

7N300
1

半导体的检测与分析

中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室 著

科 学 出 版 社

1984

内 容 简 介

本书比较全面地介绍半导体科研、生产中最常用的各种检测和分析方法,介绍了各种方法的原理、实验技术和在半导体中的具体应用。全书共分十五章,包括半导体单晶定向,半导体晶体缺陷的金相观察,X射线形貌技术,离子束分析,离子探针分析,俄歇电子能谱,扫描电子显微镜,电子探针,透射电子显微镜,半导体电学测量、光学测量,火花源质谱分析,原子吸收分光光度分析,高纯气体分析和高频电感耦合等离子体发射光谱等。为了说明各种检测方法的应用,书中根据实践经验列举了一些实例,同时有些方法在章末还附有一些必要的常用数据,以便读者在实际工作中引用。

本书对象为从事半导体科研和生产的科研人员和工程技术人员,也可供大专院校有关专业师生参考。

半导体的检测与分析

中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室 著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年5月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1984年5月第一次印刷 印张: 20 1/8

印数: 0001-6,190 字数: 534,000

统一书号: 13031·2556

本社书号: 3517·13-3

定价: 3.70 元

目 录

前言

第一章 半导体单晶定向	1
§ 1 半导体晶体结构	2
§ 2 半导体单晶体的晶向测定	6
§ 3 电子计算机定向	26
附录.....	29
第二章 半导体晶体缺陷的金相观察	37
§ 1 微分干涉相衬显微镜	37
§ 2 金相面的制备	42
§ 3 金相观察技术	56
第三章 X射线形貌技术	66
§ 1 X射线动力学理论基础	67
§ 2 实验技术	80
§ 3 形貌像的诠释	88
§ 4 展望	95
第四章 离子束分析	97
§ 1 背散射表面分析	97
§ 2 沟道效应及其在半导体中的应用.....	119
§ 3 核反应分析.....	142
§ 4 离子感生X射线分析.....	153
附录	161
第五章 离子探针分析	167
§ 1 引言.....	167
§ 2 仪器工作原理.....	168
§ 3 分析原理和方法.....	170

§ 4 应用	190
第六章 俄歇电子能谱及其在半导体中的应用	198
§ 1 俄歇过程原理和能谱特征	199
§ 2 实验仪器	205
§ 3 实验方法	209
§ 4 AES 在半导体中的应用	215
§ 5 展望	231
附录	233
第七章 扫描电子显微镜的原理及其在半导体中的应用	239
§ 1 扫描电子显微镜的原理和构造	239
§ 2 扫描电子显微镜在半导体中的应用	257
第八章 电子探针及其在半导体中的应用	299
§ 1 高能电子束与半导体相互作用时的若干现象	300
§ 2 仪器简介	303
§ 3 电子探针定量分析	307
§ 4 电子探针在半导体上的若干应用	317
附录	328
第九章 透射电子显微镜及其在分析半导体晶体缺陷上的应用	332
§ 1 透射电子显微镜的原理	332
§ 2 透射电子显微镜的基本构造	335
§ 3 衍射图的形成和分析	342
§ 4 TEM 像衬度	349
§ 5 衬度计算的某些结论	356
§ 6 其它的 TEM 技术	361
附录	369
第十章 半导体电学测量	373
§ 1 电阻率测量	373
§ 2 $C-V$ 测量技术	397
§ 3 结电容技术	416

§ 4	霍尔测量	430
§ 5	少数载流子寿命的测量	448
附录		465
第十一章	半导体光学测量	469
§ 1	几种光学测量方法	469
§ 2	光致发光分析方法	487
§ 3	红外吸收法测定硅中的氧、碳含量	503
第十二章	火花源质谱分析	521
§ 1	原理	522
§ 2	应用举例	532
第十三章	原子吸收分光光度分析及其在半导体 工艺研究中的应用	536
§ 1	原子吸收分光光度分析的理论基础	536
§ 2	原子吸收分光光度分析的仪器设备	540
§ 3	原子吸收分光光度分析的干扰现象	546
§ 4	灵敏度与精密度	548
§ 5	原子吸收分光光度分析的操作	549
§ 6	应用	552
附录		574
第十四章	高纯气体的分析	580
§ 1	半导体工业生产和研究对高纯气体的要求	580
§ 2	高纯气体的分析	584
§ 3	气体中灰尘的测量	600
§ 4	高纯气体分析时必须注意的问题	601
§ 5	低浓度标准气体的配制	603
附录		606
第十五章	高频电感耦合等离子体发射光谱	609
§ 1	高频电感耦合等离子体	610
§ 2	高频电感耦合等离子体光源设备	614
§ 3	高频电感耦合等离子体的分析性能	623

第一章 半导体单晶定向*

在半导体的科研和生产中，绝大部分都是使用单晶材料。由于半导体单晶体的许多物理、化学性质是各向异性的，因此半导体单晶的生长和器件的制造都与晶向有着不可分割的关系。在拉制单晶时，要做到完整性好、成晶率高，就必须做到定向生长。硅单晶常用的籽晶方向多为 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ ，砷化镓单晶有时也用 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 211 \rangle$ 。但是，在外延生长时，如硅的 $\langle 111 \rangle$ 和砷化镓的 $\langle 100 \rangle$ 外延生长，要获得一个平整的生长表面，使器件图形不致畸变，严格的 $\langle 111 \rangle$ 或 $\langle 100 \rangle$ 却是不可取的，而必须使衬底晶向往 $\langle 110 \rangle$ 偏离 $3^\circ - 5^\circ$ 。然而，在偏向生长中容易出现能量阶梯。要防止出现能量阶梯，就必须使衬底的晶向偏离误差不超过几分。

不同的半导体器件对晶向和定向精度的要求也不相同。例如硅的双极器件，由于对迁移率的要求，多在 $\langle 111 \rangle$ 上制作；而硅的MOS器件，则由于对表面态密度的要求，多在 $\langle 100 \rangle$ 上制作。这两种器件定向精度一般要求在 1° 以内，而激光器件则要求定向精度在 $3'$ 以内。另外，几乎所有的半导体器件都要遇到光刻对准、布线方位和划片取芯等问题，这就需要定出参考边，以提高器件的成品率。

迅速准确地测定半导体单晶体的晶向，对于获得高质量的器件衬底是非常重要的。单晶定向的方法很多，本章只介绍常用的X射线Laue定向、X射线衍射仪定向、光学定向和解理定向。有关的一些晶体学知识可参阅有关资料^[1,2,3,4]，常用的数据列于附表。最后对电子计算机定向做一概述。

* 本章由王玉田执笔。

§ 1 半导体晶体结构

目前常用的半导体晶体有Ⅳ族元素半导体、Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体和Ⅱ-Ⅵ族化合物半导体等。其晶体结构主要有金刚石结构、闪锌矿结构和纤维锌矿结构三种，如附表 I 所示。

1.1 金刚石结构

金刚石结构属于立方晶系、面心立方点阵、 $m\bar{3}m$ 点群、 $Fm\bar{3}c$ 空间群。对称元素有四个三次轴 3、九个对称面 m 、三个四次轴 4、六个二次轴 2 和一个对称中心 Z （详见附表 I）。金刚石结构的晶格，实际上是由两个完全相同的面心立方子格相互平移 $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ 组合而成。通常选取含有 8 个原子的立方体为晶胞。其原子坐标分别是 $000, \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}$ ，如图 1.1(a) 所示。图 1.1(b) 是该立方晶胞在 (001) 面上的投影；(c) 是金刚石结构的一个四方晶胞，它在 (001) 面上的投影是图 (b) 中虚线所示的小正方形；(d) 是四方晶胞在 (110) 面上的投影。图中标的分数是原子在投影面以上的高度，即垂直于投影面的方向上原子间距的分数^[5]。

若图 1.1 中所示的原子是碳，那么碳原子间的结合就是靠其外壳层的四个价电子形成共价键。每个碳原子都位于一个正四面体的中心，而其最近邻的四个碳原子位于这个正四面体的顶角处。键的方向是从正四面体的中心指向正四面体的顶角，键夹角是 $109^\circ 28'$ ^[1,3]。如果我们以 abc 代表一个面心立方子格的密排顺序，而以 $a'b'c'$ 代表另一个面心立方子格的密排顺序，那么金刚石结构的排列顺序可表示为 $\cdots aa'bb'cc' \cdots$ 。若把 aa' 看

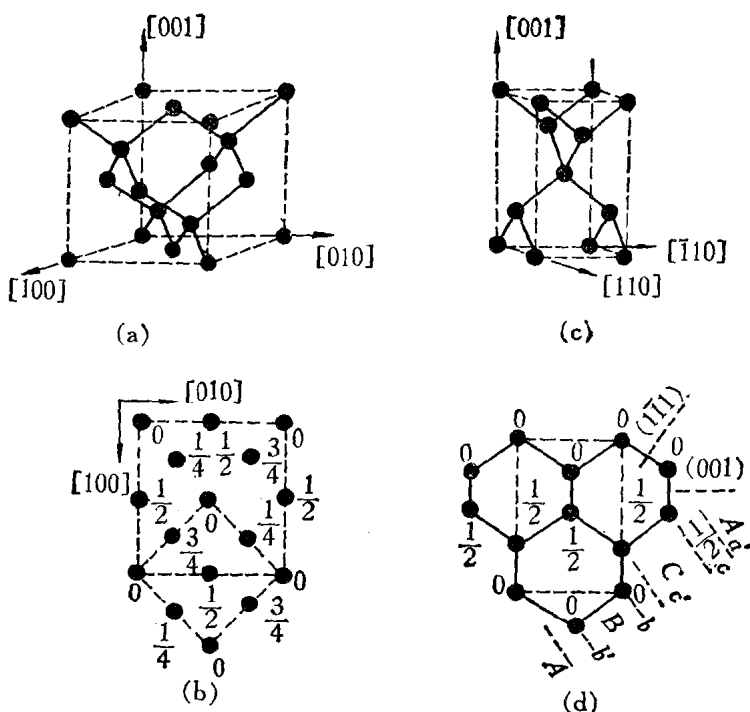


图1.1 金刚石结构

(a) 立方晶胞；(b) 立方晶胞在 (001) 面上的投影；(c) 四方晶胞；(d) 四方晶胞在 (110) 面上的投影。

做是一层， bb' 和 cc' 是另外两层，那么金刚石结构可用密排顺序…… $ABCABC$ ……来表示。除了金刚石以外，其他元素半导体硅、锗等也都是这种结构。

1.2 闪锌矿结构

闪锌矿 ZnS 由锌和硫两种原子组成，属于立方晶系、面心立方点阵、 $\bar{4}3m$ 点群、 $F_{\bar{4}3m}$ 空间群。对称元素有三个四次反演轴 $\bar{4}$ 、四个三次轴 3 和六个对称面 m 。

如图 1.2 所示，闪锌矿结构与金刚石结构很相似^[4]，所不同

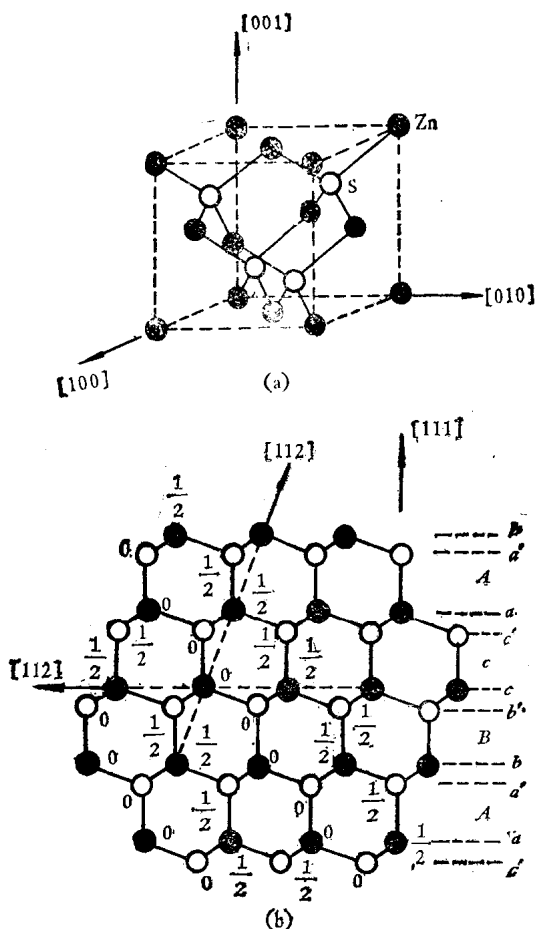


图1.2 闪锌矿结构

(a) 立方晶胞；(b) 原子列阵在 $(\bar{1}10)$ 面上的投影。

的只是两个相互平移 $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$ 的面心立方子格分别属于锌和硫。在一个立方晶胞中，若 $000, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$ 被锌原子占据，那么 $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$ 就被硫原子占据。每个

锌原子与其最近邻的四个硫原子形成共价键结合。若锌位于正四面体的中心，硫就位于正四面体的顶角。键合方向和键夹角与金刚石结构相同。在图 1.2(b) 中可以看到锌和硫原子排列的情况。若令 abc 为锌的密排顺序， $a'b'c'$ 为硫的密排顺序，并把 aa' (或 bb' , cc') 认为是一层，那么闪锌矿结构可以表示为…… $ABCABC$ ……的密排顺序。许多 III-V 族化合物半导体和 II-VI 族化合物半导体 (如 GaAs, InP, ZnSe 等) 都属于闪锌矿结构。

比较闪锌矿结构和金刚石结构可知，在对称性上，闪锌矿结构少一个对称中心。因此，闪锌矿结构具有许多特殊的性质。首先，闪锌矿结构具有极性，即 $[hkl]$ 不同于 $[\bar{h}\bar{k}\bar{l}]$ ，例如 $[111]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 就很不相同。事实上，由于 III、II 族离子带正电荷，而 V、VI 族离子带负电荷，因此沿着 $\langle 111 \rangle$ 方向这两层离子构成了电偶极层。闪锌矿结构就是由这些电偶极层的无穷排列构成的。通常定义 $[111]$ 为由 III 族 (或 II 族) 原子指向 V 族 (或 VI 族) 原子的方向，相反的方向为 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 。逆 $[111]$ 方向看去的晶面为 (111) ，逆 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向看去的晶面为 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 。由于 aa' 间的键合数目和 $a'b$ 间的键合数目之比是 1:3，所以 $a'b$ 间的结合要比 aa' 间的结合牢固得多。实际上，在研磨或化学腐蚀时，在 (111) 面上显露的总是 III 族 (或 VI 族) 原子，带正电荷；而在 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面上显露的总是 V 族 (或 VI 族) 原子，带负电荷。在 GaAs 单晶中，常把 (111) 叫做 Ga 面，而把 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 叫做 As 面。在做闪锌矿结构的选择腐蚀时，应当考虑到它具有极性这一特点 (详见第二章)。

1.3 纤维锌矿结构

ZnS 还有另一种结构——纤维锌矿结构^[8]。这种结构属于六角晶系、密排六角点阵、 $6mm$ 点群、 P_{6mc} 空间群，具体结构如图 1.3 所示。纤维锌矿结构其实与闪锌矿结构相近，只是其密排顺序不是…… $aa'bb'cc'$ ……，而是…… $aa'bb'aa'bb'$ ……，其密排面是 (0001) 。

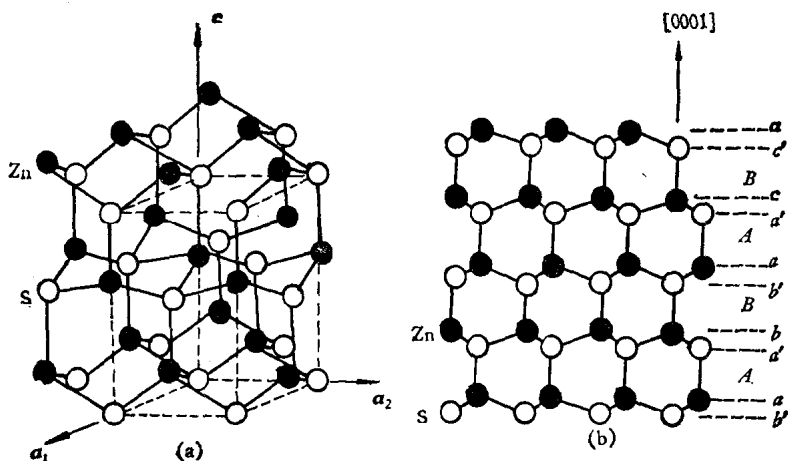


图1.3 纤维锌矿结构
(a) 六角晶胞；(b) 原子排列在 $(10\bar{1}0)$ 面上的投影。

§ 2 半导体单晶体的晶向测定

用一定的物理或化学方法测定单晶体的晶向，就叫做单晶定向。下面介绍几种常用的定向方法。

2.1 X 射线 Laue 定向

一般是先拍摄单晶体的 Laue 相，然后利用 Вульф 网和标准投影图对 Laue 斑点进行标注，从而确定单晶体的取向^[6,7]。这种方法比较繁琐，精度也不高。对于半导体单晶体，在拍摄 Laue 相以后，也可根据 Laue 衍射花样的对称性来确定单晶体的晶向。这样不仅简化定向步骤，而且也提高了定向精度。

(一) Bragg 方程

设空间点阵中有一套初基平移矢量 a , b , c ，当一束波长为 λ 的单色平行 X 射线沿图 1.4 所示的方向 σ_0 入射时，衍射线为

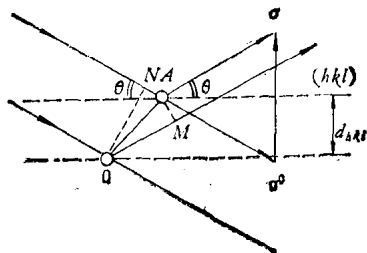


图1.4 X射线衍射原理

σ 。再假定 σ_0 和 σ 都是单位矢量， O 为点阵原点， OA 为一基本平移矢量，那么

$$OA = pa + qb + rc, \quad (1.1)$$

其中 p, q, r 为整数。由原点 O 和阵点 A 衍射的两束 X 射线的光程差，

$$\begin{aligned} \Delta &= OM - AN \\ &= OA \cdot \sigma - OA \cdot \sigma_0 \\ &= OA \cdot (\sigma - \sigma_0). \end{aligned} \quad (1.2)$$

干涉极大的条件是

$$OA \cdot (\sigma - \sigma_0) = m\lambda, \quad (1.3)$$

其中 m 为正整数。现在再假定

$$(\sigma - \sigma_0) / \lambda = ha^* + kb^* + lc^* \quad (1.4)$$

其中 a^*, b^*, c^* 是倒易晶格初基平移矢量，所以

$$OA \cdot [(\sigma - \sigma_0) / \lambda] = ph + qk + rl = m. \quad (1.5)$$

很明显， hkl 必须是整数，即矢量 $(\sigma - \sigma_0) / \lambda$ 必须是倒易矢量，其始点为坐标原点，其终点是倒易阵点 hkl 。

若有一晶面 (hkl) 垂直于倒易矢量 $(\sigma - \sigma_0) / \lambda$ ， d_{hkl} 是晶面 (hkl) 的晶面间距， θ 为入射 X 射线与晶面 (hkl) 的夹角，那么就可以认为衍射线是由晶面 (hkl) 反射而得。于是

$$|\sigma - \sigma_0| / \lambda = 2 \sin \theta / \lambda = 1 / d_{hkl}, \quad (1.6)$$

即

$$2d_{hkl} \sin \theta = \lambda. \quad (1.7)$$

由式 (1.5) 可知， h, k, l 可以含有一个公因子 n 。若令

$d = d_{hkl} / n$ ，于是式 (8) 可以写成

$$2d \sin \theta = n\lambda. \quad (1.8)$$

这就是 Bragg 方程， n 为衍射级数， θ 为衍射角 (或叫 Bragg 角)。

(二) Laue 衍射花样与晶体的对称性

如图 1.5 所示，晶体固定不动，以连续谱 X 射线平行光束入射，并在晶体的背反射位置或透射位置安放底片，这就是 Laue 衍射方法。由于入射线为连续谱，所以存在着许多由晶面族决定的衍射线束，这样在底片上就记录下许多斑点——Laue 斑点。每一个斑点由一 (hkl) 决定，而且不同级数的衍射束在同一方向。若对于晶面 (hkl) 有一个波长 λ_1 满足

$$2d \sin \theta = \lambda_1,$$

那么还可能存在另一个波长 $\lambda_2 = \lambda_1 / n$ ，并满足

$$2d \sin \theta = n\lambda_2,$$

即每个斑点都是由 (hkl) 的多级衍射组成的。因此，Laue 斑点的分布是由晶体的空间点阵决定的。

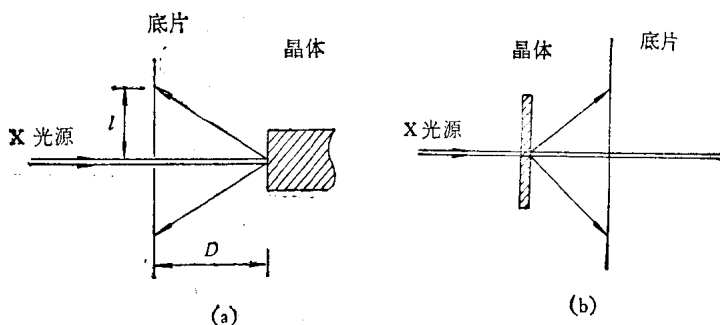


图 1.5 Laue 法定向的实验装置
(a) 背反射方法；(b) 透射方法。

在透射 Laue 相中，Laue 斑点都位于一些通过照相几何中心的椭圆上；在背反射 Laue 相中，Laue 斑点都位于一些双曲线上。可以证明，这些位于同一个椭圆或双曲线上的 Laue 斑点

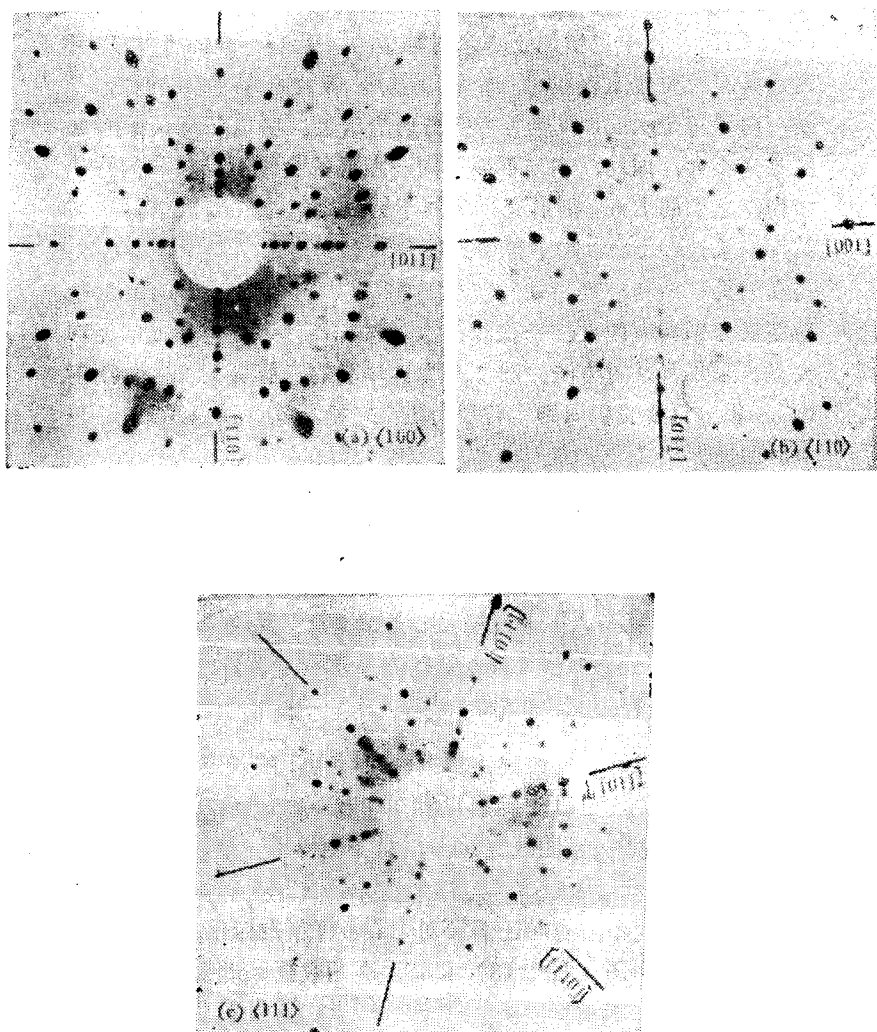


图1.6 硅单晶的背反射Laue衍射花样
(a) $\langle 100 \rangle$; (b) $\langle 110 \rangle$; (c) $\langle 111 \rangle$ 。

是某一个晶带上的晶面衍射的结果。因此，如果使入射 X 射线平行于某一个晶带轴，那么所获得的 Laue 相也应当具有相应的对称性。另外还必须注意的是，本来不存在对称中心的晶体，在 Laue 衍射花样中也增加了一个对称中心。若有一晶面 (hkl) ，必定在其对称位置上存在另一个和 $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ 等效的晶面 $(h\bar{k}\bar{l})$ 。但是，由于每个 Laue 斑点是多级衍射的结果，所以分辨其衍射强度意义不大。因此，本来不属于同一点群的金刚石结构和闪锌矿结构，它们的 Laue 衍射花样却属于同一个点群 $m\bar{3}m$ 。闪锌矿结构的极性在 Laue 相中得不到反应。总而言之，对于金刚石结构和闪锌矿结构，其 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 三个晶向的 Laue 衍射花样分别具有四次、二次和三次轴对称性。半导体单晶的定向大多数采用背反射方法。图 1.6 为硅单晶的三张 X 射线背反射 Laue 相。只要我们识别了背反射 Laue 相，就可以用来测定单晶的取向。

(三) Laue 斑点的位置

由图 1.5 可知，当一个 Laue 斑点 hkl 正落在照相几何中心时，晶向 $[hkl]$ 就与入射 X 射线重合。当这个斑点偏离几何中心一个距离 l 时，晶向 $[hkl]$ 与入射线的夹角

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{l}{D}, \quad (1.9)$$

式中 D 为单晶至底片的距离。因此，可以用 l 的长度来测量偏角 ϕ 。为方便起见，可以先确定 D 值（如 $D=30\text{mm}$ ），再根据式 (1.9) 画出 $l-\phi$ 关系曲线。这样，只要测得了 l 值，马上就可以查出偏角 ϕ 。

在实际定向中，有时还需要对 Laue 斑点指标化。这一工作可根据标准投影图（图 1.13）和晶面夹角数据来进行。各晶面夹角 δ 可以根据下式算出：

对于立方晶系

$$\cos \delta = \frac{Hh + Kk + Ll}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (1.10)$$

对于六角晶系

$$\cos \delta =$$

$$\frac{4(Hh + Kk + 1/2(Hh + Kk))/3a^2 + Ll/c^2}{\sqrt{4(H^2 + K^2 + HK)/3a^2 + L^2/c^2} \cdot \sqrt{4(h^2 + k^2 + hk)/3a^2 + l^2/c^2}} \quad (1.11)$$

在附表Ⅲ中给出了立方晶系各低指数晶面的夹角，并在附表Ⅳ中给出了立方晶系主要晶带中高指数晶面的方位角。

2.2 X射线衍射仪定向^[8,9]

(一) 结构因子

由式(1.8)可以看出，当波长 λ 确定以后，就可以确定对某个衍射晶面(hkl)和衍射级数 n 的衍射方向。但是，并不是满足了式(1.8)就一定有衍射线发生，产生不产生衍射线还与晶胞中各原子的坐标位置有关。因此，还必须考虑到结构因子 F 。

由于X光子与原子中电子的相互作用，X射线受一个晶胞散射的射线强度

$$I_b = F^2 I_e, \quad (1.12)$$

式中 I_e 是一个电子散射的相于散射波的振幅。如果这个晶胞中有 m 个原子，第 j 个原子的坐标是 x_j, y_j, z_j （晶胞的坐标矢量是 a, b, c ），而其原子散射因子是 f_j （如图1.4所示），则从原点 O 到第 j 个原子 A 的平移矢量 OA 是

$$OA = x_j a + y_j b + z_j c = r_j. \quad (1.13)$$

这两个原子的散射波的光程差

$$\Delta_j = r_j \cdot (\sigma - \sigma_0); \quad (1.14)$$

相位差

$$\begin{aligned} \psi_j &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_j = 2\pi r_j \cdot (\sigma - \sigma_0) / \lambda \\ &= 2\pi (hx_j + ky_j + lz_j). \end{aligned} \quad (1.15)$$

因此，结构因子可以写成

$$F = \sum_1^m f_j e^{i\psi_j} = \sum_1^m f_j e^{2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j)}. \quad (1.16)$$

对于金刚石结构，代入晶胞中 8 个原子的坐标，得

$$F_{hkl} = f [1 + e^{\pi i (h+k)} + e^{\pi i (h+l)} + e^{\pi i (k+l)}] \\ \times [1 + e^{\pi i / 2 (h+k+l)}]. \quad (1.17)$$

当 hkl 为异性数或 hkl 全为偶数，但 $h+k+l \neq 4n$ 时， $F=0$ ，衍射强度为零。

对于闪锌矿结构，有两种原子，代入晶胞中 8 个原子的坐标有

$$F_{hkl} = f_1 [1 + e^{\pi i (h+k)} + e^{\pi i (h+l)} + e^{\pi i (k+l)}] \\ + f_2 [e^{\pi i / 2 (h+k+l)} + e^{\pi i / 2 (3h+3k+l)} \\ + e^{\pi i / 2 (3h+k+3l)} + e^{\pi i / 2 (h+3k+3l)}]. \quad (1.18)$$

若两种原子的散射因子相差很小（如 Ga 和 As，当 $\frac{\sin \theta}{\lambda} \times 10^{-4} = 0.4$ 时，原子散射因子分别是 16.5 和 17.7），为方便起见可按金刚石结构处理。

金刚石结构允许的衍射有 111, 220, 311, 400, 331, 422, 511, 333, 426……等；不允许的衍射有 100, 200, 110, 211, 221, 321……等。在附表 V 中给出了常用半导体对于 $\text{CuK}\alpha$ 、 $\text{MoK}\alpha$ 和 $\text{AgK}\alpha$ 辐射的低指数晶面衍射角，以备查阅。

(二) X 射线衍射仪定向方法

这是一种单色 X 射线定向方法。通常是把晶体放在衍射仪的三维测角头上，使单晶可以沿三个互相垂直的轴旋转。首先在附表 V 中查出预定晶面 (hkl) 的衍射角 θ ，并把探测器放在 2θ 的位置上。依次旋转测角头的三个轴，使探测器获得最大衍射强度。入射线和衍射线夹角的角平分线方向即为所测晶面 (hkl) 的法线方向。

在半导体单晶定向中，常用 X 射线衍射定向仪定向。国产 YX-1 型 X 射线衍射定向仪就是这种专用设备。这种定向仪的测