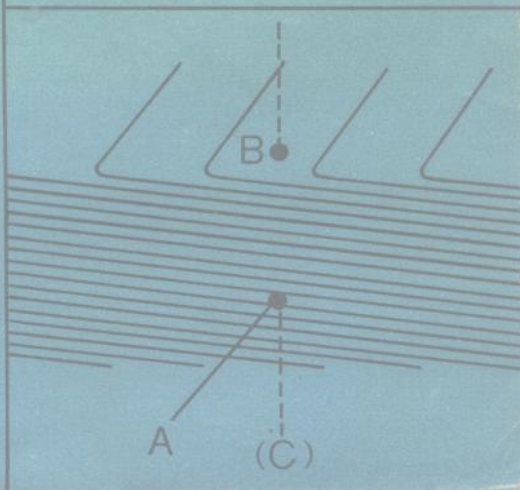
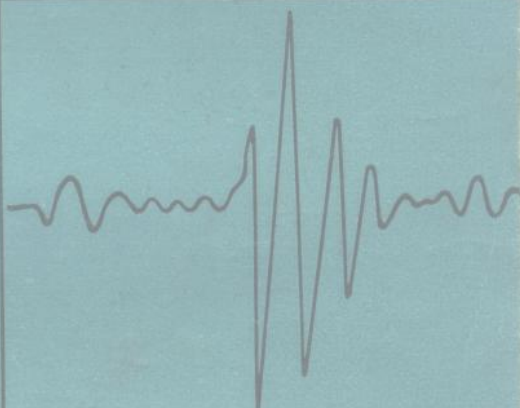


# 半导体测量和仪器

[美] W. R. 鲁尼安编著



上海科学技术出版社

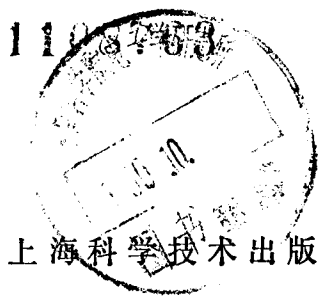


79.88  
85.2

# 半导体测量和仪器

〔美〕 W. R. 鲁尼安 编著

上海科技大学半导体材料教研室 译



上海科学技术出版社

Semiconductor Measurements  
and Instrumentation  
W. R. Runyan  
McGraw-Hill 1975

DT50/17

半 导 体 测 量 和 仪 器

〔美〕 W. R. 鲁尼安 编著

上海科技大学半导体材料教研室 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 10.375 字数 272,000

1980 年 7 月第 1 版 1980 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—12,000

书号: 15119·2034 定价:(科四) 1.15 元

## 译者说明

本书系根据美国 W. R. 鲁尼安 (Runyan) 所著 «Semiconductor Measurements and Instrumentation» 一书 (1975 年版) 译出. 它是国际上近年来较为全面地论述半导体测试的一本专著. 书中着重介绍了半导体材料测试的原理和设备, 对于半导体器件的测试也作了一定介绍, 还评论了各种测量方法和仪器的使用范围及其优缺点. 书后附有大量的参考书目, 以供进一步查阅和研究.

本书可供从事半导体工作的工程技术人员、实验室分析人员以及有关的大专师生参阅.

本书由曹泽淳、魏光普和郭胜泉等同志翻译, 张忠奎、杨传铮等同志校阅.

由于译、校者水平有限, 有错误和不妥之处, 请批评指正.

上海科技大学半导体材料教研室

一九七九年三月

## 序 言

自从第一个商品化的硅晶体管问世以来,在二十年过程中,半导体的鉴定已经从某些较简单的寿命、霍尔效应、电阻率测量和十分不精确的化学分析,发展成为非常精确的分析程序,并使用了极其复杂的测量各种电学性能的设备。此外,在这二十年里,对于半导体中晶体缺陷的检测和评价能力也提高了许多倍。同时,正式报道的新方法以及改进旧方法的文献现在也已占有较大的比重。

在编写这本书时,我的愿望是:为理清已积累的文献和方法提供个索引。这样,对于某一特定问题可以选用最合适的技术,并且,所作的指导对于顺利地进行大多数材料的测试是相当明确的。本书主要是为从事半导体工作的工程技术人员、质量分析实验室的工作人员和涉及半导体性能测量的大学生而写的。本书叙述的方法也同样可用于其它材料的测量。每个题目的叙述深度的不同,不仅取决于它们对于半导体技术的重要性,也取决于是否已有基础读物。另外,某些具体方法是取决于技巧的,但是这些技巧仅仅随着使用而发展,却很少被记录下来。对此,本书也给予描述。书中还提供了足够多的有关器件测试方面的文献,所以也能在这方面指导读者。

W. R. 鲁尼安

# 目 录

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 译者说明 .....                  | i         |
| 序言 .....                    | ii        |
| <b>1 晶体取向 .....</b>         | <b>1</b>  |
| 1.1 晶体学 .....               | 3         |
| 1.2 晶体定向 .....              | 10        |
| <b>2 晶体缺陷及其观察 .....</b>     | <b>24</b> |
| 2.1 点缺陷 .....               | 24        |
| 2.2 位错 .....                | 29        |
| 2.3 堆垛层错 .....              | 44        |
| 2.4 孪晶 .....                | 49        |
| 2.5 系属组织 .....              | 51        |
| 2.6 晶粒与晶界 .....             | 52        |
| 2.7 夹杂物 .....               | 54        |
| 2.8 点阵应力与应变 .....           | 56        |
| 2.9 表面机械损伤 .....            | 62        |
| 2.10 外形缺陷 .....             | 66        |
| 2.11 辐照损伤 .....             | 66        |
| <b>3 电阻率及载流子浓度的测量 .....</b> | <b>69</b> |
| 3.1 概说 .....                | 70        |
| 3.2 基本方法 .....              | 71        |
| 3.3 二探针法和四探针法的仪器 .....      | 80        |
| 3.4 二探针和四探针测量的误差 .....      | 85        |
| 3.5 扩展电阻 .....              | 89        |
| 3.6 非接触测量电阻率的方法 .....       | 91        |
| 3.7 载流子浓度 .....             | 92        |
| 3.8 电阻率分布图 .....            | 97        |

|          |                       |            |
|----------|-----------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>寿命</b>             | <b>104</b> |
| 4.1      | 引言                    | 104        |
| 4.2      | 光电导衰减                 | 106        |
| 4.3      | 其它的注入方法               | 115        |
| 4.4      | 光电导调制                 | 115        |
| 4.5      | 光电导                   | 116        |
| 4.6      | 表面光电压                 | 117        |
| 4.7      | 光电磁 (PEM) 效应          | 119        |
| 4.8      | 扩散长度的测量               | 120        |
| 4.9      | 漂移                    | 123        |
| 4.10     | 其它方法                  | 124        |
| <b>5</b> | <b>迁移率、霍尔效应和型号的测量</b> | <b>125</b> |
| 5.1      | 迁移率                   | 125        |
| 5.2      | 霍尔效应                  | 127        |
| 5.3      | 导电型号                  | 141        |
| <b>6</b> | <b>厚度测量</b>           | <b>146</b> |
| 6.1      | 引言                    | 146        |
| 6.2      | 测微计和其它量具              | 149        |
| 6.3      | 吸收法                   | 151        |
| 6.4      | 椭圆仪法                  | 152        |
| 6.5      | 干涉效应                  | 161        |
| 6.6      | 用干涉法和其它方法测量斜面         | 171        |
| 6.7      | 阶梯高度的测量               | 177        |
| 6.8      | 高倍显微镜用于可见边界           | 178        |
| 6.9      | 差重法                   | 178        |
| 6.10     | 结晶学方法                 | 179        |
| 6.11     | 测量金属膜的混杂方法            | 180        |
| <b>7</b> | <b>显微镜检验用试样的准备</b>    | <b>181</b> |
| 7.1      | 截取                    | 181        |
| 7.2      | 化学处理                  | 192        |
| 7.3      | 轮廓显示                  | 195        |
| <b>8</b> | <b>显微镜的使用和摄影术</b>     | <b>216</b> |

|          |                     |            |
|----------|---------------------|------------|
| 8.1      | 基础光学                | 216        |
| 8.2      | 光学象的质量              | 221        |
| 8.3      | 专门的光学装置             | 230        |
| 8.4      | 摄影术                 | 238        |
| <b>9</b> | <b>电子显微镜和其它分析仪器</b> | <b>246</b> |
| 9.1      | 电子显微镜的一般介绍          | 246        |
| 9.2      | 透射电子显微镜             | 247        |
| 9.3      | 扫描电子显微镜             | 251        |
| 9.4      | 电子衍射                | 256        |
| 9.5      | X射线                 | 259        |
| 9.6      | 电子能谱法               | 265        |
| 9.7      | 光学光谱法               | 269        |
| 9.8      | 质谱法                 | 272        |
| 9.9      | 离子背散射               | 274        |
| 9.10     | 放射性方法               | 275        |
|          | 参考文献                | 278        |

## 晶 体 取 向

在进行下面几章所讨论的各种测量时，所得的结果可能与进行测量的晶面的取向有关，还可能与所施加的某种物理量(电压、力、温度等)的方向有关。考虑到这种依赖关系的存在以及许多半导体工艺与晶体取向有关这一事实，因此对晶体取向必须引起足够的重视。表 1.1 概括了某些较常见的性质和它们的行为。表 1.2 概述了可能预期到的与晶体取向有关的工艺。一般地说，如果一种物理性质不是标量，则在大多数晶态材料中它将是方向敏感的<sup>[1]</sup>。用二阶张量表示的性质，几乎包括半导体工艺中通常最感兴趣的所有性质(电阻率、热传导率、扩散系数)，它们在立方晶系中都是与方向无关的(而目前主要的半导体大多数都是属于立方晶系的)。

然而，在试图事先预言某些测试行为方面却存在一些问题。问题产生的原因是由于难以确定某些性质(例如硬度、腐蚀速度)的确切的定义，或是由于对某一性质的显然简单的测试中却可能以某种难以捉摸的方式意外地牵连了一些附加现象。在立方晶体中，按理电阻率应与所加电场的方向无关，但对于扩展电阻测量的特殊情形来说，用同一设备对硅的不同晶面进行测量时，却会得到不同的数值。又如，虽然扩散系数应与方向无关，然而却观察到即使在相同的表面环境、温度和时间等条件下，在 $[111]$ 和 $[100]$ 方向磷的扩散深度都可能不同。而且，还可能存在着物理约束条件，譬如，在很薄的薄层中，晶体不再是三维的了。在这种情况下，通常是各向同性的性质也可能变得与方向有关。正是这种现象，使硅反型层中载流子迁移率随晶向而改变。

表 1.1 部分晶体方向敏感性质一览表

| 张量阶数 | 性 质    | 符号            | 比 例 关 系              | 比 例 形 式   | 在下列晶系中各向同性 |
|------|--------|---------------|----------------------|-----------|------------|
| 0    | 密 度    | $\delta$      | 质量与体积之比              | 标量与标量之比   | 所有晶系       |
|      | 热 容    | $C$           | 转移的热量与温度变化之比         |           |            |
| 1    | 热电系数   | $P_i$         | 电极化强度与温度变化之比         | 矢量与标量之比   | 无          |
| 2    | 电导率    | $\sigma_{ik}$ | 电流密度与施加的电场之比         | 矢量与矢量之比   | 所有立方晶系     |
|      | 电迁移率   | $\mu_{ik}$    | 电流密度与施加的电场强度和载流子数目之比 |           |            |
|      | 热导率    | $k_{ij}$      | 转移的热量与温度梯度之比         |           |            |
|      | 扩散系数   | $D_{ij}$      | 扩散流密度与浓度梯度之比         |           |            |
|      | 热膨胀系数  | $\alpha_{ij}$ | 伸长量与温度变化之比           | 标量与二阶张量之比 |            |
| 3    | 压电系数   | $d_{ijk}$     | 极化强度与施加的应力之比         | 矢量与二阶张量之比 | 无          |
| 4    | 弹性系数   | $C_{ijkl}$    | 应力与伸长量之比             | 两个二阶张量之比  | 无          |
|      | 压电电阻系数 | $\pi_{ijkl}$  | 电阻率的变化与施加应力之比        |           |            |

此表取自: J. F. Nye, "Physical Properties of Crystals." Oxford University Press. New York. 1960

表 1.2 与取向有关的半导体工艺和参数

|                  |                                                                                                                                                  |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湿腐蚀(与腐蚀剂有关)      | 介质隔离的硅集成电路的重要工艺步骤                                                                                                                                |
| 扩散深度             | 尚无定论。作为一种供讨论的意见。例如,可参看:<br>L. E. Katz, "Orientation Dependent Diffusion Phenomena," Paper 23, National Bureau of Standards, Spec. Pub. 337, 1970 |
| 离子注入深度           |                                                                                                                                                  |
| 隐埋层图形的畸变         | 当生长表面与低指数晶面稍有偏离时,此种影响最小                                                                                                                          |
| 气相外延             | 当晶片表面与低指数晶面稍有偏离时,生长情况最好。<br>表面生长速率可能与表面的取向有关                                                                                                     |
| 划片和碎裂            | 为了顺利进行划片操作,必须使划线方向精确地与预定的结晶学方向一致                                                                                                                 |
| 机械抛光             | 也反映在机械抛光或研磨后的损伤深度上。例如,可参看: A. W. Fisher and J. A. Amick, J. Electrochem. Soc. <b>113</b> : 1054~1060(1966)                                       |
| Si MOS 器件中的沟道迁移率 |                                                                                                                                                  |
| Si MOS 器件的表面电荷密度 |                                                                                                                                                  |

## 1.1 晶体学

在讨论测定晶体取向的各种方法之前,让我们简单地叙述一下某些晶体学术语。

**晶面指数** 晶体内的各种晶面可以用这些晶面与晶轴的截距的倒数来描述,这些倒数通常表示成为具有同样比例的最小的可能整数,对于有三个晶轴的晶系,这种晶面指数写成 $(hkl)$ 。对于六方晶系,它具有三个共面的晶轴和一个与这三个晶轴所在平面垂直的晶轴,这时晶面指数写为 $(hkil)$ ,其中 $h$ 、 $k$ 和 $i$ 是所讨论的晶面与三个共面晶轴的截距的倒数比。根据几何关系,容易证明 $h+k=-i$ 。由于 $h$ 和 $k$ 二者完全地决定了 $i$ ,所以没有必要将四个指数都写出来,但需要有某种方法来指明是六方晶系。一种常

用的符号是 $(hkl)$ 。图 1.1 是各种晶面的例子。对一组给定的指数(包括负数值)进行互换排列而得到的所有可能的晶面构成一个完整的晶面族,通常用大括号 $\{hkl\}$ 表示<sup>①</sup>。例如, $\{111\}$ 代表八种晶面 $(111)$ 、 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 。指数数字上的短划表示负的截距。

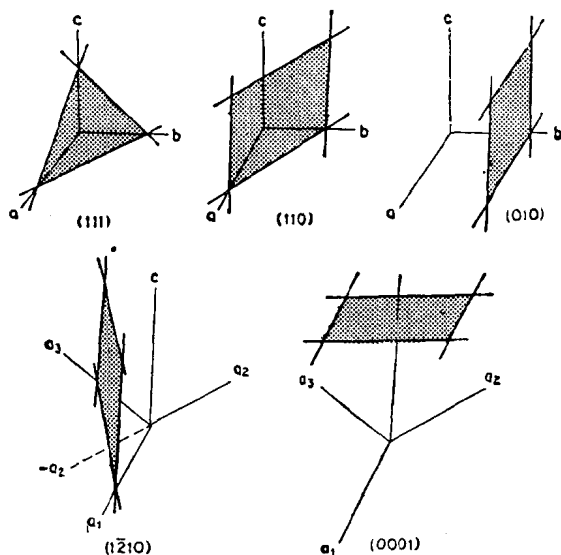


图 1.1 低指数晶面的例子

晶体中晶向的指数写成 $[hkl]$ , 一组完整的等同方向写成 $\langle hkl \rangle$ 。在立方晶系中, 指数相同的晶面与晶向总是互相垂直的, 但对其它晶系来说, 一般并不如此。

**晶面之间的夹角** 计算任意二个晶面 $(hkl)$ 和 $(h'k'l')$ 之间的夹角已经有公式可供应用<sup>[2]</sup>。除了立方晶系以外, 计算公式中都包含有单位胞的大小在内, 由于它们的数值对不同材料是不同的, 因此给定晶面间的夹角也与材料有关。只有在立方晶系中, 给定晶面间的夹角才与材料无关。表 1.3 中列出了立方晶系中一些低

① 严格说, 应是有对称联系的一些晶面, 共同构成一个完整的晶面族, 以 $\{hkl\}$ 表示, 常称为晶形。——译者

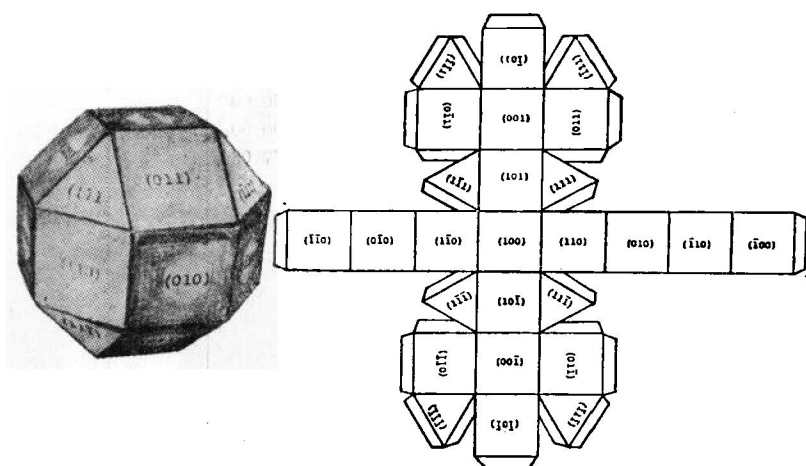
表 1.3 立方晶系的晶体中晶面(或晶向)之间的夹角

| (HKL) | (hkl) | HKL 和 hkl 晶面(或晶向)之间的夹角值 |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100   | 100   | 0.00                    | 90.00 |       |       |       |       |
|       | 110   | 45.00                   | 90.00 |       |       |       |       |
|       | 111   | 54.74                   |       |       |       |       |       |
|       | 210   | 26.56                   | 63.43 | 90.00 |       |       |       |
|       | 211   | 35.26                   | 65.90 |       |       |       |       |
|       | 221   | 48.19                   | 70.53 |       |       |       |       |
|       | 310   | 18.43                   | 71.56 | 90.00 |       |       |       |
|       | 311   | 25.24                   | 72.45 |       |       |       |       |
| 110   | 110   | 0.00                    | 60.00 | 90.00 |       |       |       |
|       | 111   | 35.26                   | 90.00 |       |       |       |       |
|       | 210   | 18.43                   | 50.77 | 71.56 |       |       |       |
|       | 211   | 30.00                   | 54.74 | 73.22 | 90.00 |       |       |
|       | 221   | 19.47                   | 45.00 | 76.37 | 90.00 |       |       |
|       | 310   | 26.56                   | 47.87 | 63.43 | 77.08 |       |       |
|       | 311   | 31.48                   | 64.76 | 90.00 |       |       |       |
|       | 311   | 31.48                   | 64.76 | 90.00 |       |       |       |
| 111   | 111   | 0.00                    | 70.53 |       |       |       |       |
|       | 210   | 39.23                   | 75.04 |       |       |       |       |
|       | 211   | 19.47                   | 61.87 | 90.00 |       |       |       |
|       | 221   | 15.79                   | 54.74 | 78.90 |       |       |       |
|       | 310   | 43.09                   | 68.58 |       |       |       |       |
|       | 311   | 29.50                   | 58.52 | 79.98 |       |       |       |
|       | 210   | 0.00                    | 36.87 | 53.13 | 66.42 | 78.46 | 90.00 |
|       | 211   | 24.09                   | 43.09 | 56.79 | 79.48 | 90.00 |       |
| 210   | 221   | 26.56                   | 41.81 | 53.40 | 63.43 | 72.65 | 90.00 |
|       | 310   | 8.13                    | 31.95 | 45.00 | 64.90 | 73.57 | 81.87 |
|       | 311   | 19.29                   | 47.61 | 66.14 | 82.25 |       |       |
|       | 211   | 0.00                    | 33.56 | 48.19 | 60.00 | 70.53 | 80.40 |
|       | 221   | 17.72                   | 35.26 | 47.12 | 65.90 | 74.21 | 82.18 |
|       | 310   | 25.35                   | 40.21 | 58.91 | 75.04 | 82.58 |       |
|       | 311   | 10.02                   | 42.39 | 60.50 | 75.75 | 90.00 |       |
|       | 221   | 0.00                    | 27.27 | 38.94 | 63.61 | 83.62 | 90.00 |
| 221   | 310   | 32.51                   | 42.45 | 58.19 | 65.06 | 83.95 |       |
|       | 311   | 25.24                   | 45.29 | 59.83 | 72.45 | 84.23 |       |
|       | 310   | 0.00                    | 25.84 | 36.87 | 53.13 | 72.54 | 84.26 |
|       | 311   | 17.55                   | 40.29 | 55.10 | 67.58 | 79.01 | 90.00 |
|       | 311   | 0.00                    | 35.10 | 50.48 | 62.96 | 84.78 |       |
|       | 311   | 0.00                    | 35.10 | 50.48 | 62.96 | 84.78 |       |
|       | 311   | 0.00                    | 35.10 | 50.48 | 62.96 | 84.78 |       |
|       | 311   | 0.00                    | 35.10 | 50.48 | 62.96 | 84.78 |       |

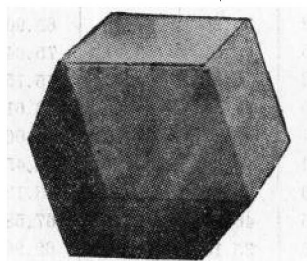
更加完整的表可参看: R. J. Peavler and J. L. Lenusky, "Angles between Planes in Cubic Crystals" *Spec. Rept.* 8. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers

指数晶面间夹角的数值,它对于确定小平面的指数是非常有用的。

**晶面之间的相对位置** 为了想象各晶面间的相对位置,最容易的办法似乎是借助于一个模型。图 1.2(a) 是用于立方晶体的一个非常方便的模型的照片及其展开图形。为了便于印刷,模型的展开图形已经被缩小了。因此,除非很灵巧的人之外,在制作模型前可能需要放大。如果将一块小的磁铁粘结在一个面的内侧,那就可以用吸住嵌镶的金属板的方法保存这个模型。这个模型的形状虽然并不是标准的结晶学形态,但它相当完全地包含着



(a)



(b)

图 1.2 纸质模型: (a) 由  $\{111\}$ 、 $\{110\}$  和  $\{100\}$  面围成的模型的照片及其展开图形; (b) 十二面体

$\{100\}$ 、 $\{110\}$ 和 $\{111\}$ 的全部晶面族。象图 1.2(b)中所示的那种晶体模型也是有帮助的，现已有了大量的这种纸质模型的展开图形可供使用①。

各个晶面的相对位置也可用极射赤面投影图来表示②③。极射赤面投影是这样作出来的：设想围绕晶体有一假想的参考球，从它的球心出发，作所考虑的晶面的垂线，交参考球于某点。如果要作一个 $(hkl)$ 投影，则晶体的方位必须调整成使 $(hkl)$ 晶面垂直于假想球的“北极”方向，也就是使平分参考球为上半球和下半球的赤道平面（即投影平面）与 $(hkl)$ 晶面平行。然后，画出“南极”与各个晶面的法线和北半球面的交点之间的连接线。

这样的连接线与投影平面的相交点就是代表所考虑的晶面的投影点。这种投影方法，在图 1.3 中以 $(111)$ 晶面投影在 $(100)$ 面上的特殊情形为例，作了说明。要注意的是所有

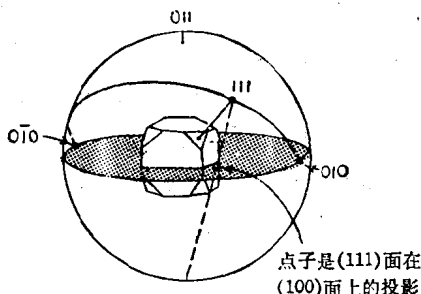


图 1.3 极射赤面投影图的作法

在投影平面的圆周（常称为投影基圆——译者）上的投影点都代表与投影平面垂直的晶面，而它们彼此之间的夹角，可以如图 1.4(a)所示的那样用对投影基圆作切线的办法图解求出。

其它晶面（也即由投影基圆内部的点所代表的那些晶面）与投影平面的交迹③可以用下法找出来：通过该投影点与投影中心作一连线，再通过该投影点作垂直于此连线的直线，于是这条直线就是该晶面与投影平面的交线，如图 1.4(b)所示。然而，晶面本身之间的交角则只能用迭在投影图上的非线性网格（即吴氏

① 可参考 Arthur J. Gude, "Three Dimension Models of the Basic Crystal Forms," cut-out kit available from Polycrystal Book Service, Pittsburgh, Pa

② 由于对非立方晶体，晶面间的夹角是随晶胞大小而变化的，因而投影方法通常只应用于立方晶系，下面的讨论都是对立方晶系而言的

③ 由二个面交截形成的交线

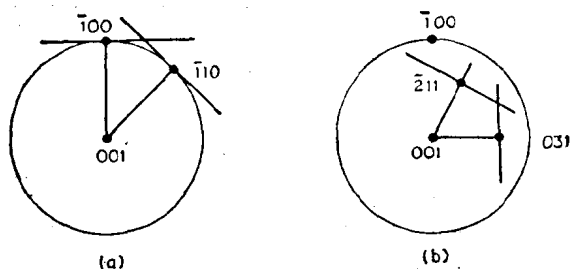


图 1.4 标准投影的说明: (a)  $(100)$  和  $(110)$  面二者都垂直于  $(001)$  面, 而互成  $45^\circ$  角; (b)  $(211)$  和  $(031)$  面在参考面  $(001)$  上的交线, 彼此互成  $63.5^\circ$  角

网——译者)来度量。正因如此, 为了求出晶面间的夹角, 应用夹角表(例如表 1.3)更为方便<sup>①</sup>。但是交迹之间的夹角, 用刚才所说的办法更容易求得。图 1.5 至 1.7 画出了几个较常用晶面的投影位置。如能在投影图上作些标记常常是很有帮助的。为此建议手边备有一张透明的薄塑料纸, 以便蒙在投影纸上。这样就能用油质铅笔进行无损伤的绘图。

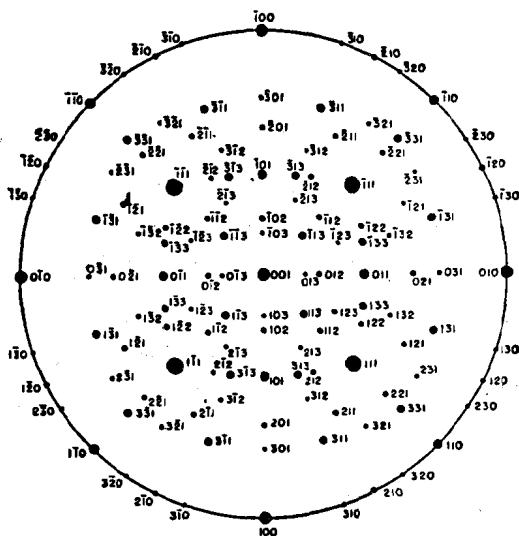


图 1.5 面心立方晶体的  $(001)$  标准投影

<sup>①</sup> 类似的网格还用于诠释 X 射线衍射花样, 并且非常有用

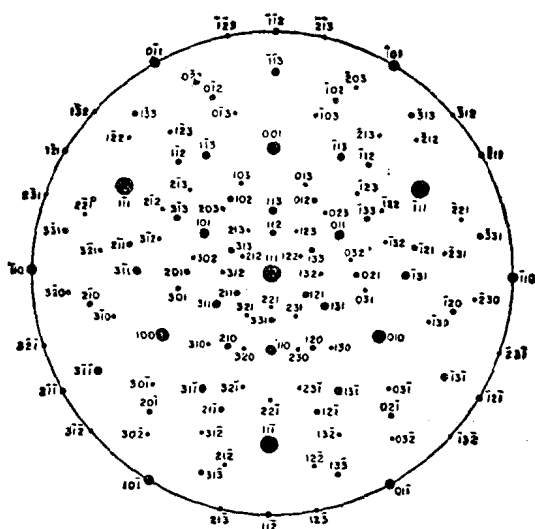


图 1.6 面心立方晶体的(111)标准投影

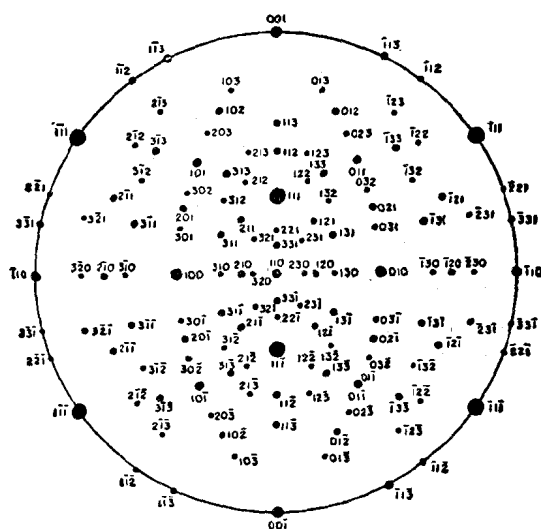


图 1.7 面心立方晶体的(110)标准投影

1108763