

Characteristics for Resistivity in Micro-Areas on Large-Scale Silicon Slices

Bing Sun^{1*}, Jing'ai Qi², Jinyong Gao², Xiujun Zhang²

¹Tianjin Institute of Metrological Supervision Testing, Tianjin

²Hebei University of Technology, Tianjin

Email: *sychebut@126.com, qh_meng@tju.edu.cn

Received: Oct. 13th, 2012; revised: Nov. 13th, 2012; accepted: Dec. 4th, 2012

Abstract: The improved Van der Pauw method and Rymazewski method, *i.e.*, the contacts at the edge and the linear four-point probe in the original methods are replaced by square four-point probes, are introduced to measure the resistivity in micro-areas of silicon slices with large diameters. The charts for resistivity distribution on the silicon slices are plotted by classifying the measured data with the grey-level method and fuzzy mathematics. The plotted charts have been used to give engineers an instruction to make IC and to grow mono-crystal ingots with good achievements.

Keywords: Square Four-Point Probe; Resistivity Measurement in Micro-Areas; Van der Pauw and Rymazewski Methods; Data Processing

大直径硅片微区电阻率的表征

孙冰^{1*}, 齐景爱², 高金雍², 张秀军²

¹天津计量监督检测科学研究院, 天津

²河北工业大学, 天津

Email: *sychebut@126.com, qh_meng@tju.edu.cn

收稿日期: 2012年10月13日; 修回日期: 2012年11月13日; 录用日期: 2012年12月4日

摘要: 介绍了改进的范德堡法和鲁美采夫斯基法, 即此时用方形四探针分别替代边缘的触点和直线四探针, 在大直径硅片上进行微区电阻率的测量。我们采用灰度法和模糊数学分类测得数据, 并将它们分别在硅片上绘制出电阻率分布图。所得大型硅片上电阻率分布图已用于指导工程技术人员的集成电路生产和单晶锭生长, 取得了较好的效果。

关键词: 方形四探针; 微区电阻率测试; 范德堡和鲁美采夫斯基法; 数据的处理

1. 引言

随着计算机的不断更新换代, 存储容量不断增长, 作为其基础原件的集成电路已由超大规模向甚大规模阶段发展。图形日益细微化, 电路尺寸也不断缩小, 线宽已从微米级缩小到亚微米级。目前在 $11 \times 11 \text{ mm}^2$ 芯片上已能集成几千万个元件^[1]。这一方面要求圆片直径不断增大以提高生产率, 目前, 已提高到 300

mm 或以上; 另一方面对晶体的完美性、机械及电特性提出了更为严格的要求, 特别是微区的电学特性及其均匀性更引起了人们的关注。微区的电学特性对二极管的反向饱和电流、晶体管的饱和压降、反向耐压、晶体管的放大倍数、MOS 电容器耗尽层弛豫时间、GaAs 器件阈值分散性、化合物半导体计量比一致性等都有重大影响^[1]。所谓“微区电阻率的表征”就是在大型硅或 GaAs 片上绘制出电阻率的分布图。

国内外都开展了微区电学参数分布测试研究, 可

*通讯作者。

得到全片的电阻率分布，这就是所谓 Mapping 技术。国内少数单位也开展了这一技术，取得了很好的效果。范德堡法^[2]可以应用于任何形状样品，但要求将触点制备在样品的边缘，故不能直接应用于微区测定^[1]。扩展电阻法^[1]虽然可分辨 10 μm 微区的电阻率，但要求大面积欧姆接触，而且要求样品是体样品，因此也不适合微区测定。美国国家标准局推荐的标准测试结构^[1]，虽然可应用微区薄层电阻的测定，但要求从样品伸出四个等长臂，在臂的末端制备四个大的金属化电极以放置探针，因此测量区就被扩大到 100 μm 以上，而且关于臂的长宽合适比又存在两种截然相反的观点。其它许多关于边缘效应的修正都要求精确知道探针与样品的相对几何位置，对微样品很难作这种测定，因而达不到修正的目的。

我们利用改进的范德堡法微区薄层电阻测试探针技术对扩散片进行微区薄层电阻的测量，获得其分布，可用于评价材料的质量、改进工艺。常规的四探针法可分辨约 3 倍间距区域的电阻率不均匀性，为保证探针刚性一般需毫米直径的探针，因此竖直四探针不能用于微区测定。常规直线四探针的 Rymaszewski 法^[1,3]对无限大样品、探针的游移、不等距不影响测量结果，但对有限尺寸样品，当探针偏离中心对称位置时边缘效应有影响，可测微区尺寸以容纳下探针为前提。

在硅片上绘制出电阻率分布图涉及到等值线的连接^[1]。等值线主要有等高线图、等压线图、等温线图(水温 and 气温)、等降水量图、地层年龄等值，等等。一般来说，等值线上无梯度面而等值线的法向梯度最大。等值线不能相交，但可以构成封闭圈。绘制等值线目前有许多软件可以应用，例如 Matlab 软件系统和 Sufer 软件系统，另外还有自行开发的软件。利用计算机绘制等值线时，一般要首先生成网格，确定格点上的物理量值；寻找等值线的起点，计算等值线与网格的交点；最后将等值线与网格的交点连接成一条比较平滑的曲线。目前，这些方法都认为网格点上的物理量值是严格正确的，利用这些基础值画出等值线，等值线通常与网格相交，如图 1 左所示。因此绘制等值线实际上是利用网格点上的数值计算网格中的等值点的坐标方法。等值线分析的一般规则：

- 1) 同一条等值线上，要数值处处相等；
- 2) 等值线一侧的数值须高于另一侧的数值；

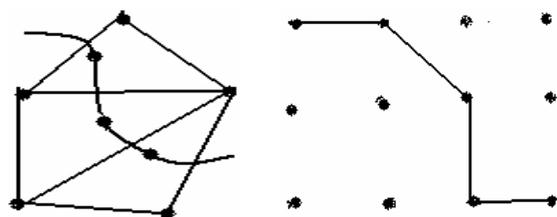


Figure 1. Two methods to draw lines with equi-values (left-through points in a grid, right-through the diagonal or grids)
图 1. 两种画等值线的方法(左: 通过网格内等值点; 右: 沿网格或对角线)

- 3) 同一幅图上，相邻两等值线之间的数值差为 0(如在鞍部)或相差一个等值距；
- 4) 等值线不能相交，不能分支；
- 5) 在两高值区或低值区之间，必须有两条相邻的等值线，其数值相等，并且这两条等值线的数值在两个高值区之间是低值，在两个低值区之间是高值(如等压线图上的鞍形气压场附近)；
- 6) 等值线分布的疏密反映该值差异的大小。

本文介绍的绘制硅单晶断面电阻率等值线方法恰与现有方法不同：

1) 虽然本方法中也要首先知道网格点上的电阻率值，但由于电阻值测量时可以有 $\pm 20\%$ 或更高的误差，因此由这些格点上的值去寻找网格点上等值点的坐标也将带来较大的误差。

2) 我们用于图像识别定位功能的全自动的指针仪测量硅单晶断面电阻率的分布，测量点构成方形网格，网格的边长可以随意调节，小至 1 mm 以下，因此网格可以分得很细，而通常的探针仪只能分辨 3 mm 以上区域的电阻率。已经没有必要去寻找网格中电阻率等值点的坐标。因此等值线就沿网格走或最多沿 45 度对角线穿过网格，如图 1 右所示。

3) 由于相邻网格点上的电阻率值并不严格相等，按上述文献所介绍的方法，不能通过它们绘制等值线。因此我们引入模糊数学中的隶属度概念，只要相邻点与起始点的电阻率差在某一范围，就认为该相邻点属于起始点为首的模糊集合，且该相邻点对此模糊集合的隶属度大于某一阈值。此时两相邻网格点便可以连成等值线，尽管它们的电阻率值有差别，不严格相等。因此这样绘制出来的等值线是折线，不是光滑曲线。但对于断面电阻率等值线绘图技术来说已是足够精确并实用化了，完全可以用于指导硅单晶和集成电路生产工艺。

4) 需要说明的是为什么一片单晶硅片的电阻率呈现条纹分布的呢? 其原因是由多方面造成的:

①这种条纹幅度随着晶体转速的增加和拉速的减小而减小。拉速低时, 条纹相间较窄, 再配合慢的冷却速度, 通过固态扩散作用便可使条纹的幅度减小。

$$\textcircled{2} \text{有效分凝系数: } k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-f\sigma/D)}$$

式中的 f 为凝固速度, D 为熔体中杂质的扩散系数, σ 为扩散边界层的厚度。于是, 有效分凝系数的实际数值就取决于 f 和决定于 σ 值的流体力学条件。从熔体中生长晶体处在稳定状态时, 引入晶体的杂质浓度是由有效分凝系数的 k 值决定的。但大多数晶体生长过程的一些参数值都是瞬时值, 如瞬时变化的微观生长率 f , 扩散边界层厚度 σ , 这些参数都会导致 k 值的变化, 因而造成微观的不均匀性。这种不均匀性电阻率以条纹的形式出现而且平行于固液界面^[1]。

2. 对微区电学参数的测试要求与方法

为超大规模或甚大规模集成电路成功提供必要的参数应满足下列条件^[1]:

- 1) 所测量的参数, 特别是微区的分布应直接影响电路的设计或性能;
- 2) 测量的参数实际上受其它参数的影响很小;
- 3) 应提供合适的测试条件;
- 4) 应提供足够量的测试次数, 以说明所使用的测量技术的重复性是可信的, 此外, 还应提供测量不够完善的信息(如测量本身的缺陷, 测试结构的不够合理的地方, 所测量参数的误差等);
- 5) 测试设备应有能力使众多原始测量数据折合优化为有意义的物理参数而又不需要花费大量的人力和时间;
- 6) 测试设备还应有能力使大量参数资料转化为易懂的图表。

用探针测试微区的掺杂或电阻率分布均匀性是经济又有效的方法。目前可以分为肖特基势垒探针法和电流场电势探针法。前者可分为单探针法和四探针法。四探针法又可分为直线四探针法和矩形四探针法。矩形四探针法又可分为竖直四探针和斜置四探针。此外, 还可以发明人所用公式^[1]不同分为 Perloff 法、Rymaszewski^[1,3]法及改进的 Van der Pauw 法^[1,2]。

下图是分类与要求:

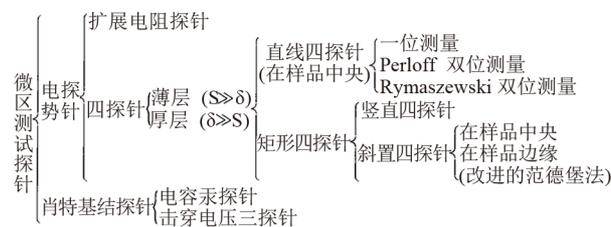


图 2 示出美国国家标准局推荐使用的正方形测试结构(即 NBS-3 号掩膜版)。测试时将四根探针置于四个金属电极板上, 利用如下 Van dw Pauw 公式^[2]计算薄层电阻, 这一种结构又称为 Van der Pauw 电阻器。

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V_1 + V_2}{I} \right) f (V_2/V_1) \quad (1)$$

原始 Van der Pauw 法测量时要求在样品边缘制备点接触。当然对微样品制备点接触是十分困难的。因而需要在正方形样品的角区引出长臂, 在臂的末端制备金属电极及引线孔。这样, 除了被测区的隔离扩散外, 还需要引线孔附近的扩散, 氧化制备引线以及金属化工艺。而且要求臂长大于臂宽, 才能保证 Van der Pauw 公式正确度优于 0.1%。计算出的薄层电阻, 因为测试区是对称的, 故 $V = V_1 = V_2$, $f = 1$ 。

3. 数据采集与显示

目前国内外都有许多自己设计的数据收集系统。它们的共同特点是利用计算机控制数据采集及进行加工处理。一般来说, 测量系统对电流的灵敏度要求达到 1 PA, 对电容的灵敏度要求达到 1 PF, (频率在

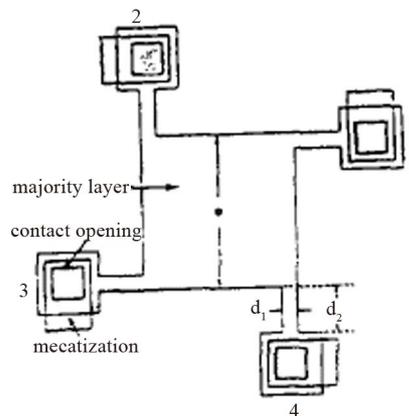


Figure 2. The measurement structure of a square shape (NBS-3 Mask) used by NBS of USA
图 2. 美国国家标准局正方形测试结构(NBS-3 号掩膜版)

10 kHz 至 1 MHz 之间), 并能产生小至 10 nA 的电流, 电压的分辨力为 10 μ V。

数据显示的目的是为了让人一目了然, 便于理解。特别是将大量测试数据展示在坐标轴或坐标平面上。这里有一维、二维、三维表达方式。按图形又可分为百分偏差图, 直方图以及等值轮廓线表达方式。对于相同尺寸的测试结构来说, 同一硅片中的等值轮廓线越少, 则参数分布越均匀。

以硅片的扩散薄层电阻二维图为例, 来说明数据的处理。对 75 mm 的硅片选定 118 个标准测试点进行测量。每一个格子的边长为 5.64 mm。用下式计算平均值:

$$\bar{R}_s = \frac{1}{118} \sum_{i=1}^{118} (R_s)_i \quad (2)$$

标准偏差 σ 的均方值为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{117} \sum_{i=1}^{118} [(R_s)_i - \bar{R}_s]^2 \quad (3)$$

相对标准偏差为: $\sigma^* = \sigma / \bar{R}_s$ 。

每一个测试位上所得薄层电阻与平均值 R_s 的偏差为:

$$\Delta i(\%) = [(R_s)_i / \bar{R}_s - 1] \times 100\% \quad (4)$$

4. 不同测试方法给出的测试结果与讨论

4.1. 改进范德堡法

改进范德堡法^[1,4-7]是利用四根斜置的刚性探针, 不要求等距、共线, 只要求依靠显微镜观察, 保证针尖在样品的四个角区边缘附近一定界线内, 用下面给出的改进范德堡公式, 由四次电压、电流轮换测量得到薄层电阻(公式中 4 次求和再除以 4 并非平均之意, 而是由于探针接触时的整流效应, 必须这样做)。

$$R_s = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \frac{\pi}{2 \ln 2} \left(\frac{V_n + V_{n+1}}{I} \right) f \left(\frac{V_{n+1}}{V_n} \right) \quad (5)$$

式中, $f \left(\frac{V_{n+1}}{V_n} \right)$ 是 Van der Pauw 修正函数:

$$\frac{(V_{n+1}/V_n) - 1}{(V_{n+1}/V_n) + 1} = \frac{\cosh^{-1} [(1/2) \exp(\ln 2 / f)]}{\ln 2 / f} \quad (6)$$

I 是所用测试电流, V_n 是第 n 次测量所得电压。图 3

示出该方法所推荐的四种测试图形结构, 其中阴影线是允许放置探针的区域。

该方法的特点是利用斜置探针, 探针有足够直径以保证刚性。样品面上探针间距取决于针尖半径, 因此可以用于小至 90 μ m 微区的薄层电阻的测定。不需要测量针尖与样品边界之间相对距离; 不需要作边缘效应修正; 不需要保证重复测量时探针位置的一致性; 探针的游移不影响测量结果; 不需要制备从微区伸出的测试臂和金属化电极; 简便、快捷、可行。有关原理已在相关文献中给予证明。实验中已对大的方形硅片、矩形镍片、100 μ m 方形金触突以及图 3 所示 p-Si 隔离微区进行测定验证, 而且从理论上和实验上可推出范德堡公式:

$$\exp \left(-\frac{\pi V_1}{I R_s} \right) + \exp \left(-\frac{\pi V_2}{I R_s} \right) = 1 \quad (7)$$

4.1.1. 测准条件分析

为保证测量时免受静电、电磁干扰, 采用屏蔽线并让屏蔽接地, 因此读数稳定可靠测量电压随测量电流正比增加或减小。为消除探针与样品间接触电势的影响, 采用电流正反向两次测量再平均。测量中用 CC51A 单片机采样探针电压, 自动计算、立即显示薄层电阻。这不仅提高测试速度, 还对读数异常(探针落到图形外时)起监视作用, 并可观察测量电流对薄层电阻读数的影响。

对半导体样品少子注入及焦耳热会影响测量结果, 因而所测微区电阻率约为 0.1 $\Omega \cdot \text{cm}$, 与一般基区扩散相当。对 150 μ m 微区将测试电流从 90 逐渐增加至 2000 μ A (与单片机可检测上, 下限对应), 所测薄

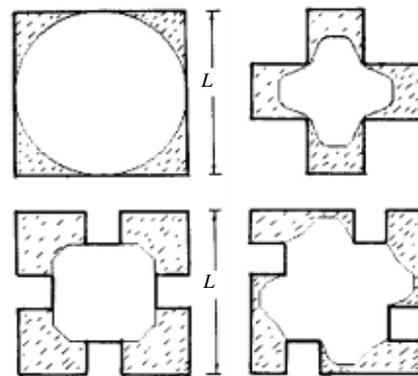


Figure 3. Four measurement structures recommended by the modified VDP method^[8]

图 3. 改进的范德堡法所推荐的四种测试图形结构^[8]

层电阻相差在±4%以内。图4虚线1所示为其归一化值。Beuhler^[10]利用范德堡微电阻器测量薄层电阻时，观察到焦耳热的影响，如图4曲线2、3所示，并归因于过窄的测试臂导致电流密度过大所致。因我们的测试方法不要求从样品引出测试臂，焦耳热效应不明显是可理解的，本文中选用160 μA测试电流。

4.1.2. 测量结果

所用样品为n-Si片，样品氧化光刻后刻出相应图形，图形内进行硼扩散，深度约为3 μm。然后对微区图形进行薄层电阻测量。显微镜将视场放大80倍，每次测量时用目视法将探针尖放置在图5所示阴影区，尽量靠边，但决不能超越边界。

光刻板被划分为1.5×1.5 mm²的重复单元，每一单元中有25个图形。其尺寸为60、80、90……150、300 μm不等。

表1给出了随机不同单元中两个图形的测试结果。可以看出，不同形状、尺寸的图形以及探针随机

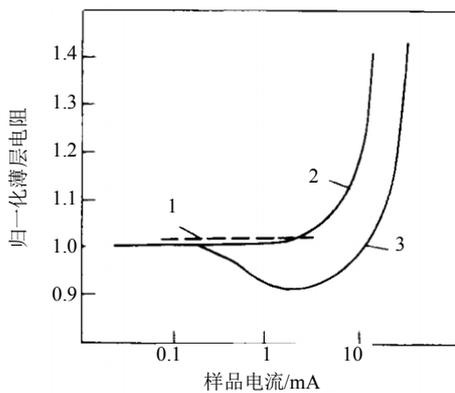


Figure 4. Relation between the measured sheet resistance and the used current^[8]

图4. 测量所得薄层电阻与测试电流关系^[8]

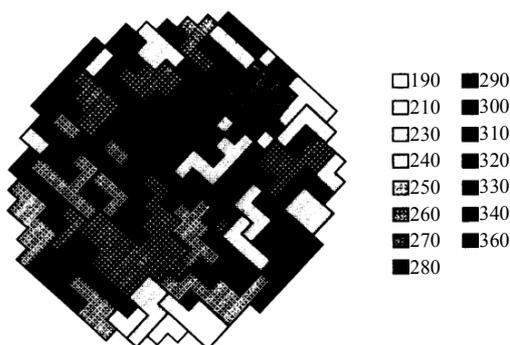


Figure 5. The measured resistance distribution chart indicated by grey scales^[8]

图5. 以灰度表示薄层电阻所测得的电阻率的分布图^[8]

Table 1. The testing results for two figures in s same unit (the testing current 160 μA)

表1. 同一单元中两个图形的测试结果(测试电流取160 μA)

形状	尺寸/μm	四次轮换得电压/mV				薄层电阻/Ω
		V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	
苜蓿叶	150	12.2	3.4	17.3	6.3	251
十字形	300	3.9	12.1	9.2	11.3	249
苜蓿叶	150	15	1.2	20	5.8	247
十字形	300	12.2	5.5	9.9	10.1	262
苜蓿叶	150	12.3	5.4	13.6	6.6	334
十字形	300	7.3	16.7	6.9	17	317
苜蓿叶	150	12.9	5.9	16	6.4	270
十字形	300	5.4	14	7.6	12.5	264
苜蓿叶	150	9	17	8	4	260
十字形	300	2	14	7	19	256
苜蓿叶	150	7	10.5	10.7	8	255
十字形	300	9	10.6	7.7	10	255
苜蓿叶	150	16	11	6.5	4	256
十字形	300	11	6	10.7	10.6	272
苜蓿叶	150	22	6	15	9	341
十字形	300	8	19	3	23	341
苜蓿叶	150	14.6	22	3.6	9.1	321
十字形	300	9.5	11	6	24	328

游移(但在允许区内)因范德堡修正函数 $f(V_{n+1}/V_n)$ 而不同。同一单元中两个图形的测试结果是一致的，说明扩散的微区不均匀度不大，只选定一个或2个图形便可以代表该单元。

必要时，相邻单元薄层电阻差别大时也作了全片的测试结果。用 Beuhler^[10]曾使用的灰度法表示各单元的薄层电阻。图5示出了全片的分布，利用此图可以得到

1) 不均匀度

$$E = \frac{R_{大} - R_{小}}{\frac{1}{2}(R_{大} + R_{小})} = \frac{360 - 190}{\frac{1}{2}(360 + 190)} = 62\%$$

2) 全片薄层电阻平均值

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{\sum_{j=1}^m R_j N_j}{\sum_{j=1}^m N_j} = 278.2(\Omega)$$

式中， n 和 m 分别是全片被统计的单元数和灰度相同的总区域数， N_j 是第 j 区域中的单元数。从图5电阻率的分布图可得到详细信息，更有利于评价材料改进工艺。

4.2. 无测试图形改进的鲁美采夫斯基法

我们用改进了 Rymazewski 斜置式方形四探针法^[11,12]。薄层电阻测试公式为

Table 3. The relative standard deviation σ_r of resistivity on different equivalence contours

表 3. 各条等值线上电阻率相对标准偏差 σ_r

等值线电阻率 $\rho_m/\Omega \cdot \text{cm}$	21.6	22.8	24.0	25.2	26.4	27.6	28.8	30.0	31.2	32.4
$\sigma_m/\%$	1.74	1.33	1.05	1.17	1.39	1.28	0.94	0.76	0.74	1.23

5. 结论

本文采用的上述两种测试法,即范德堡改进法和鲁美茨夫斯基改进法,可用于大直径硅片微区电阻率的表征。使用我们研制的具图像识别定位功能的全自动的斜置式方形四探针仪测量硅单晶断面电阻率的分布,探针间距可调节,以适应样品或图形尺寸。此设备的样品盘尺寸达 200 mm。测量的结果可绘制成断面上的电阻率的分布图。前者用灰度表征,后者经模糊数学理论处理绘制电阻率等值线条纹,均可达到令人满意的效果,并已应用于生产。

参考文献 (References)

- [1] 孙以材,汪鹏,孟庆浩. 电阻率测试理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [2] J. van der Pauw. A method of measuring specific resistivity and Hall Effect for disks of arbitrary shape. Philips Research Report, 1958, 13: 1-9.
- [3] R. Rymaszewski. Empirical method of calibrating a 4-point microarray for measuring thin-film-sheet resistance. Electronics Letters, 1967, 3(2): 57-58.
- [4] 孙以材,张林在. 用改进的 Van der Pauw 法测定方形微区的方块电阻[J]. 物理学报, 1994, 43(4): 530-539.
- [5] Y. C. Sun, J. S. Shi and Q. H. Meng. Measurement of sheet resistance of cross micro areas using a modified Vander Pauw method. Semiconductor Science & Technology, 1996, 11(5): 805-813.
- [6] Y. C. Sun, O. Ehrmann, J. Wolf, et al. Determination of the areas of a square sample suitable to the resistance measurement by Van der Pauw's method. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(7): 3757.
- [7] Y. C. Sun, O. Ehrmann, J. Wolf, et al. The correction factors and their new curve for the measurement of sheet resistance of a square sample with a square four-point probe. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(7): 3752.
- [8] 孟庆浩,孙新宇,孙以材. 薄层电阻测试 Mapping 技术[J]. 半导体学报, 1997, 18(9): 701-705.
- [9] 孙以材,刘新福,高振斌,孟庆浩,孙冰. 微区薄层电阻四探针测试仪及其应用[J]. 固体电子学研究与进展, 2002, 22(1): 93-99.
- [10] M. G. Buehler, W. R. Thurber. An experimental study of various cross sheet resistor test structures. Journal of the Electrochemical Society, 1978, 125(4): 645-649.
- [11] 张艳辉,孙以材,刘新福,陈志永. 斜置式方形探针测量单晶断面电阻率分布 mapping 技术[J]. 半导体学报, 2004, 25(6): 682-686.
- [12] 刘新福,孙以材,张艳辉,陈志永. 用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法测定微区的方块电阻[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2461-2466.
- [13] 孙以材,王伟,屈怀泊. 四探针电阻率微区测量改进的 Rymaszewski 法厚度修正[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(6): 454-457.
- [14] 孙以材,潘国峰,杨茂峰,叶威,张鹏. 绘制硅单晶电阻率等值线的 Mapping 技术[J]. 半导体学报, 2008, 29(7): 1281-1285.
- [15] 孙以材,石俊生. 在矩形样品中 Rymaszewski 公式适用条件的分析[J]. 物理学报, 1995, 44(12): 1869-1878.
- [16] 孙以材. 半导体测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- [17] 孙以材,孟庆浩,宫云梅,赵卫萍,武建平. 四探针 Mapping 自动测试仪中电阻率温度系数的规范化拟合多项式的应用[J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1438-1441.
- [18] 王静,孙以材,刘新福. 利用多项式拟合规范化方法实现范德堡函数的高精度反演[J]. 半导体学报, 2003, 24(8): 817-821.
- [19] H. L. Li, Y. C. Sun, W. Wang and H. Hutchinson. Neurocomputing Van der Pauw function for the measurement of a semiconductor's resistivity without use of learning rate of weight vector regulation. Chinese Journal of Semiconductors, 2011, 32(12): 122002-1-122002-8.