堆中辐照。反射层经慢中子流照射一定时间(一般取半衰期的五倍， P^{31} 选用40-50小时)，产生 (n, γ) 核反应，生成放射性同位素 P^{32} 。其反应式为：



照射后的样品，根据磷以及样品中其他放射性同位素的半衰期长短和所用测量设备的情况决定冷却的时间。我们实验中对磷冷却了一个星期，使硅和其他短寿命的放射性同位素蜕变掉。

(4) 杂质浓度分布的测量

将磷标准样放入100ml水的瓶中水煮稀释，从中取出1ml和2ml各一份，放于30ml铂坩埚盖内(事先放有1mg稳定性磷载体)烘干即得含磷量为0.1微克和0.2微克的 P^{32} 标准，测其放射性。

待测样品用阳极氧化剥层，测出每次剥层生长 SiO_2 厚度，再转换成Si的厚度。再将每次剥层后生长的 SiO_2 用HF在30ml的铂坩埚内(事先放有1mg稳定性磷载体)进行腐蚀，腐蚀