

绝缘边界对扩展电阻测量的影响

陈存礼

(南京大学物理系)

1981年1月6日收到

提 要

本文根据镜象法的原理,从理论上导出了不同情况下,直线形和圆形绝缘边界对扩展电阻测量影响的数学表达式,并用实验加以证实。在磨角的斜面上进行纵向杂质浓度分布的扩展电阻测量时,必须计及结附近绝缘边界的修正,以免导致错误。

一、引言

扩展电阻法因其具有极高的空间分辨率(可达 10^{-9} — 10^{-10}cm^3),是目前检测半导体材料中微区杂质分布的最灵敏的方法。探针头的结构不同,可以对不同样品进行测量。单探针适用于一般的硅单晶和同型衬底的外延片,对PN结或是多层结构则必须用双探针或三探针。

由于扩展电阻法能测量间距为 $5\mu\text{m}$ ^[1]的两点的杂质浓度变化,它是检测外延层或是扩散以后纵向杂质浓度分布的最有力手段之一。但是,在沿磨成微小角度的斜面上进行测量的过程中,由样品表面向PN结逐渐接近时,通常仅注意到不同深度的修正,而侧向绝缘边界的影响则很少考虑,以至于D'Avanzo等^[2]在磨角的斜面上和用逐层腐蚀的方法测量浅结的杂质浓度深度分布时,在结的附近得到了明显矛盾的结果。Morris等^[3]在用双探针进行扩展电阻测量时注意到了这个问题,但只给出了在他们的具体情况下(探针间距 $s = 600\mu\text{m}$,探针头与样品的接触半径 $a = 3\mu\text{m}$)的经验修正因子,而未给出普遍情况下的解析数学式。Abbasi等^[4]考虑到边界的影响,他们用等距的(探针间距 $s = 635\mu\text{m}$)三探针研究了绝缘边界对扩展电阻测量中分辨率的影响。然而这种等距的三探针头在机械结构上要求相当高。

我们用两根碳化钨针头作为主探针和一根普通针头作为副探针,做了一个扩展电阻三种模式(单探针、双探针和三探针)都可以测量的多用探针头,这在结构上较等距的三探针要简单得多。本文用这种多用探针头研究了绝缘边界对扩展电阻测量的影响。从理论上导出了不同情况下绝缘边界影响扩展电阻的普遍数学表达式,并用实验加以证实。

二、理 论

1. 两根主探针平行于直的绝缘边界的双探针和三探针测量

如图1所示,设探针的间距为 s ,与绝缘边界的距离为 x ,探针1、2与样品接触的圆

盘半径为 a 。电流 I 由探针 1 进入样品，由探针 2 流出，测量电压的电极是探针 1、2（双探针）和 1、3 或 2、3（三探针）。绝缘边界的影响是使电流源 1 和 2 在另一侧有一个等距离的映象 $1'$ 和 $2'$ 。

如果在厚度为 w 的薄层上，通电流的探针与样品接触的圆盘半径 $a \gg w$ ，则与圆盘中心相距为 r ($r > a$) 的任一点的径向电势梯度应满足

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho I}{2\pi r w} = -\frac{\rho_s l}{2\pi r}, \quad (1)$$

于是

$$V_r - V_0 = \frac{\rho_s l}{2\pi} \ln \frac{a}{r}. \quad (2)$$

式中 V_0 为接触圆盘处的电势， ρ_s 为样品的薄层电阻。如果样品具有恒定的薄层电阻，因而对双探针测量有

$$\Delta V_{II2} = V_1 - V_2 = 2 \frac{\rho_s l}{2\pi} \ln \left[\frac{s}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{s}{2x} \right)^2} \right]. \quad (3)$$

这样，1、2 间的扩展电阻应为

$$R_s(x)_{II2} = \frac{\Delta V_{II2}}{I} = 2 \frac{\rho_s l}{2\pi} \ln \left[\frac{s}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{s}{2x} \right)^2} \right]. \quad (4)$$

当 x 很大时，

$$R_s(x \rightarrow \infty)_{II2} = 2 \frac{\rho_s l}{2\pi} \ln \frac{s}{a}. \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5)，则有

$$\frac{R_s(x)_{II2}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{II2}} = 1 + \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{s}{2x} \right)^2 \right]}{2 \ln \frac{s}{a}}. \quad (6)$$

上式中的最后一项是绝缘边界对扩展电阻测量的影响。显然，在一定的 s 和 a 的情况下，离绝缘边界愈近，影响愈大，反之影响愈小。

对三探针测量，当副探针远离两根主探针时，可得 1 处和 2 处的扩展电阻为

$$\frac{R_s(x)_{II1}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{II1}} = \frac{R_s(x)_{II2}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{II2}} = 1 + \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{s}{2x} \right)^2 \right]}{2 \ln \frac{s}{a}}. \quad (7)$$

与式 (6) 完全一样。

2. 两根主探针垂直于直的绝缘边界的双探针和三探针测量

情况如图 2 所示，这时可导出

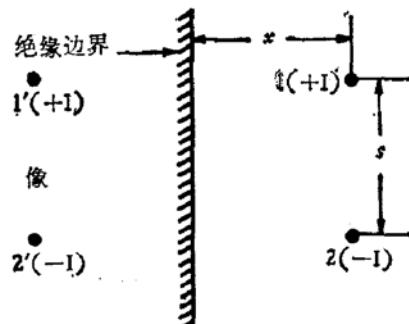


图 1

$$\frac{R_s(x)_{\perp_1}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_1}} = \frac{R_s(x)_{\perp_2}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_2}} = \frac{R_s(x)_{\perp_{12}}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_{12}}} = 1 + \frac{\ln \left[\frac{(s+2x)^2}{4x(x+s)} \right]}{2 \ln \frac{s}{a}}. \quad (8)$$

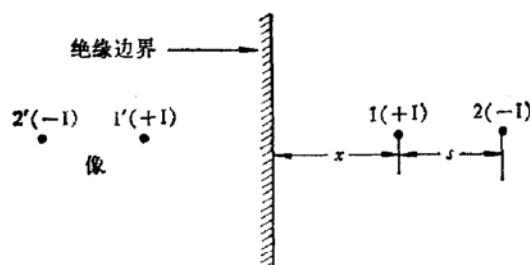


图 2

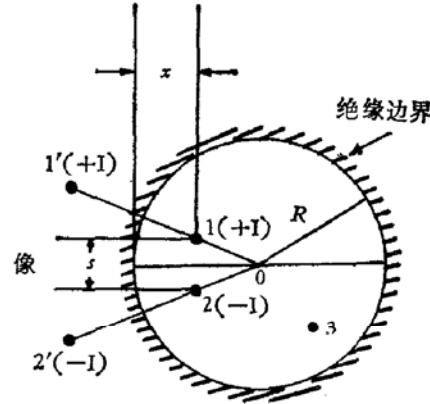


图 3

3. 两根主探针对称地垂直于圆形绝缘边界的直径的双探针和三探针测量

如图 3 所示, 设间距为 s 的两根探针 1 和 2 分别对称地置于圆形绝缘边界直径的上下两方, 它们到直径的距离均为 $\frac{s}{2}$, 其连线到该直径与圆周交点的距离为 x , 探针 1、2 与样品接触的圆盘半径为 a . 电流 I 由探针 1 进入样品, 由探针 2 流出, 测量电压的探针是 1、2 (双探针) 和 1、3 或 2、3 (三探针). 圆形绝缘边界的影响是使圆内的电流源 1 和 2 在圆外各有一个相应的映象 1' 和 2'. 1' 在 $\overline{O1}$ 的连线上, 离开圆心 0 的距离 $\overline{O1}'$ 为

$$\overline{O1}' = \frac{R^2}{01}. \quad (9)$$

2' 在 $\overline{O2}$ 的连线上, 离开圆心 0 的距离 $\overline{O2}'$ 为

$$\overline{O2}' = \frac{R^2}{02}. \quad (10)$$

式中 R 为圆形绝缘边界的半径.

根据式 (2), 在样品具有恒定的薄层电阻 ρ_s 的情况下, 有

$$\begin{aligned} \frac{R_s(x)_{0\perp_1}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_1}} &= \frac{R_s(x)_{0\perp_2}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_2}} = \frac{R_s(x)_{0\perp_{12}}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_{12}}} \\ &= \frac{\ln \left[\frac{s}{a} \sqrt{1 + \frac{R^2 s^2}{\left\{ R^2 - \left[(R-x)^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2 \right] \right\}^2}} \right]}{\ln \left[\frac{s}{a} \left(\frac{4R^2 + s^2}{4R^2 - s^2} \right) \right]}. \end{aligned} \quad (11)$$

4. 两根主探针位于圆形绝缘边界的直径上的双探针和三探针测量

情况如图 4 所示, 这时可导出

$$\begin{aligned}
 & \frac{R_s(x)_{0_1}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_1}} = \frac{R_s(x)_{0_1}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_1}} \\
 & = \frac{R_s(x)_{0_1}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_1}} \\
 & = \frac{\ln \left[\frac{s}{a} \sqrt{\frac{[R^2 - (R-x)(R-x-s)]^2}{[R^2 - (R-x)^2][R^2 - (R-x-s)^2]}} \right]}{\ln \left[\frac{s}{a} \left(\frac{4R^2 + s^2}{4R^2 - s^2} \right) \right]}
 \end{aligned}$$

(12)

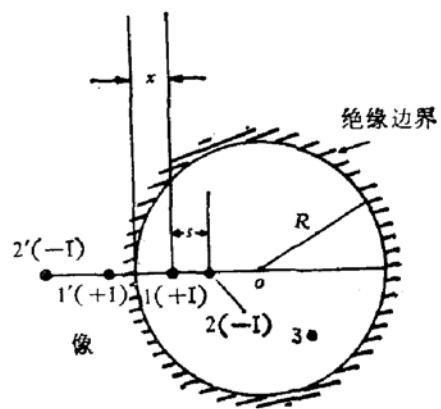


图 4

三、实 验

样品的制备是用平面工艺在硅片上做成具有直的和圆的绝缘边界的浅PN结。浅P型层上的薄层电阻 $\rho_s = 105\Omega/\square$, 浅N型层上的 $\rho_s = 50\Omega/\square$. 二者的均匀性都在 $\pm 2\%$

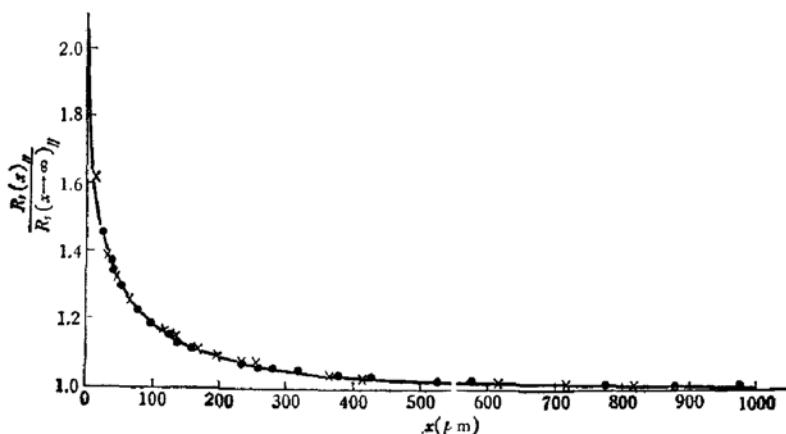


图 5 ——(6) 式
× 硼扩散 ($\rho_s = 105\Omega/\square$) ● 磷扩散 ($\rho_s = 50\Omega/\square$) $s = 495\mu\text{m}$, $a = 2.8\mu\text{m}$

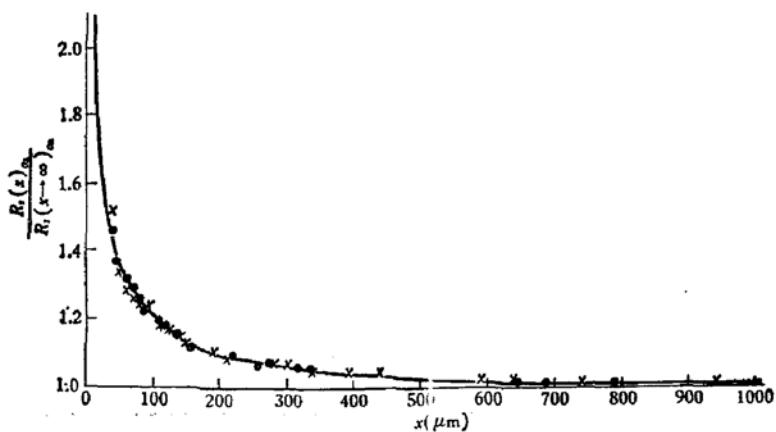


图 6 ——(11) 式
× 硼扩散 ($\rho_s = 105\Omega/\square$) ● 磷扩散 ($\rho_s = 50\Omega/\square$) $s = 495\mu\text{m}$, $a = 2.8\mu\text{m}$, $R = 3\text{mm}$

之内。测量时,对直的绝缘边界采用两根主探针平行于绝缘边界的形式,而对圆形的则采用两根主探针对称地垂直于圆形绝缘边界的直径的形式。两根主探针的间距 $s=495\mu\text{m}$, 探针与样品的接触半径 $a=2.8\mu\text{m}$ *。

所得结果示于图 5 和图 6 中。图 5 和图 6 中的实线分别是式(6)和式(11)的理论曲线。无论是直的绝缘边界还是圆形绝缘边界,扩硼后浅的 P 型层(“×”号)和扩磷后浅的 N 型层(“·”号)的扩展电阻在绝缘边界附近都明显增大,所有的实验点都与理论曲线非常接近。

四、讨 论

绝缘边界对扩展电阻的测量有明显的影响,在测量浅层样品的扩展电阻时,在绝缘边界附近必须进行修正。各种情况的修正列在表 1 中。

表 1*

离绝缘边界的距离 $x(\mu\text{m})$	情况 1 (6) 式	情况 2 (8) 式	情况 3 (11) 式	情况 4 (12) 式	较厚样品 (13) 式	较厚样品 (14) 式	较厚样品 (15) 式	较厚样品 (16) 式
1	2.0650	1.4661		1.4705				
5	1.7541	1.3129		1.3176				
10	1.6202	1.2488	2.1099($x=11\mu\text{m}$)	1.2535				
20	1.4868	1.1873	1.6214	1.1919	1.07	1.035		1.0361
30	1.4092	1.1533	1.4863	1.1578	1.047		1.0708	
40	1.3548	1.1306	1.4085	1.1348			1.0472	
50	1.3129	1.1138	1.3541	1.1179				
60	1.2794	1.1008	1.3125	1.1048				
80	1.2278	1.0818	1.2515	1.0854				
100	1.1897	1.0684	1.2079	1.0717				
120	1.1603	1.0584	1.1749	1.0614				
140	1.1369	1.0507	1.1491	1.0534				
160	1.1180	1.0445	1.1283	1.0470				
180	1.1026	1.0394	1.1115	1.0418				
200	1.0897	1.0353	1.0975	1.0375				
300	1.0502	1.0221	1.0546	1.0235				
400	1.0313	1.0153	1.0342	1.0162				
500	1.0212	1.0112	1.0230	1.0118				
600	1.0152	1.0086	1.0164	1.0089				
800	1.0088	1.0056	1.0093	1.0054				
1000	1.0057	1.0039	1.0057	1.0035				
∞	1.0000	1.0000	1.0000($x=R$)	1.0000 ($x=R-\frac{s}{2}$)				

* $s=495\mu\text{m}$, $a=2.8\mu\text{m}$, $R=3\text{mm}$

由表 1 看出,两根主探针平行于直的绝缘边界(也见图 5 中的实线)和两根主探针对称地垂直于圆形绝缘边界的直径(也见图 6 中的实线),这两种情况的浅层对扩展电阻测

* 经标准样品(ρ 在 $10^{-2}-10\Omega\text{cm}$)校准后推算出的值。

量的影响最大。在离开绝缘边界 20—30 μm 时，扩展电阻竟增大 50%，在 180—200 μm 时，仍达到 10%，到了 300—400 μm 时才降至 5% 以下。特别是圆形绝缘边界，半径愈小，影响愈为显著，这是不容忽视的。

两根主探针垂直于直的绝缘边界和两根主探针位于圆形绝缘边界的直径上这两种情况的影响则较小。当离开绝缘边界 60 μm 时，才有 10% 的影响，到 140 μm 已降至 5% 了。

对于较厚的有均匀薄层电阻的样品，绝缘边界对扩展电阻测量的影响则很小，因为扩展电阻随探针距离变化的关系已不是对数函数了。当两根主探针平行于直的绝缘边界，且副探针远离两根主探针时，可导出

$$\frac{R_s(x)_{\parallel_1}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\parallel_1}} = \frac{R_s(x)_{\parallel_2}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\parallel_2}} = \frac{R_s(x)_{\parallel_{12}}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\parallel_{12}}} = 1 + \frac{a}{2x} (a \ll s). \quad (13)$$

当两根主探针垂直于直的绝缘边界，且副探针远离两根主探针时，则可导出

$$\frac{R_s(x)_{\perp_1}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_1}} = \frac{R_s(x)_{\perp_2}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_2}} = \frac{R_s(x)_{\perp_{12}}}{R_s(x \rightarrow \infty)_{\perp_{12}}} = 1 + \frac{a}{4x} (a \ll s). \quad (14)$$

当两根主探针对称地垂直于圆形绝缘边界的直径，且副探针远离两根主探针时，则可导出

$$\begin{aligned} \frac{R_s(x)_{0\perp_1}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_1}} &= \frac{R_s(x)_{0\perp_2}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_2}} = \frac{R_s(x)_{0\perp_{12}}}{R_s(x \rightarrow R)_{0\perp_{12}}} \\ &= 1 + \frac{a \sqrt{(R-x)^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}}{R^2 - (R-x)^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} (a \ll s). \end{aligned} \quad (15)$$

当两根主探针位于圆形绝缘边界的直径上，且副探针远离两根主探针时，则可导出

$$\begin{aligned} \frac{R_s(x)_{0_1}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_1}} &= \frac{R_s(x)_{0_2}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_2}} = \frac{R_s(x)_{0_{12}}}{R_s\left(x \rightarrow R - \frac{s}{2}\right)_{0_{12}}} \\ &= 1 + \frac{a(R-x)}{2[R^2 - (R-x)^2]} + \frac{a(R-x-s)}{2[R^2 - (R-x-s)^2]} (a \ll s). \end{aligned} \quad (16)$$

(13)式、(14)式、(15)式和(16)式四种情况的修正也列在表 1 中。可以看到，一般在离绝缘边界 20—30 μm 时，影响已不到 5%，即使在影响最大的情况下，亦即两根主探针对称地垂直于圆形绝缘边界的直径形式，也不过在距离 40 μm 时就小于 5% 了。

由于绝缘边界对浅层样品扩展电阻测量的影响很大，因而在磨角的斜面上测量纵向杂质浓度分布时，不仅要进行不同深度的修正，还要考虑侧向绝缘边界的影响，只有在适当的修正之后，才会得到正确的结果。在对选择扩散、选择外延或是离子注入等所有的浅层小样品上作扩展电阻测量时，同样必须要作计及绝缘边界的修正，以免导致错误。

工作中得到本校理化中心陈强同志的协助，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. Murgai, H. C. Gatos and W. A. Westdrop. *J. Electrochem. Soc.*, **50**, 2240 (1979).

-
- [2] D. C. D'Avanzo, R. D. Rung and R. W. Dation, Spreading resistance for impurity profiles, Technical Report 5013-2, Stanford Electronics Laboratories Stanford University, Stanford, California, (1977).
 - [3] B. L. Morris, P. H. Langer and J. C. White Jr., NBS Special publication, 400-10, 63 (1974).
 - [4] S. A. Abbasi and A. Brunnenschweiler, *Electronics Letters*, 15, 290 (1979).

Effect of Insulating Edge on Spreading-Resistance Measurements

Chen Cunli

(*Department of Physics, Nanjing University*)

Abstract

The equations expressing the effect of both straight and circular insulating edge on spreading-resistance measurements in various cases have been derived theoretically according to the principle of mirror image method, and have also been verified by experiments. While measuring the depth profile of impurity concentrations on bevelled slices, the corrections of insulating edge near the junctions should be taken into account in order not to make errors.