

# 用四探針及阳极氧化方法測量 硅中扩散层杂质分布\* 1)

林緒倫 黃 啟 徐炳華

(北京大学物理系) (中国科学院)

## 提 要

本文討論了：(1)用阳极氧化法在硅片表面去层的技术；(2)用四探針測量扩散层面电导的方法；(3)用阳极氧化去层及四探針測量面电导方法求得扩散层精細杂质分布。

文中着重討論了实验技术中的实际問題，如如何在阳极氧化过程中取得精細而均匀的去层(300—1500 Å)；如何控制及測量去层厚度；測量面电导及杂质分布时的誤差来源及减小誤差的措施。

以典型的磷在硅中扩散的杂质分布測量为例：扩散深度为4.9 μm，測量間距为400—1600 Å，面电导測量誤差估計小于3%，杂质分布誤差估計小于20%。简单地提出了一些測量中尚待进一步解决的問題。

## 引 言

在研究半导体器件的电学性能及求扩散結的表面浓度<sup>[1-4]</sup>或 III、V 族杂质在半导体中的扩散系数<sup>[5,6]</sup>等工作中，必須知道半导体中的杂质分布。一般假設杂质分布为一些簡單函数形式，如余誤差函数分布等。但近来的一些較深入細致的測量結果<sup>[7-11]</sup>表明，在有些情况下，杂质分布事实上与余誤差函数有所偏离。因此在器件物理及扩散的研究工作中，精細地測定杂质分布便变成重要的測量技术。

本文叙述了在硅片上阳极氧化去层的技术及去层厚度的測量，討論了在用四探針測量扩散层面电导时減少誤差的一些措施，以及用四探針及阳极氧化方法求扩散結精細杂质分布的測量技术。这些測量技术已在一些扩散<sup>[12]</sup>及 P-N 結电学特性<sup>[13]</sup>的研究工作中得到应用。

## 阳极氧化去层及厚度測量

測量杂质分布的一个关键問題在于精細而均匀地去层。我們探索了在 0.1M 四硼酸鈉-硼酸飽和溶液<sup>[7]</sup>以及硝酸溶液<sup>[14]</sup>中对硅进行阳极氧化的規律，初步得到由 300—1500 Å 范围内不同厚度的去层条件。我們常用的去层厚度为  $480 \pm 30 \text{ Å}$ ，即在 1 μm 的范围内，可測量二、三十个点，而磨层法常用的去层厚度为  $1 \pm 0.2 \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>，即 1 μm 測一点。可見阳极氧化去层是比較精細的。特別在測量較薄的扩散层(如层厚 0.5—10 μm)的杂质分

\* 1963年2月19日收到。

1) 本文內容曾在 1962 年物理学会主办的全国半导体年会上宣讀。

布时,阳极氧化去层技术更为重要.

阳极氧化的装置如图 1 所示. 硅片作为阳极,通电以后,溶液中的氧离子与硅片上失去电子的硅离子化合成二氧化硅. 二氧化硅层的厚度与阳极氧化的电压、电流、时间等条件有关. 用氢氟酸把这层二氧化硅腐蚀掉,便达到去层的目的. 由于二氧化硅薄层在白光照射下,因干涉作用而呈现出颜色,因此可利用厚度与干涉颜色的对应关系来控制厚度,而避免探讨阳极氧化电化学过程中电压、电流及时间等影响厚度的复杂规律<sup>[15,16]</sup>.

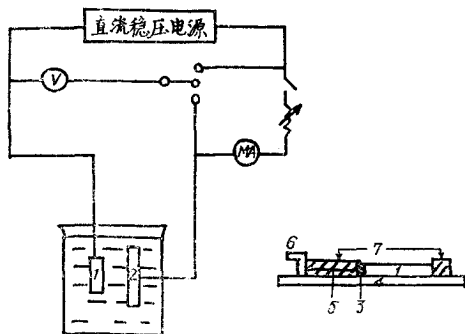


图 1 阳极氧化示意图

1—硅片; 2—白金片; 3—合金小球;  
4—有机玻璃板; 5—引线; 6—接线柱;  
7—真空黑漆

在阳极氧化过程中,为了均匀地去层,须注意下列几点:

(i) 硅片表面必须足够光滑、平整. 我们在扩散前先用 305 号金刚砂细磨硅片,然后用体积比为  $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:9$  的溶液腐蚀 15 分钟左右,以得到光滑的表面. 扩散过程中用二氧化硅保护表面.

(ii) 在阳极氧化时,我们将氧化部分以外的表面用封真空用的黑漆严密地保护起来(见图 1),以免溶液因表面张力而蔓延到电极上,使一部分电流不通过硅片而直接流向溶液.

(iii) 阳极氧化过程中要适当地控制电流密度及硅片在溶液中的位置,以减少附着在硅片上的气泡. 因为气泡下的氧化速度比其他的表面慢得多,因此气泡的附着,使氧化层的厚度变得不均匀.

阳极氧化后二氧化硅薄层的颜色比较均匀. 它与硅的去层厚度之间的对应关系可通过空气薄层的颜色与空气薄层厚度之间的对应关系<sup>[17]</sup>以及下列关系式来确定:

$$\text{硅的去层厚度} = \frac{\text{硅的原子量} \cdot \text{二氧化硅的密度} \cdot \text{空气薄膜的厚度}}{\text{二氧化硅的分子量} \cdot \text{硅的密度} \cdot \text{二氧化硅的折射率}} \quad (1)$$

但这样估计的结果是需要经过检验的,因为它忽略了光线由不同介质界面反射时相移的影响<sup>[18]</sup>. 同时阳极氧化所生长的二氧化硅的密度及折射率也须事先求得. 假设二氧化硅的密度为  $2.17\text{g}/\text{cm}^3$ , 折射率为 1.5, 硅的原子量为 28.08, 二氧化硅的分子量为 60.08, 硅的密度为  $2.33\text{g}/\text{cm}^3$ . 根据 (1) 式所求得的二氧化硅的颜色与硅的去层厚度的对应关系如表 1 所列.

硅的去层厚度与二氧化硅薄层之间的对应关系是可以直接测定的. 我们通过下述方法曾对颜色随厚度改变最灵敏的范围(去层厚度约为  $400\text{ \AA}$ )进行了测定:

(i) 称重法 用灵敏度为  $1\mu\text{g}$  的微量天平测量硅片在阳极氧化 100 次前后的重量之差,每次氧化膜的颜色保持一定,并精确地测出氧化面积.

$$\text{硅的去层厚度} = \frac{\text{阳极氧化 100 次前后硅片的重量之差}}{\text{硅的密度} \times \text{阳极氧化次数} \times \text{氧化面积}} \quad (2)$$

这样测得紫罗兰色的二氧化硅薄层对应于每次在硅片上去层厚度为  $410 \pm 20\text{ \AA}$ .

表 1

薄膜的顏色	空气薄膜的厚度 cm	硅的去层厚度 cm	薄膜的顏色	空气薄膜的厚度, cm	硅的去层厚度 cm
棕白	$1.00 \times 10^{-5}$	$0.29 \times 10^{-5}$	黄綠	$2.72 \times 10^{-5}$	$0.789 \times 10^{-5}$
亮棕	1.07	0.310	亮黄	2.82	0.818
暗棕	1.16	0.336	金黄	3.00	0.870
紅棕	1.24	0.360	桔黄	3.52	1.02
暗紫	1.29	0.370	紅	3.72	1.08
暗紫罗蓝	1.35	0.391	深紫	3.87	1.11
暗蓝	1.40	0.406	紫罗蓝	4.09	1.12
暗蓝到綠	1.64	0.476	蓝	4.35	1.26
亮蓝	2.35	0.682	亮蓝	4.65	1.35
暗淡的藍綠	2.45	0.711	发白的綠	4.90	1.42
暗綠	2.57	0.745			

(ii) 干涉法 在平滑的硅片上, 一边用封真空用的黑漆保护起来, 保护的边界必須很齐, 另一边进行阳极氧化及腐蝕去层。为了提高測量准确度, 我們曾重复地生长暗蓝色的二氧化硅及腐蝕去层二十次。然后洗掉黑漆, 用干涉仪測量黑漆边界处所形成的台阶高度<sup>[19]</sup>。

$$\text{硅的去层厚度} = \frac{\text{台阶高度}}{\text{阳极氧化次数}} \quad (3)$$

这样測得暗蓝色的二氧化硅层对应于每次去层厚度为  $480 \pm 30 \text{ \AA}$ 。

在这两种去层厚度的測定中, 都要求严密地保护边界, 保証边界附近的氧化均匀, 以得到精确的面积和合适的台阶。此外, 适当地降低氧化速度, 延长氧化时间也使二氧化硅薄层顏色的控制更为准确。

### 四探針測量扩散层面电导

我們所用的四探針測量方法是一般常用的直流方法, 如图 2 所示。外部一对探針通以电流  $I$ , 内部一对探針測量电压  $V$ , 并假設四探針排在一直綫上, 其間的距离分别为  $s_1, s_2$  和  $s_3$ 。如測量时滿足下列条件:

- (i) 扩散深度  $w \ll$  探針間距离  $s$ ;
- (ii) 探針电流不流过  $P-N$  結交界;
- (iii) 样品中非平衡載流子可以忽略;
- (iv) 探針与样品之間为点接触, 探針接触半径  $a \ll$  探針距离  $s$ ; 則扩散层面电导(見附录 1)

其中  $C$  为样品边界的修正因子<sup>[20]</sup>。

$$\sigma_s = \frac{I}{V} \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{s_2 + s_3}{s_1} \right) + \ln \left( \frac{s_1 + s_2}{s_3} \right) \right] \times C, \quad (4)$$

其中  $C$  为样品边界的修正因子<sup>[20]</sup>。

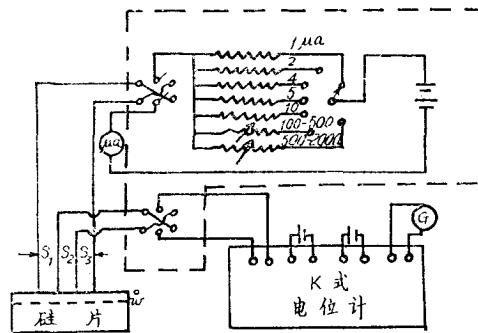


图 2 四探針測試示意图

用四探针测量扩散层面电导时,如以上假设在测量中都得到满足,并设探针电流  $I$  测量误差为  $\Delta I$ , 测量电压  $V$  的误差为  $\Delta V$ . 重复接触时,探针距离有所改变,令其改变分别为  $\Delta s_1, \Delta s_2$  和  $\Delta s_3$ . 此外,由于样品是有限的,而引入修正因子  $C$ ,若因样品位置的变化而引起修正因子的改变为  $\Delta C$ ,则扩散层面电导误差  $\Delta \sigma_s$  可由下式推算得到:

$$\Delta \sigma_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial I}\right)^2 \Delta I^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial V}\right)^2 \Delta V^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_1}\right)^2 \Delta s_1^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_2}\right)^2 \Delta s_2^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_3}\right)^2 \Delta s_3^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial C}\right)^2 \Delta C^2.} \quad (5)$$

由此可得扩散层面电导的相对误差

$$\frac{\Delta \sigma_s}{\sigma_s} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \frac{1}{\sigma_s^2} \times \left[\left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_1}\right)^2 \Delta s_1^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_2}\right)^2 \Delta s_2^2 + \left(\frac{\partial \sigma_s}{\partial s_3}\right)^2 \Delta s_3^2\right].} \quad (6)$$

若针距相等,针距改变为  $\Delta s$ ,则上式可简化为(见附录2)

$$\frac{\Delta \sigma_s}{\sigma_s} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \frac{3}{2(2\ln 2)^2} \left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2.} \quad (7)$$

如测量时不满足上述条件(iv),有关扩散层面电导的表达式(4)需按附录3修正.

为了减少扩散层面电导的误差,我们曾采取了以下各种措施:

(i) 保持探针电流恒定,在具体工作中以 180 伏干电池为电源. 串联了可调的高阻,使探针电流在可调范围  $1\mu\text{A}$ — $1\text{mA}$  内保持恒定;

(ii) 提高电压测量的准确度,我们用 K 式电位计及电流计常数为  $10^{-10}\text{A/mm}$  的灵敏电流计进行测量,以减小通过电压探针的电流. 使之既不改变硅片中的电位分布,又不会在高的探针接触电阻上产生电压误差. 由于电流计的灵敏度较高,所以需要保证探针之间电阻高于  $10^9 \Omega$ ,并把蓄电池用橡皮板垫起来以减小漏电.

(iii) 在制备针头时,尽量减小四个探针的前后与上下的差距,适当选择针尖之间的距离,以减小由于针距改变而引起的误差. 具体工作中用直径为  $260\mu\text{m}$  的钨丝在 10% 的 KOH 溶液中电解腐蚀,以得到  $25\mu\text{m}$  的针尖. 针尖排齐后即用水漆加以固定. 一般四个探针的前后或上下的差距约为  $10\mu\text{m}$  左右. 针尖之间距离选择  $800\mu\text{m}$ . 这样,一方面减小针距所引起的误差,同时也满足了推导(4)式所用的假设(i)与(iv).

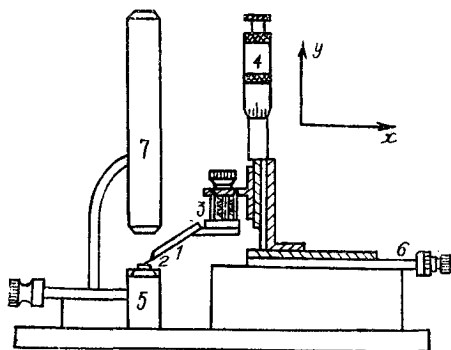


图3 四探针的微动装置示意图

1—四探针头; 2—硅片; 3—旋转针头的调节装置; 4—纵向调节; 5—样品台; 6—横向调节; 7—显微镜

(iv) 用微动装置调节针头,以保持良好稳定的接触,并避免硅片表面的刺伤及减小针尖的磨损. 所用的微动装置如图3所示. 四探针头 1 是斜着与硅片表面 2 接触的. 利用钨丝的弹性,可使过长的探针变弯一些,使四根探针与硅片同时接触,而不致于象垂直接触那样

易把硅片的表面及探針針尖磨損。通过旋轉調節部分 3 可使四探針頭繞  $x$  軸旋轉，使四根探針與硅片同時接觸。縱向的移動由一個螺旋測徑器改裝的微動裝置 4 調節。最小刻度為  $10 \mu\text{m}$ 。

針對上述的探針頭，樣品不宜太小，以免邊界的修正誤差太大。我們所用的樣品為  $5 \times 10 \times 1 \text{mm}^3$ 。在圖 4 所示的  $N$  型表面上進行四探針測量。這樣就可用絕緣邊界的鏡象公式<sup>[7,20]</sup>來計算邊界的修正因子。

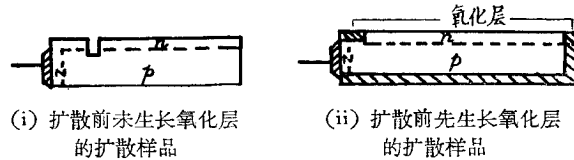


圖 4 扩散的样品

(v) 在測量扩散层面电导分布时，也应保持探針與樣品之間相對位置不變，以減小因邊界修正的改變而引起的誤差。我們一方面把樣品固定在樣品台 5 上，另一方面通过橫向微動裝置 6 調節針頭相對硅片的左右及前后位置。其最小刻度為  $100 \mu\text{m}$ 。圖 3 中 7 表示用以測量探針間距離的顯微鏡。

在推导(4)式時我們也曾假設了樣品中非平衡載流子是可以忽略不計的。也就是在測量中必須消除注射<sup>[21]</sup>及發熱的影響。為此，我們先改變探針電流  $I$ ，並測量探針電壓  $V$ ，測量  $I-V$  曲線，如圖 5 所示。由于注射及發熱會引起  $I-V$  曲線在探針電流增大時偏離綫性關係，所以應选取處於綫性範圍的探針電流。在實際測量杂质分布時，必須隨着樣品深度的增加而逐漸減小探針電流，以避免高阻層的發熱及注射的誤差。在結附近，常須把電流減小到  $1 \mu\text{a}$  左右。此外，室內的光綫也會影響結附近的測量，因而我們用鐵盒將四探針頭及硅片屏蔽起來。

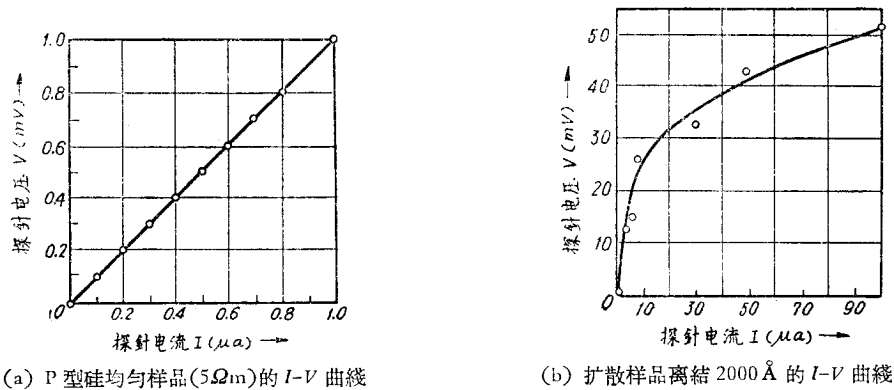


圖 5

用四探針及阳极氧化方法測量硅中精細杂质分布。1954 年 Fuller<sup>[6]</sup> 利用了四探針測量薄层电导的方法来求扩散法的杂质分布。假設扩散层为  $N$  型，扩散深度为  $w$ ，探針距离为  $s$ ，逐次去层厚度为  $\Delta l$ 。并假設  $\Delta l \ll w$  及  $w \ll s$ ，則在  $\Delta l$  层施主的平均浓度为

$$\bar{N}_D(l) = N_A^0 + \frac{1}{4.5e\mu(l)\Delta l} \left( \frac{I_2}{V_2} - \frac{I_1}{V_1} \right). \quad (8)$$

其中  $N_A^0$  为均匀的受主原始掺杂浓度;  $I$  和  $V$  分别代表探针电流和探针电压; 脚碼 1, 2 分别代表去层前后所测的量;  $e$  为电子电荷;  $\mu(l)$  为平均电子迁移率, 它是通过已知的迁移率与杂质浓度的对应关系以及一个试探性的杂质分布  $N_D(z)$  (如余误差函数) 推算得到的. 在 Fuller 的测量中,  $w$  为几十  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta l$  为  $1\mu\text{m}$  左右. 这样只能近似地估计杂质分布. 为了比较精细地求出薄层的扩散分布, 我们进行的测量方法与 Fuller 的方法主要有下列三点差别:

(i) 采用了阳极氧化精细去层技术.

(ii) 我们先画出扩散层面电导  $\sigma_s$  随样品深度  $z$  的变化曲线, 然后用图解法求曲线的斜率, 而得到电导率的分布, 即  $\sigma(z) = \frac{d\sigma_s(z)}{dz}$ .

(iii) 关于  $\mu(l)$  的确定, 我们并未采用任何试探性的杂质分布, 而是对应于直接测得的电导率及文献[4]所给出的电阻率与载流子浓度的对应关系, 以求得载流子浓度.

一般认为室温下硅中 III, V 族杂质已全部电离, 则在满足电中性假设的范围内, 可由载流子分布进一步推导出净杂质分布. 以 N 型半导体为例:

$$n = N_D - N_A, \quad (9)$$

其中  $n$  为电子浓度;  $N_D$  为施主杂质浓度以及  $N_A$  为受主杂质浓度.

电导率的误差取决于去层的精细及均匀程度、扩散层面电导测量的准确度以及作图的误差, 而杂质分布的准确度还须考虑迁移率的误差.

利用阳极氧化去层, 并用四探针逐层地测量扩散层面电导, 对于扩散深度为  $0.3-5\mu\text{m}$  的硅片, 我们曾进行了多次的精细杂质分布测量. 实验结果表明, 阳极氧化去层后的表面是适宜于四探针测量的. 对于电阻率为  $5\Omega\text{cm}$  的均匀样品, 我们曾采用阳极氧化去层, 并用四探针测量杂质分布, 结果表明, 阳极氧化去层并不改变样品中的杂质浓度.

图 6 和图 7 分别绘出一块典型样品 A 的扩散层面电导分布及杂质分布. 扩散过程中

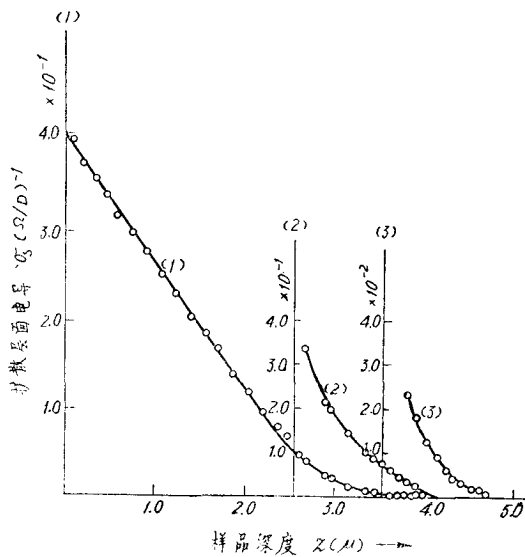


图 6 扩散样品的扩散层面电导随样品深度的变化曲线

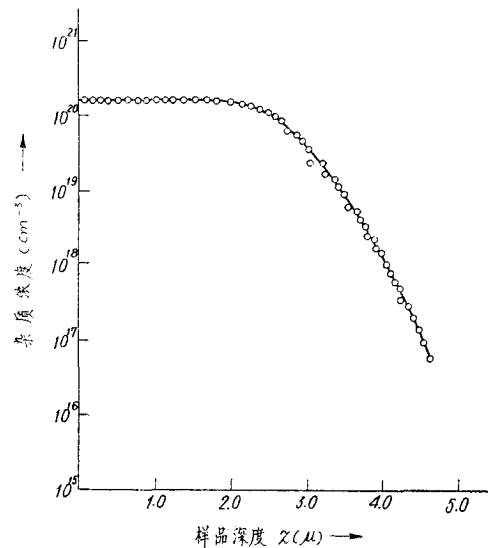


图 7 扩散样品的杂质分布

用以保护表面的氧化层需先用 HF 酸腐蝕几次,每次五分鐘左右,并用四探針測量扩散层面电导,直到腐蝕前后扩散层面电导不再改变,才开始阳极氧化去层,測定杂质分布。阳极氧化的綫路如图 1 所示。我們先求出在样品 A 上生长紫罗蓝色二氧化硅的阳极氧化条件,因为紫罗蓝色附近是顏色随厚度改变最灵敏的范围。具体的阳极氧化条件的实例如下:稳压电源电压为 60 伏,串联电阻为  $2k\Omega$ ,初始电流为 20ma,在 0.1M 四硼酸鈉-硼酸飽和溶液中氧化一分鐘,电流下降到 10ma,就得到紫罗蓝色的二氧化硅。每次去层厚度为  $410 \pm 30 \text{ \AA}$ 。从表面到离結  $1600 \text{ \AA}$  以前扩散层面电导誤差約为 3%。由于实验中观察到电流起伏和电压起伏引起的  $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1$  和  $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_2$  各約为 1%,探針間距离的測量誤差为  $20\mu\text{m}$ ,因而引入  $\left(\frac{\Delta s}{s}\right)_3$  为 2.5%。此外,探針相对样品位置改变 0.1mm 引起的  $\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_5$  为 1%。为了减小求扩散层面电导分布曲綫斜率的誤差,必須分段改变横坐标及纵坐标的单位,使曲綫的切綫与坐标軸的夹角接近于  $45^\circ$ 。从表面到离結約  $1600 \text{ \AA}$  满足电中性的范围内,如不計迁移率的誤差,并假設杂质已全部电离,則杂质分布的誤差約为 20%。

## 結 論

(i) 我們初步实现和掌握了在硅片上均匀阳极氧化的条件:氧化过程中須严密地保护电极,适当地选取阳极氧化电流密度和硅片在溶液中的取向,并保持样品的表面是平滑的。

为了每次得到界于  $300-1500 \text{ \AA}$  之間的去层,我們在 0.1M 四硼酸鈉-硼酸飽和溶液或硝酸溶液中,調节阳极氧化的电压、电流及時間,以得到一定顏色及厚度的二氧化硅,腐蝕后,即得到一定厚度的去层。厚度可通过二氧化硅薄层的顏色加以估計。利用阳极氧化也可以得到小于  $300 \text{ \AA}$  及大于  $1500 \text{ \AA}$  的去层。但去层厚度需直接測定,由于很薄的二氧化硅对可見光不起显著的干涉作用,而很厚的二氧化硅又会对几种波长的光同时干涉,使硅片呈灰白色,因此不能由顏色来确定厚度。

对于顏色随厚度改变最灵敏的范围,我們曾用称重法及干涉法檢驗了二氧化硅的顏色及去层厚度之間的对对应关系。

(ii) 通过四探針測量扩散层面电导的实际工作,考虑了測量中的誤差,并总结了减小誤差的几点措施:(1)用恆流方法减小探針电流的起伏;(2)适当調节探針电流,以避免注射,发热等所引起的誤差;(3)适当地选取探針間的距离(如  $800\mu\text{m}$ ),使之远大于針尖接触半径以及扩散层深度,并尽量将四根探針排列在一条直綫上,使探針与連綫間之距离远小于探針間的距离。另一方面通过精密的微动装置調节四探針与硅片的接触,以减小針距变化所引入的誤差,同时使探針与硅片之間保持良好的点接触;(4)适当选择样品的长度和寬度,使之大于針距  $s$ ,以减小边界修正誤差。具体的样品大小为  $5 \times 10 \times 1\text{mm}^3$ 。

(iii) 用阳极氧化及四探針測量扩散結杂质分布的技术是精細可靠的,每微米可測二十至三十个点,測量誤差一般約为 20%。誤差主要取决于扩散层面电导測量的准确度、去层的精細及均匀程度以及作图的誤差。在測量过程中須注意保持探針的針距及探針相对样品的位置固定不变。在表面浓掺杂区域,杂质是否全部电离以及迁移率与杂质种类,浓度的依賴关系还需要进一步确定。在結附近,因中性假設不成立,以上所述的技术不能

直接用来测量杂质分布。

李爱扶、顏福賢、解正奇、刘伯霞、沈世綱、于凤树等同志曾协助我們制备四探針头,扩散样品,进行干涉仪的測量。謹此致謝。

## 附 录 1

設扩散层为  $N$  型,表面为无限大平面,杂质沿  $z$  方向扩散,扩散深度为  $w$ ,則平衡时由于杂质分布  $N_D(z)$ ,在半导体內就形成了一个自建場  $\mathbf{E}_0$ ,自建电位分布为  $\varphi_0$ ,电荷分布为  $\rho_0$ 。

平衡时

$$\mathbf{j} = ne\mu\mathbf{E}_0 + eD_n\nabla n_0 = 0. \quad (1)$$

如我們选用柱坐标,則因为杂质分布的对称性,

$$\frac{\partial n_0}{\partial \gamma} = \frac{\partial n_0}{\partial \theta} = 0, \quad (2)$$

所以

$$E_{r_0} = E_{\theta_0} = 0. \quad (3)$$

而在  $z$  方向,在中性假設滿足的范围内,

$$E_{z_0} = -\frac{kT}{e} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial z} = -\frac{kT}{e} \frac{1}{N_D(z)} \frac{\partial N_D(z)}{\partial z}. \quad (4)$$

令表面上电位为零,則

$$\varphi_0 = -\int_{z=0}^z E_z dz = -\frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_D(0)}{N_D(z)} \right). \quad (5)$$

由泊松方程求得电荷分布

$$\rho_0(z) = \frac{\epsilon_0\epsilon_r kT}{e} \left[ \frac{1}{N_D^2(z)} \left( \frac{\partial N_D(z)}{\partial z} \right)^2 - \frac{1}{N_D(z)} \frac{\partial^2 N_D(z)}{\partial z^2} \right], \quad (6)$$

式中  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_0$  分別代表硅及真空的介电常数。

在扩散层表面上,如有一单独探針,通以电流  $I$ ,探針与样品的接触半径为  $a$ ,則在半导体內引入一个漂移場  $\mathbf{E}_1$ ,它与自建場  $\mathbf{E}_0$  迭加成总电場  $\mathbf{E}$ . 在注射可以忽略时,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \nabla \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_0) = \nabla \cdot \mathbf{E}_0 = \frac{\rho_0}{\epsilon_0\epsilon_r}. \quad (7)$$

由于  $\nabla \cdot \mathbf{E}_1 = 0$ , 則

$$E_r = C/r. \quad (8)$$

电流密度

$$\mathbf{j} = ne\mu\mathbf{E} + eD_n\nabla n. \quad (9)$$

在  $r \gg w$  及  $r \gg a$  的区域,

$$j_z = 0, \quad (10)$$

因此

$$E_{z1} = 0, \quad (11)$$

由于对称性,

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = 0, \quad E_\theta = 0, \quad j_\theta = 0. \quad (12)$$



当注射的影响可以忽略时,  $eD_n \frac{\partial n}{\partial r} \ll ne\mu E_r$ , 则

$$jr = ne\mu E_r, \quad (13)$$

因此如假设电流不流过  $P-N$  結交界, 则在  $r \gg \omega$  及  $r \gg a$  的区域, 总电流

$$I = \int_0^{2\pi} \int_0^\omega \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^\omega jr \cdot 2\pi r dz = \int_0^\omega ne\mu E_r 2\pi r dz. \quad (14)$$

将(8)式代入(14)式, 可得

$$I = 2\pi C \sigma_s, \quad \text{或} \quad C = I/2\pi\sigma_s, \quad (15)$$

其中

$$\sigma_s = \int_0^\omega ne\mu dz. \quad (16)$$

因此

$$\phi_1 = \int_{r_a}^r E_r dr = -\frac{I}{2\pi\sigma_s} \ln \frac{r}{r_a}. \quad (17)$$

若定  $r = r_a, z = 0$  的总电位  $\varphi = 0$ , 则总电位

$$\varphi = -\frac{I}{2\pi\sigma_s} \ln \frac{r}{r_a} + \varphi_0 = -\frac{I}{2\pi\sigma_s} \ln \frac{r}{r_a} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D(0)}{N_D(z)}. \quad (18)$$

当四根探針与硅片接触时, 电流  $I$  由探針 1 流入, 从探針 4 流出. 根据迭加原理可得离探針 1, 4 的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$  的某一点电位

$$\varphi_1 = -\frac{I}{2\pi\sigma_s} \ln \frac{r_1}{r_2}. \quad (19)$$

在电流探針之間用一对探針測量电压  $V$ , 当四探針在一条直线上, 其距离为  $s_1, s_2$  和  $s_3$ , 则可得扩散层面电导

$$\sigma_s = \frac{I}{\pi} \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{s_1 + s_2}{s_3} \right) + \ln \left( \frac{s_2 + s_3}{s_1} \right) \right]. \quad (20)$$

## 附 录 2

設探針針距的誤差分别为  $\Delta s_1, \Delta s_2$  和  $\Delta s_3$ , 則由于針距引入的扩散层面电导誤差

$$\Delta \sigma_s = \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \sigma_s}{\partial s_i} \right)^2 \Delta s_i^2 \right]^{1/2} = \frac{I}{2\pi V} \left\{ \left( \frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_1} \right)^2 \Delta s_1^2 + \left( \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_2 + s_3} \right)^2 \Delta s_2^2 + \left( \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_3} \right)^2 \Delta s_3^2 \right\}^{1/2}. \quad (1)$$

若  $s_1 = s_2 = s_3 = s$ , 而且  $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \Delta s_3 = \Delta s$ , 則由上式簡化后得到

$$\frac{1}{\sigma_s^2} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \sigma_s}{\partial s_i} \right)^2 \Delta s_i^2 = \frac{3}{8 \cdot (\ln 2)^2} \left( \frac{\Delta s}{s} \right)^2. \quad (2)$$

## 附 录 3

設电流探針的接触半径为  $a$ , 电流探針之間距离为  $2b = s_1 + s_2 + s_3$ , 它們所引起的电位分布仍可等效地考虑为距离为  $2c$  的两条綫电流所引起的分布<sup>[22]</sup>:

$$b = c(K_1^2 + 1)/(K_1^2 - 1), \quad (1)$$

其中  $K_1 = \frac{b}{2a} + \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - 1}$ , 令  $\Delta = b - c = 2b/(1 + K_1^2)$ , 则

$$\sigma_s = \frac{I}{V} \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{s_2 + s_3 - \Delta}{s_1 - \Delta} \right) + \ln \left( \frac{s_1 + s_2 - \Delta}{s_3 - \Delta} \right) \right], \quad (2)$$

设  $s_1 = s_2 = s_3 = s$ , 则

$$\sigma_s = \frac{I}{\pi V} \ln \left( \frac{2s - \Delta}{s - \Delta} \right). \quad (3)$$

因此探针接触半径  $a$  由于磨损改变  $\Delta a$  引起扩散层面电导相对误差

$$\left( \frac{\Delta \sigma_s}{\sigma_s} \right)_a = \frac{1}{\sigma_s} \left( \frac{\partial \sigma_s}{\partial a} \right) \Delta a = \frac{1}{\ln 2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{2s - \Delta}{s - \Delta} \right)} \cdot \frac{s}{(2s - \Delta)(s - \Delta)} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial a} \right] \Delta a, \quad (4)$$

其中

$$\frac{\partial \Delta}{\partial a} = 2K_1 \left( \frac{b}{a(1 + K_1^2)} \right)^2 \left[ 1 + \frac{b}{2a \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - 1}} \right].$$

### 参 考 文 献

- [1] Backenstoss, G., *Bell Sys. Tech. J.*, **37** (1958), 699.
- [2] Veloric, H. S. and Greig, W. J., *R.C.A. Rev.*, **21** (1960), 437.
- [3] Cuttriss, D. B., *Bell Sys. Tech. J.*, **40** (1961), 509.
- [4] Irvin, J. C., *Bell Sys. Tech. J.*, **41** (1962), 387.
- [5] Dunlap, W. C., *Phys. Rev.*, **94** (1954), 1531.
- [6] Fuller, C. S. and Ditzenberger, J. A., *J.A.P.*, **27** (1956), 544.
- [7] Tannenbaum E., *Solid State Electronics*, **2** (1961), 123.
- [8] Болтакс Б. И. и Матвеева Н. Н., *ФТТ*, **4** (1962), 609.
- [9] Михайлова А. Н. и Касабов И. А., *ФТТ*, **4** (1962), 1671.
- [10] Михайлова А. Н., *ФТТ*, **4** (1962), 2992.
- [11] Pes, P. A. and (the late) Leibenhauf, B., *Solid State Electronics*, **5** (1962), 331.
- [12] 陈辰嘉、杨澄清、黄亨吉：磷通过热生长二氧化硅层在硅中的扩散，见本学报本期。
- [13] 颜福贤、刘伯霞、张厚明、黄 敏：磷在硅中扩散制成的平面二极管及其正向特性（曾在 1962 年物理学会主办的全国半导体年会上宣读）。
- [14] Guenterschulze, A. and Betz, H., *Elektrolytkon-densatoren M. Krayn.*, Berlin, 1937.
- [15] Schmidt, P. F. and Michel, W., *J. of Electrochem. Soc.*, **104** (1957), 230.
- [16] Zwerdling, S. and Sheff, S., *J. of Electrochem. Soc.*, **107** (1960), 338.
- [17] Rollett, J., *S. B. Akad. Wiss. Wien*, **77** (1878), 177.
- [18] Charlesby, A. and Polling, J. J., *Proc. Roy. Soc. (A)*, **227** (1954—55), 433.
- [19] 沈世纲、黄 敏、于凤树：关于热生长二氧化硅薄膜厚度的测量，见本学报本期。
- [20] Smits, F. M., *Bell Sys. Tech. J.*, **37** (1958), 711.
- [21] Hargreaves, J. K. and Millard, D., *B.J.A.P.*, **13** (1962), 231.
- [22] King, R. W. P., "Electromagnetic Engineering", Vol. 1, p. 437, McGraw-Hill Book Co. Inc., 1945.

## MEASUREMENT OF THE IMPURITY DISTRIBUTION OF DIFFUSED LAYERS IN SILICON BY THE FOUR-POINT PROBE AND THE ANODIC OXIDATION TECHNIQUE

LING SHU-LEN, HUANG CHAANG      SHU BIENG-HUA  
(*Department of Physics, Peking University*)      (*Academia Sinica*)

### ABSTRACT

Discussed in this paper are (1) the technique of removing thin layers of silicon by the anodic oxidation method; (2) the measurement of the sheet conductance of diffused layers in silicon by the four-point probe method; and (3) the measurement of impurity distribution of diffused layers in silicon by the four-point probe and the anodic oxidation technique.

Emphasis has been given to the practical aspects of the experimental techniques including the precautions to be taken to achieve uniform and thin (300—1500 Å) layer removals from the silicon surface by the anodic oxidation method; the methods to control and to check the thickness of the layer removal; the errors introduced in the sheet conductivity and in the impurity distribution measurements respectively; and the steps to be taken for error reduction.

For illustration, a typical example is given for the measurement of the impurity distribution of phosphorus diffusion into silicon. The diffusion depth is 4.9  $\mu\text{m}$ . Spacings between measurement points range from 400 Å to 1600 Å. The error for sheet conductivity measurement is estimated to be less than 3%, that for impurity distribution is estimated to be less than 20%. Problems that remain to be solved are briefly mentioned.