

# 硅片方块电阻计量标准装置研制

郭守君 王 酣 赵 飞

(中国电子技术标准化研究院 北京 100176)

**摘 要:**对测量方块电阻的双配置四探针法进行了研究,从理论上分析了该方法的优点:测量结果与探针间距无关,可使用不等间距探针头,具有自动修正边界影响的功能,不必寻找修正因子,论述了 $R_s$ 大小样片及边界附近的测试原理,给出了 $R_s$ 的计算公式。研制了基于双配置四探针法的硅片方块电阻计量标准装置,论述了该装置的软硬件设计,为校准硅片方块电阻标准样片提供了技术手段。解决了硅片方块电阻参数的量值传递问题。

**关键词:**方块电阻;双配置四探针法;计量标准装置

**中图分类号:** TN3      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Develop on the measurement standard device of silicon sheet resistance

Guo Shoujun Wang Han Zhao Fei

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176, China)

**Abstract:** The author has conducted a research on the dual-configuration four-probe method of sheet resistance' measurement, analyzing its advantages on the basis of theories. The measurement result is not affected by the probe spacing, and hence probes with different spacing can be used. It can revise the effect caused by borderline. There is no need seeking for correction factor. With this method, the author has elaborated the  $R_{s\text{sample}}$  as well as testing principle of near borderline, stating the calculation formula of  $R_s$ . At the same time, the author has developed the measurement standard device of Silicon sheet resistance based on the dual-configuration four-probe method and discoursed on the software and hardware design of this device, providing technological methods for the alignment on the standard samples of Silicon sheet resistance and solving the problem of quantity transmission of Silicon sheet resistance parameter.

**Keywords:** sheet resistance; dual-configuration four-point probe method; measurement standard device

### 1 引 言

随着科技的进步,微电子技术的发展可以说日新月异,电路的集成化程度也越来越高,电路的功能也越来越强大,对制作集成电路的各种半导体芯片的质量的要求也越来越高。方块电阻参数是与芯片制作工艺过程相关的重要参数,方块电阻参数不仅影响材料特性而且影响器件特性,方块电阻参数的准确测量已经成为保障器件性能的关键因素。本标准装置研制的目的是解决量值传递问题,保证芯片生产线上该参数测量的准确可靠。

### 2 方块电阻测量方法间的对比

#### 2.1 常规四探针方法

传统四探针方法的原理如图1所示,局限于 $I_{14}$ 和 $V_{23}$

单一状态,它要求探针间距相等,被测物较小或探针在边界附近,需做几何测量继而进行边界修正,造成不便且有时难以保证准确度。<sup>[1]</sup>

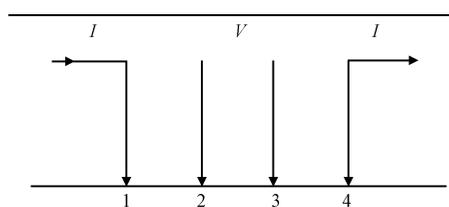


图1 常规四探针方法

#### 2.2 双配置四探针法

所谓双配置四探针法是指让电流先后通过不同的探针对,测量相应另外两针间电压,进行组合,按相关的公式

收稿日期:2016-07

求出方块电阻值,如图2所示。这时几何影响消失,针距和边界的负面效应将不存在,四探针将实现“自我修正”,误差减小。

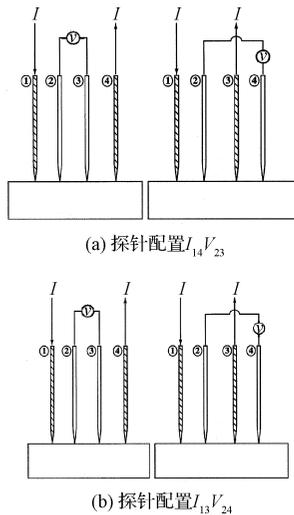


图2 双配置法的两次探针配置  $I_{14}V_{23}$  和  $I_{13}V_{24}$  组合

2.2.1 样片无穷大,探针头处在某一位置<sup>[2]</sup>

先以图2(b)的配置为例,根据物理基础和电学原理,当电流通过1和3探针时,2和4探针的电位分别为:

$$\psi_2 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_2}{S_1}$$

$$\psi_4 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3}$$

2和4探针间电压为:

$$V_{24} = \psi_2 - \psi_4 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (1)$$

$$\text{令 } R_b = \frac{V_{24}}{I_{13}} = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3}$$

或写成下式:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) = \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (2)$$

当电流通过1和4探针时,同理有:

$$V_{23} = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \ln \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (3)$$

$$\text{令 } R_a = \frac{V_{23}}{I_{14}} = \frac{R_s}{2\pi} \ln \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3}$$

或写成下式:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_a}{R_s}\right) = \frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \quad (4)$$

(4)-(2)式:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_a}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) =$$

$$\frac{(S_2 + S_1)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} - \frac{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1 S_3} = \frac{S_1 S_2 + S_2^2 + S_1 S_3 + S_2 S_3 - S_1 S_2 - S_2^2 - S_2 S_3}{S_1 S_3} = 1$$

得到具有关键意义的理论式:

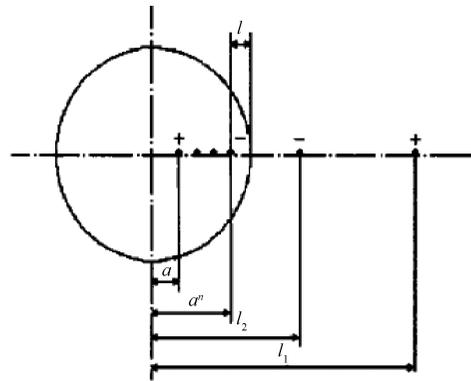
$$\exp\left(\frac{2\pi R_a}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) = 1 \quad (5)$$

该式说明  $R_s$  只取决于  $R_a$  和  $R_b$ ,与探针间距无关。针距相等与否对  $R_s$  的结果不产生任何影响。

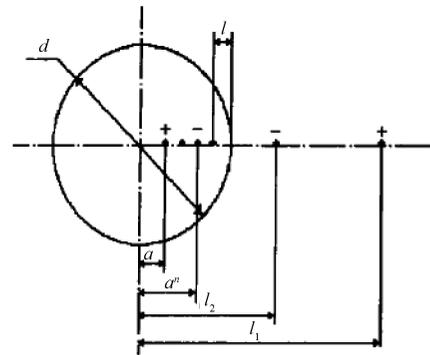
式(5)代表了双配置四探针技术的基本原理,具有普遍规律的属性,即对于圆形或矩形小尺寸样片或探针靠近较大样片边界时,它们也都成立。它们的突出特点是与几何因素无关,只要测出  $R_a$  和  $R_b$ ,就能计算出  $R_s$ 。

2.2.2 探针靠近边界

考虑探针头沿半径偏向于样片某一侧边界如图3所示。



(a)当探针配置为  $I_{14}V_{23}$  时



(b)当探针配置为  $I_{13}V_{24}$  时

图3 探针靠近圆片边界

设样片直径为  $d$ ,最外一个探针距边缘为  $l$ ,若用  $r$  表示半径,则  $a = r - (S_1 + S_2 + S_3 + l)$ ,  $a' = r - (S_3 + l)$ ,  $a'' = r - l$ , 于是:

$$l_1 = \frac{d^2}{4a} = \frac{r^2}{r - S_1 - S_2 - S_3 - l} \quad (6)$$

$$l_2 = \frac{d^2}{4a'} = \frac{r^2}{r - S_3 - l} \quad (7)$$

$$l_3 = \frac{d^2}{4a''} = \frac{r^2}{r - l} \quad (8)$$

当电流通过1和3探针时,2和4探针电位分别为:

$$\psi_2 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \left( \ln \frac{S_2}{S_1} + \ln \frac{l_2 - r + S_2 + S_3 + l}{l_1 - r + S_2 + S_3 + l} \right) \quad (9)$$

$$\psi_4 = \frac{R_s I_{13}}{2\pi} \left( \ln \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3} + \ln \frac{l_2 - r + l}{l_1 - r + l} \right) \quad (10)$$

2和4探针间的电压:

$$V_{24} = \psi_2 - \psi_4 =$$

$$\frac{R_s I_{13}}{2\pi} \ln \left[ \frac{S_2(l_2 - r + S_2 + S_3 + l)(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \times \frac{(l_1 - r + l)}{S_3(l_2 - r + l)} \right] \quad (11)$$

$$\exp\left(\frac{2\pi R_s}{R_s}\right) =$$

$$\frac{S_2(l_2 - r + S_2 + S_3 + l)(S_1 + S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \times \frac{(l_1 - r + l)}{S_3(l_2 - r + l)} \quad (12)$$

当电流通过1和4探针时,2和3探针电位是:

$$\psi_2 = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \left( \ln \frac{S_2 + S_3}{S_1} + \ln \frac{l_3 - r + S_2 + S_3 + l}{l_1 - r + S_2 + S_3 + l} \right)$$

$$\psi_3 = \frac{R_s I_{14}}{2\pi} \left( \ln \frac{S_3}{S_1 + S_2} + \ln \frac{l_3 - r + S_3 + l}{l_1 - r + S_3 + l} \right)$$

同理  $V_{23} = \psi_2 - \psi_3$ , 经整理后得:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_s}{R_s}\right) = \frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_1(l_1 - r + S_2 + S_3 + l)} \times \frac{(l_3 - r + S_2 + S_3 + l)(l_1 - r + S_3 + l)}{S_3(l_3 - r + S_3 + l)} \quad (13)$$

完成(13)-(12)式后得到:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_s}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) = 1$$

可见探针在圆片边界时式(5)仍然成立。

如果探针是在直线边界附近,且探针连线垂直于边界线,如图4所示,对这种双配置模式仍然得到:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_s}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) = 1$$

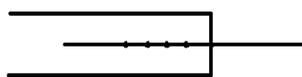


图4 探针靠近直边界

### 2.2.3 样片无穷大,探针头处在某一位置

小样片,矩形长  $a$  宽  $d$ ,探针放在中心位置,样片周围介质为空气,为满足电场边界条件,用无限镜像阵列原理分析后得到:

$$\exp\left(\frac{2\pi R_s}{R_s}\right) - \exp\left(\frac{2\pi R_b}{R_s}\right) = Y_1 = 1 + \frac{(1+2Aa)[MshA(S_2 + S_3)shA(S_1 + S_2) - RshAS_2shA(S_1 + S_2 + S_3)]}{2Aae^{2\pi}shAS_1shAS_3} \quad (14)$$

式中:  $A = \frac{\pi}{d}$ ;

$$L = ch2AS_1 + ch2AS_3 - ch2A(S_1 - S_3) - 1;$$

$$M = ch2A(S_2 + S_3) + ch2A(S_1 + S_2) - ch2AS_3 - ch2AS_1;$$

$$R = ch2A(S_2 + S_3) + ch2A(S_1 + S_2) - ch2A(S_1 - S_3) - 1。$$

演算结果为:

$$Y_1 = 1 \quad (15)$$

并用计算机进行运算,取一系列不同的  $S_1, S_2, S_3$  和  $a, d$  值( $S_1, S_2, S_3$  可相等或不相等,  $a \times d$  最小为  $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  或  $5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  等)代入上述公式,结果得到  $Y_1 = 1$  仍成立。双配置四探针法对小矩形片也适用。无限镜像阵列原理是常规法中计算小片边界修正因子的基本理论,周围介质不同,镜像分布也各异,介电常数均不出现在最终计算式。 $Y_1 - 1 = 0$  证明该理论用于双配置四探针法是成功的。必须指出,有限元算法与无限镜像原理结论相同。

对于小圆片,设探针头位于中心,可以证明(15)式也是成立的。当双配置四探针法用于测试小圆形或矩形片时,更能显示出其优越性,不必像常规法那样测几何尺寸和查找修正因子。直接用式(5)求  $R_s$  很困难,通过数学上的变换得出以下3个实用计算式:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} (R_a + R_b) f_1 \left( \frac{R_a}{R_b} \right) \quad (16)$$

式中:  $f_1(R_a/R_b)$  是辅助函数,其理论表达式如下:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\frac{\ln 2}{f_1} + arsh[2^{-(\frac{R_a}{R_b})}]}{\frac{\ln 2}{f_1} - arsh[2^{-(\frac{R_a}{R_b})}]} \quad (17)$$

式(17)是超越函数,很难直接运用,可以用计算机得出相应的拟合多项式如下:

$$f_1(R_a/R_b) = -9.08825(R_a/R_b)^4 + 46.9213(R_a/R_b)^3 - 91.5654(R_a/R_b)^2 + 80.8353(R_a/R_b) - 26.8805 \quad (18)$$

适用于  $R_a/R_b = 1.1 \sim 1.34$  范围内。

与理论式(17)相比,这个多项式给出的  $f$  函数,数据误差小于万分之一。可以按理论式预先计算出  $f$  函数数据表存入电脑中随时调用。总之,只要测量出  $R_a$  和  $R_b$  就能直接得到  $R_s$  值。

### 2.3 双配置四探针法突出优点

1) 测试结果  $R_s$  与探针距离  $S_1, S_2, S_3$  无关,能克服探针间距不等及难以避免的针尖横向游移的影响,允许使用不等间距探针头。

2) 对小尺寸的圆形、矩形被测片,或探针位于较大样片边缘附近可直接使用上述各式,不需做几何测量和边界修正,减小了误差。

结合硅片方块电阻样片的特点,采用双配置四探针法对硅片方块电阻样片进行校准。这个方法比“单配置四探针法”优越的原因是它利用电流探针、电压探针的变换,进行两次电测量,能显著降低被测样片边界效应等因素对测量结果的影响,从而可以提高标定样片时的测量不确定度。

### 3 标准装置的设计

#### 3.1 双配置四探针方块电阻的计算方法<sup>[3]</sup>

标准样片方块电阻的计算方法,如公式(19)和公式(20)所示。

$$R_s = \frac{V}{I} K_a F_T F(t/S) \quad (19)$$

式中: $R_s$ 是硅片的方块电阻; $V/I$ 是第一次配置时,测得的电压与电流的比值; $F(t/S)$ 是厚度 $t$ 与探针间距 $S$ 比因数; $F_T$ 是相对基准温度为23摄氏度的修正系数; $K_a$ 是依据两次配置计算出的系数。

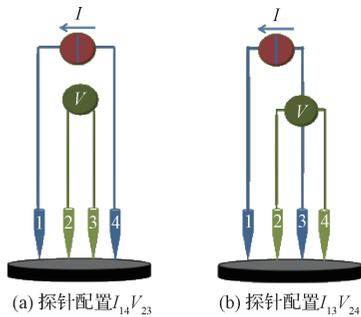
$$K_a = -14.696 + 25.173 \left(\frac{R_a}{R_b}\right) - 7.872 \left(\frac{R_a}{R_b}\right)^2 \quad (20)$$

式中: $R_a$ 是第一次配置时,测得的电压与电流的比值, $R_b$ 是第二次配置时,测得的电压与电流的比值。

#### 3.2 双配置四探针方块电阻测量方法

双配置四探针方块电阻测量原理如图1所示,通过两次配置主要目的是实现公式(19)中的 $V/I$ 以及公式(20)中 $R_a$ 和 $R_b$ 等相关参数的测量。

第一次配置的原理如图5(a)所示,电流源通过1#探针和4#探针对硅片施加电流,纳伏表通过2#探针和3#探针测量硅片上的电压。通过这次配置主要目的是实现公式(19)中的 $V/I$ 以及公式(20)中 $R_a$ 等相关参数的测量。



双配置四探针方块电阻测量方法的原理

第二次配置的原理如图5(b)所示,电流源通过1#探针和3#探针对硅片施加电流,纳伏表通过2#探针和4#探针测量硅片上的电压。通过这次配置主要目的是实现公式(20)中 $R_b$ 相关参数的测量。

#### 3.3 硅片方块电阻计量标准装置的组成

硅片方块电阻计量标准装置的组成包括:工控机、软件、控制开关、GPIB卡、电流源、纳伏表、测温仪、铂电阻、测试头、四探针、测量台、位移台、支架、屏蔽罩和接触式硅片测厚仪等。

### 4 主要部件的设计

#### 4.1 位移台的研制<sup>[4]</sup>

在测量硅片方块电阻时遇到的问题:

1)测量硅片的四探针是直线型的,硅片为圆形,要测量硅片中心点的方块电阻,这个直线型的四探针需要多次过硅片中心点以不同的角度测量方块电阻;

2)需要测量硅片中心点周边微小区域的方块电阻;

3)控制四探针的抬起和落下。

为了解决这些问题,本装置通过设计位移台来实现。

位移台的设计是采用三轴控制技术,三轴分别是水平旋转轴(控制角度)、水平移动轴(控制半径方向位移)和垂直移动轴(控制垂直方向位移)。实现四探针与硅片的测量点定位的工作原理是,通过角度和半径的控制可以找到硅片上的测量点,通过垂直方向移动可以控制四探针的抬起和落下。

位移台的组成如图6所示,各部件的名称及其功能如表1所示。

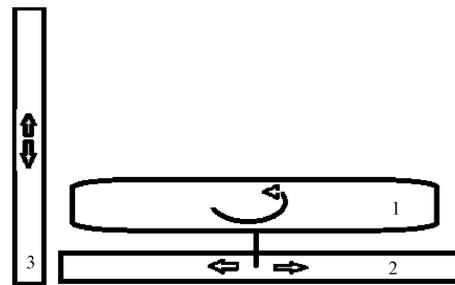


图6 位移台的组成

表1 位移台各部件的名称及其功能

部件编号	部件名称	部件功能	部件组成
1	水平旋转台	控制平台旋转的角度 $\theta$	水平旋转台、手动操作手柄和角度刻度圈
2	水平滑台	控制平台在半径方向的移动位移 $R$	平移导轨、手动操作手柄和水平标尺
3	垂直滑台	控制平台在垂直方向的移动位移 $H$	立柱、升降滑轨机构、直臂和探针头套筒

#### 4.2 测量台的研制<sup>[5]</sup>

测量台的组成如图7所示,各个部件的名称及其功能如表2所示。

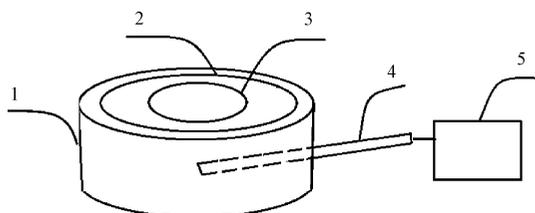


图7 测量台的组成

表2 测量台各部件的名称及其功能

部件编号	部件名称	部件功能
1	铜板	放置硅片和提供保温
2	云母片	保障硅片与铜板间的电绝缘
3	硅片固定装置	固定硅片
4	铂电阻	测量硅片温度
5	测温仪	显示温度

### 5 软件设计

本硅片方块电阻计量标准装置软件的设计主要分为人机交互界面、数据采集和数据查询3大功能模块。系统的开发主要是为了使测量结果更加精确、快速,省去人工进行繁杂公式的计算,操作更加简便,数据分析结果一目了然,提高工作效率,便于历史数据的保存和查询。

#### 5.1 人机交互界面设计<sup>[6]</sup>

人机交互界面流程如图8所示。运行测量软件,软件自动检测接口,界面分为:参数设置区、图形及方案选择区、功能按键区、参数显示区、测量结果显示区和分析值显示区。

运行软件后,首先设置测量参数,并进行测量方案选择,选择测量方案将显示相应的测量点分布图形,确认设置无误后,点击功能按键区的“测量”按键,即发送测量信号,数据接收正常即显示相应的测量电压及结果,数据有误将弹出窗口提示错误内容,处理后继续测量,最后显示测量结果及分析值,测量结果自动保存至数据库,一次测量结束。再点击“测量”,测量过程重复进行。

#### 5.2 数据采集<sup>[7]</sup>

数据采集模块组成如图9所示,该模块又细分为基本参数设置、选点方案及图形显示、实时采集电压及其平均值显示、实时测量参数显示、实时测量结果显示和实时测量结果分析显示等子模块。这些子模块分别实现其对应

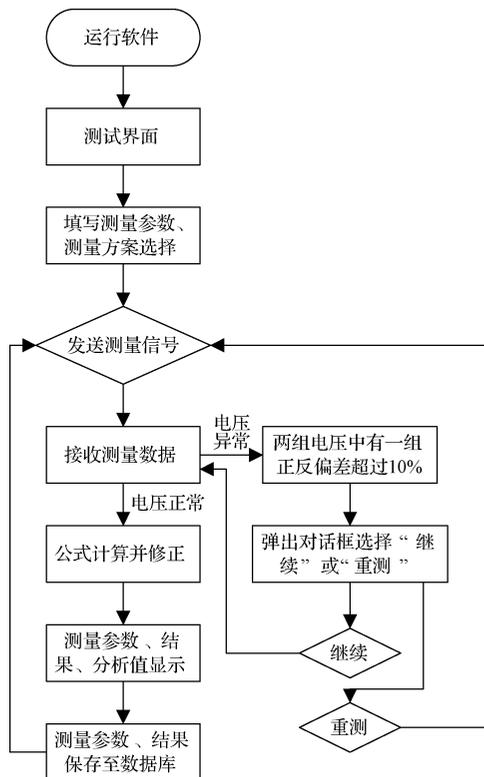


图8 人机交互界面

的功能。提供简洁、易懂的数据采集系统操作界面,使操作更加人性化。

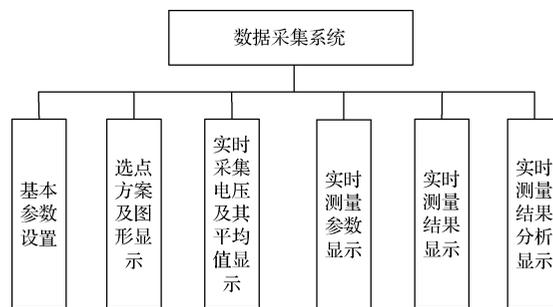


图9 数据采集模块组成

#### 5.3 数据查询<sup>[10]</sup>

数据查询模块组成如图10所示,该模块又分为按操作人员信息查询、按硅片编号查询、按起始日期查询、可将不需要的数据从数据库中删除、数据导出到文件、查询数据结果显示和查询相应硅片编号结果分析显示等子模块。这些子模块实现了历史数据查询、历史数据显示、历史数据删除和历史数据导出到Excel文件等功能。

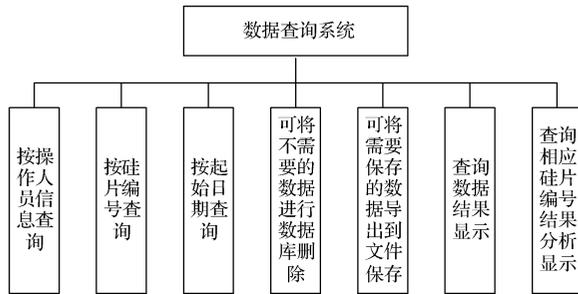


图 10 数据查询模块组成

## 6 结 论

对测量方块电阻的双配置四探针法进行了研究, 研究表明双配置四探针法优于传统的四探针法。双配置四探针法解决了传统的四探针法常遇到的探针间距不等、边界效应影响、修正因子不准等难题, 提高了测量不确定度。基于双配置四探针法研制了硅片方块电阻计量标准装置, 保障了硅片方块电阻标准样片量值的准确可靠。

### 参 考 文 献

- [1] 郭荣斌, 赵秀才. 自动测试系统的发展趋势[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 1-4
- [2] 宿昌厚, 鲁效明. 双电测组合法测试半导体电阻率的研究[J]. 半导体学报, 2003, 24(3): 298-306.

(上接第 37 页)

- [14] 万书亭, 李永刚. 转子绕组短路故障中短路因素对转子振动的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 131-134.
- [15] 陈小玄, 罗大庸, 单勇腾. 小波分析在转子绕组匝间短路故障诊断中的应用[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(2): 143-147.

- [3] 王琨, 晏敏, 黄会雄, 等. 半导体材料电阻率与导电类型测试仪的研制[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(9): 1-3.
- [4] 孔令荣, 王昊, 庄涛. 高精度采集系统研究与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 122-127.
- [5] LI Q G, HAN Q SH, PENG B Y, et al. The research of contour error compensation control for X-C non-circular grinding in polar coordinates[J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 29-37.
- [6] 王志永, 刘威, 曾韬, 等. 螺旋锥齿轮大轮齿形误差的在机测量[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1047-1053.
- [7] 彭利荣, 王东方, 马占龙, 等. 三坐标检测光学元件曲率半径的误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1235-1241.
- [8] 吴俊生. 方块电阻测试仪校准方法的探讨[J]. 计量与测试技术, 2005, 32(6): 7-8.
- [9] 谢鸿波. 方块电阻测试仪的智能化方案[J]. 真空, 2009, 46(5): 77-81.
- [10] 杜忠明, 熊飞娇. 多晶硅片氧化前后方块电阻的变化实验研究[J]. 电源技术, 2011, 35(6): 670-672.

### 作 者 简 介

郭守君, 男, 硕士研究生, 高工, 测试计量技术及仪器方向, 主要研究方向为电子仪器仪表的系统集成和计量检测。  
E-mail: guosj@cesi.cn

### 作 者 简 介

韩建群, 1968 年出生, 工学博士, 主要研究方向为混沌控制与通信。  
E-mail: hanjianqun@126.com