

实验 四探针法测量半导体电阻率及薄层电阻

电阻率是半导体材料的重要参数之一。单晶材料的电阻率与半导体器件的性能有着十分密切的关系，如晶体管的击穿电压等参数就是直接与硅单晶的电阻率有关。电阻率的测量方法很多，如三探针法、霍尔效应法、扩展电阻法等。四探针法则是一种广泛采用的标准方法，其主要优点在于设备简单，操作方便，精确度高，对样品的几何尺寸无严格要求。除了用四探针法测量材料电阻率以外，在器件生产中广泛使用四探针法来测量扩散层薄层电阻以判断扩散层质量是否符合设计要求。

实验目的及任务是掌握四探针测量半导体材料电阻率和薄层电阻的测量原理及方法；针对不同几何尺寸的样品，掌握其修正方法；测试给定的三块不同规格样品数据，使用 EXCEL 软件对样品的数据进行计算和处理，如电阻率、方块电阻、标准差、不均匀度，画出电阻率波动图。最后用热探针判别材料导电类型。

一、实验原理

1. 半导体材料的电阻率

在半无穷大样品上的点电流源，若样品的电阻率 ρ 均匀，引入点电流源的探针其电流强度为 I ，则所产生的电力线具有球面的对称性，即等位面为一系列以点电流为中心的半球面，如图 2-1 所示。在以 r 为半径的半球面上，电流密度 j 的分布是均匀的：

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2-1)$$

若 E 为 r 处的电场强度，则

$$E = j\rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2-2)$$

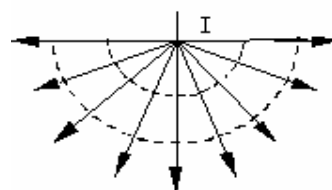


图 2.1 半无穷大样品点电流源的半球等位面

由电场强度和电位梯度以及球面对称关系，则

$$E = -\frac{d\psi}{dr} \quad (2-3)$$

$$d\psi = -E dr = -\frac{I\rho}{2\pi r^2} dr \quad (2-4)$$

取 r 为无穷远处的电位为零，则

$$\int_0^{\psi(r)} d\psi = \int_{\infty}^r -E dr = \frac{-I\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} \quad (2-5)$$

$$\therefore \psi(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2-6)$$

上式就是半无穷大均匀样品上离开点电流源距离为 r 的点的电位与探针流过的电流和样品电阻率的关系式，它代表了一个点电流源对距离 r 处点的电势的贡献。

对于图 2-2 所示的情形，四根探针位于样品中央，电流从探针 1 流入，从探针 4 流出，则可将 1 和 4 探针认为是点电流源，由 (2-6) 式可知，2 和 3 探针的电位为

$$\psi_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{24}} \right)$$

$$\psi_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{34}} \right)$$

2、3 探针的电位差为：

$$V_{23} = \psi_2 - \psi_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{24}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{34}} \right) \quad (2-7)$$

由此可得出样品的电阻率为：

$$\rho = \frac{2\pi V_{23}}{I} \left(\frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{24}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{34}} \right)^{-1} \quad (2-8)$$

(2-8) 式就是利用直流四探针法测量电阻率的普遍公式。我们只需测出流过 1 4 探针的电流 I 以及 2 3 探针间的电位差 V_{23} ，代入四根探针的间距，就可以求出该样品的电阻率 ρ 。

实际测量中，最常用的是直线型四探针，即四根探针的针尖位于同一直线上，并且间距相等，如图 2.3 所示。设 $r_{12} = r_{23} = r_{34} = S$ ，则有：

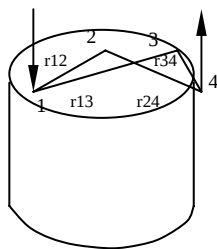


图 2-2 任意位置的四探针

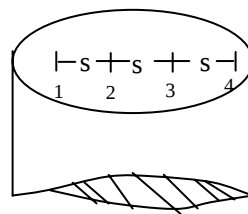


图 2-3 直线型四探针

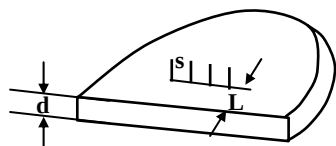
$$\rho = \frac{V_{23}}{I} 2\pi s \quad (2-9)$$

2-9 式就是常见的直流四探针（等间距）测量电阻率的公式，也是本实验要用的测量公式之一。需要指出的是：这一公式是在半无限大样品的基础上导出的，实用中必需满足样品厚度及边缘与探针之间的最近距离大于四倍探针间距，这样才能使该式具有足够的精确度。

如果被测样品不是半无穷大，而是厚度，横向尺寸一定，这时利用四探针法测量电阻率时，就不能直接采用公式 (2-9)，进一步的分析表明，在四探针法中只要对 (2-9) 式引入适当的修正系数 B_0 即可，此时：

$$\rho = \frac{2\pi S}{B_0} \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (2-10)$$

B_0 的数值，与样品的尺寸及所处的条件有关，为便于查找，已列表格，见表 2.1、2.2。



$$\rho = \frac{2\pi S}{B_0} \cdot \frac{V}{I}$$

$L/S/B_0$ S/d	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
0.0	2.000	1.9661	1.8764	1.5198	1.1890	1.0379	1.0029	1.0004
0.1	2.002	1.97	1.88	1.52	1.19	1.040	1.004	1.0017
0.2	2.016	1.98	1.89	1.53	1.20	1.052	1.014	1.0094
0.5	2.188	2.15	2.06	1.70	1.35	1.176	1.109	1.0977
1.0	3.009	2.97	2.87	2.45	1.98	1.667	1.534	1.512
2.0	5.560	5.49	5.34	4.61	3.72	3.104	2.838	2.795
5.0	13.863	13.72	13.32	11.51	9.28	7.744	7.078	6.969
10.0	27.726	27.43	26.71	23.03	18.56	15.49	14.156	13.938

说明：样品为片状单晶，四探针针尖所连成的直线与样品一个边界平行，距离为 L ，除样品厚度及该边界外，其余周界均为无穷远，样品周围为绝缘介质包围。

另一种情况是极薄样品，它是指样品厚度 d 比探针间距小很多，

而横向尺寸为无穷大的样品，如图 2.4 所示，这时从探针 1 流入和从探针 4 流出的电流，其等位面近似为圆柱面（高为 d 。任一等位面的半径设为 r ），类似于上面对半无穷大样品的推导，很容易得出当 $r_{12}=r_{23}=r_{34}=S$ 时，

极薄样品的电阻率为：

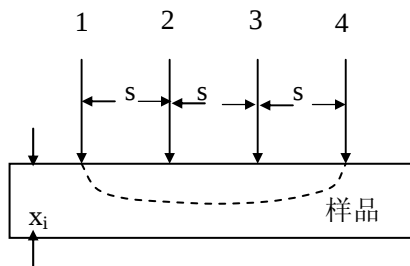
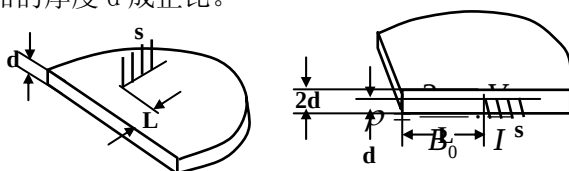


图 2-4 极薄样品电阻率的测量

$$\rho = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) d \frac{V_{23}}{I} = 4.5324 d \frac{V_{23}}{I} \quad (2-11)$$

(2-11) 式说明：对于极薄样品，在等间距探针情况下、探针间距和测量结果无关，电阻率和被测样品的厚度 d 成正比。

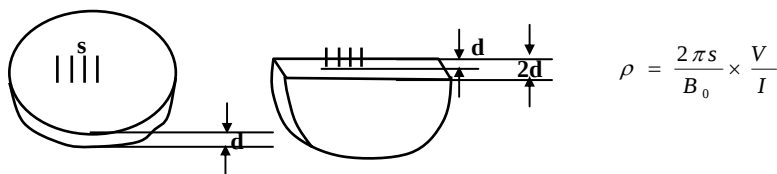


$\frac{L/s}{B_0}$ s/d	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	∞
0.0	1.4500	1.3330	1.2555	1.1333	1.0595	1.0194	1.0028	1.0005	1.0000
0.1	1.4501	1.3331	1.2556	1.1335	1.0597	1.0198	1.0035	1.0015	1.0009
0.2	1.4519	1.3352	1.2579	1.1364	1.0637	1.0255	1.0107	1.0084	1.0070
0.5	1.5285	1.4163	1.3476	1.2307	1.1648	1.1263	1.1029	1.0967	1.0939
1.0	2.0335	1.9255	1.8526	1.7294	1.6380	1.5690	1.5225	1.5102	1.5045
2.0	3.7236	3.5660	3.4486	3.2262	3.0470	2.9090	2.8160	2.7913	2.7799
5.0	9.2185	8.8943	8.6025	8.0472	7.5991	7.2542	7.0216	6.9600	6.9315
10.0	18.5630	17.7886	17.2050	16.0944	15.1983	14.5083	14.0431	13.9199	13.8629

说明：样品为片状单晶，四探针针尖所连成的直线与样品一个边界垂直，探针与该边界的最近距离为L，除样品厚度及该边界外，其余周界为无穷远，样品周围为绝缘介质包围。同样需要注意的是当片状样品不满足极薄样品的条件时，仍需按式(2.10)计算电阻率P。其修正系数 B_0 列在表2.3中。

2. 扩散层的薄层电阻

半导体工艺中普遍采用四探针法测量扩散层的薄层电阻，由于反向pn结的隔离作用，扩散层下的衬底可视为绝缘层，对于扩散层厚度(即结深 X_j)远小于探针间距S，而横向尺寸无限大的样品，则薄层电阻率为：



s/d	B_0	s/d	B_0	s/d	B_0
0.1	1.0009	0.6	1.1512	1.2	1.7329
0.2	1.0070	0.7	1.2225	1.4	1.9809
0.3	1.0227	0.8	1.3062	1.6	2.2410
0.4	1.0511	0.9	1.4008	1.8	2.5083
0.5	1.0939	1.0	1.5045	2.0	2.7799
				2.5	3.4674

说明：样品为片状单晶，除样品厚度外，样品尺寸相对探针间距为无穷大，四探针垂直于样品表面测试，或垂直于样品侧面测试

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot X_j \cdot \frac{V_{23}}{I} = 4.5324 X_j \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (2-12)$$

实际工作中，直接测量扩散层的薄层电阻，又称方块电阻，其定义就是表面为正方形的半导体薄层，在电流方向所呈现的电阻，见图2.5。

所以
$$R_s = \rho \frac{I}{I \cdot X_j} = \frac{\rho}{X_j} \quad (2-13)$$

因此，2.12 式变为

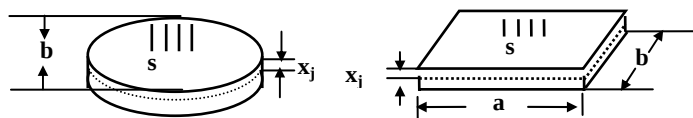
$$R_s = \frac{\rho}{X_j} = 4.5324 \frac{V_{23}}{I} \quad (2-14)$$

实际的扩散片尺寸一般不很大，不满足 2.14 的要求并且实际的扩散片又有单面扩散与双面扩散之分，因此，需要对 2.14 式进行修正，修正后的公式为：

$$R_s = B_0 \frac{V_{23}}{I} \quad (2-15)$$

式中 B_0 为修正系数，其值见表 2.4、表 2.5

表 2.4 单面扩散样品薄层电阻修正系数



$$R_s = B_0 \frac{V}{I} \quad \rho = B_0 \frac{V}{I} X_j \quad \frac{X_j}{S} < 0.5$$

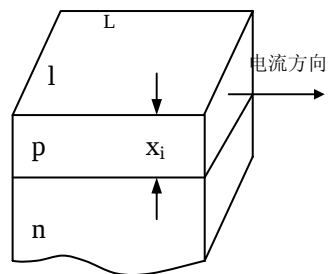


图 2-5 薄层电阻示意图

$\frac{b}{s}$	圆	长方形			
		$\frac{a}{b} = 1$	$\frac{a}{b} = 2$	$\frac{a}{b} = 3$	$\frac{a}{b} \geq 4$
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2248
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9454	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.5416	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

说明： 四探针的中心点在样品的中心

表 2.5 双面扩散样品薄层电阻的修正系数

$$R_s = B_0 \frac{V}{I} \quad \rho = B_0 \frac{V}{I} X_J$$

$$\frac{X_J}{S} < 0.5 \quad X_J < \frac{d}{2}$$

$\frac{b+d}{s}$	圆	长 方 形			
		$\frac{a+d}{b+d} = 1$	$\frac{a+d}{b+d} = 2$	$\frac{a+d}{b+d} = 3$	$\frac{a+d}{b+d} \geq 4$
1.0				1.9976	1.9497
1.25				2.3741	2.3550
1.5			2.9575	2.7113	2.7010
1.75			3.1596	2.9953	2.9887
2.0			3.3381	3.2295	3.2248
2.5			3.6408	3.5778	3.5751
3.0	4.5324	4.9124	3.8543	3.8127	3.8109
4.0	4.5324	4.6477	4.1118	4.0899	4.0888
5.0	4.5324	4.5790	4.2504	4.2362	4.2356
7.5	4.5324	4.5415	4.4008	4.3946	4.3943
10.0	4.5324	4.5353	4.4571	4.4536	4.4535
15.0	4.5324	4.5329	4.4985	4.4969	4.4969
20.0	4.5324	4.5326	4.5132	4.5124	4.5124
40.0	4.5324	4.5325	4.5275	4.5273	4.5273
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

说明： 四探针的中心点在样品的中心

测试装置主要由四探针头，直流恒流源，电位差计和检流计等组成。对四探针头的要求是：导电性能好，质硬耐磨，针尖的曲率半径 $25\text{--}50\mu\text{m}$ ，四根探针要固定且等距排列在一条直线上，其间距通常为 1mm ，探针与被测样品间的压力一般为 20 牛顿。恒流源的输出电流要稳定且可调，能提供从微安级到几十毫安的电流。电位差计是采用补偿法测微小电压的仪器，其优点是当调节平衡后，测量线路和被测线路间都无电流流过。也可以用输入阻抗很高的多位数字电压表，如 $5\frac{1}{2}$ 数字表测量电压及取样电流。另需一个温度计确定环境温度并修正标准电池电势。实验测试装置如图 2.6 所示。

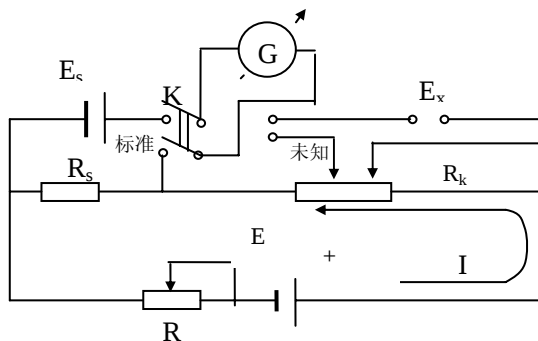


图 2-6 实用电位差计原理

二、实验内容

1. 对给定的 3 个不同尺寸样品分别测量其电阻率、方块电阻值；
2. 对同一样品，测量五个不同的点，由此求出单晶断面电阻率不均匀度。
3. 对单面扩散和双面扩散的样品，分别测量其薄层电阻 R。
4. 参考附录一，用阳极氧化剥层法求扩散层中的杂质浓度分布(选作)。
5. 参考附录二，用冷热探针法判断半导体材料的导电类型(选作)。

三、实验步骤

1. 按要求接好测量线路。
2. 如果用电位差计测量，则按标准电池修正公式计算该温度下的电位差。
3. 将被测样品表面用金钢砂研磨(单晶硅样品)，用去离子水冲洗后，再用酒精棉球擦洗干净，晾干。处理后就可以获得新磨的测试面，以使探针和样品实现较好的欧姆接触。
注意：操作中保持样品清洁，不要用手触摸样品表面。
4. 用恒流源对被测样品加以一定的电流，利用已较好的电位差计测出 V_{23} ，(或用数字电压表测读)记录有关数据。测试中采用正向、反向测试以减少误差。
5. 用千分尺及读数显微镜测量样品的几何尺寸，决定是否进行修正。
6. 观察光照对样品测试结果的影响。

四、实验数据处理和分析

1. 给定 3 个样品，各测量 10 个不同点，用 EXCEL 计算(修正)电阻率、方块电阻及标准差，画出电阻率的波动图。
2. 在不同电流而测量点相同情况下的电阻率测量，计算(修正)同点电流不同时的电阻率、方块电阻值。
3. 单晶断面电阻率不均匀度 E 的计算公式为：

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} \times 100\% \approx \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\frac{1}{2}(\rho_{\max} + \rho_{\min})} \times 100\% \quad (2-16)$$

式中 $\rho_{\max}$ 为所测五个点中电阻率的最大值， $\rho_{\min}$ 为所测点中电阻率的最小值， ρ 为断面测量点电阻率平均值， $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min}$ ，用(16)式计算所测样品的断面电阻率不均匀度 E。画出电阻率波动图。

4. 计算扩散情况不同的样品的薄层电阻。

五、思考题

1. 分析电阻率误差的来源，指出 $\rho = 2\pi S \frac{V}{I}$ 和 $\rho = \frac{2\pi S}{B_0} \cdot \frac{V}{I}$ 的区别及条件各是什么？
2. 为什么要用四探针测量？如果只用两根探针既作电流探针又作电压探针，这样是否能够对样品进行较为准确的测量？为什么？

六、注意问题

1. 为增加表面复合，减少少子寿命及避免少子注入，被测表面需粗磨或喷砂处理。

2. 对高阻及光敏材料，由于光电导及光压效应会影响测量，这时应在暗室进行。
3. 电流要选择适当，电流太小影响电压检测精度，电流太大会引起发热或非平衡载流子注入，不同样品的电阻率范围测量电流的选择见表 2.6。

表 2.6 不同电阻率样品测试电流值

电阻率 $\Omega \text{ cm}$	0.01	0.01-1	1-30	30-1000	1000-3000
电流 mA	< 100	< 10	< 1	< 0.1	0.01

4. 半导体材料的电阻率受温度的影响十分敏感，因此，必须在样品达到热平衡情况下进行测量并记录测量温度。
5. 由于正向探针有少子注入及探针移动的存在，所以在测量中总是进行正反两个电流方向的测量，然后取其平均以减小误差。

七、参考资料

- (1) 孙以材编著：半导体测试技术，冶金工业出版社，1984。
- (2) 谢孟贤、刘国维编：半导体工艺原理，上册，国防工业出版社，1980。
- (3) 孙恒慧、包宗明主编：半导体物理实验，高等教育出版社，1985。

附录 1 用热探针判断半导体材料导电类型

热探针法是利用温差电效应来测量判断半导体材料的导电类型简易方法。方法是在一块材料上压入两根探针，其中一根为冷探针（冷端），它的温度为室温；另一根为热探针（其探针用电阻丝采用无感绕法加热，探针和电阻丝之间用云母片或氧化铝陶瓷绝缘子隔开），热探针为热端，如附图 2.1 所示。电阻丝加热功率约 10~25W，冷、热探针的温差保持在 30℃~40℃即可，半导体中温差电势的产生可由能带理论解释，可参考有关资料。附图 2.2 和图 2.3 给出了 P 型和 n 型样品中温差电动势产生的情形，对于 P 型样品，热端空穴向冷端扩散，冷端带正电，热端带负电，而 n 型样品，多子是电子，热端电子的热运动速度大，从而热端到冷端形成电子扩散流，热端的电子浓度比冷端电子浓度低，因而带正电。

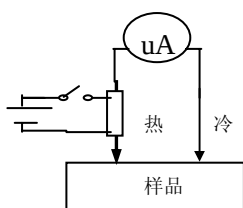


图 2-1

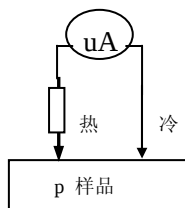


图 2-2

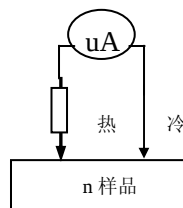


图 2-3

需要注意的是判断材料类型前，应先用已知导电类型的样品进行校验。测量时应选用 $10^2 \Omega \text{ cm}$ 以下的样品，探针与样品接触时必须给予一定的压力。

附录 2 用 EXCEL 数据处理表：（数据表仅限于填入 16K 纸大小的表中）

