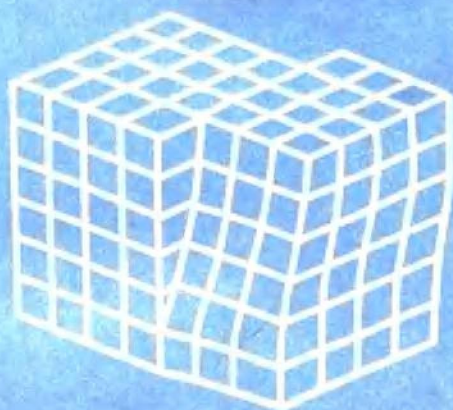


位错导论

D. 赫尔 D. J. 培根 著



科学出版社

位错导论

D. 赫尔 D. J. 培根 著

丁树深 李 齐 译

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书是一部关于位错的入门教科书，也是凝聚态物理学的基础读物。该书概念十分清楚，图文并茂，深入浅出，通俗易懂。全书共十章：主要介绍晶体中的位错；位错的观察；位错的运动和弹性性质；面心立方金属中的位错；其它结构晶体中的位错；割阶与位错交截；位错排列与晶界；晶态固体的强度等。每章末尾还附有参考文献。

本书可供从事固体物理学、材料科学的科研和教学的师生参考或作为教学用书，也可供从事冶金、压力加工等有关专业科技工程人员参阅。

D. Hull and D. J. Bacon
INTRODUCTION TO DISLOCATIONS
Third Edition
Pergamon Press, 1984

位 错 导 论

D. 赫尔 D. J. 培根 著

丁树深 李 齐 译

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

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

1990 年 8 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32
1990 年 8 月 第一次印刷 印张：9 7/8
印数：0001—1 210 字数：220 000

ISBN 7-03-001771-4/O · 344

定 价：9.90 元

第三版序言

位错是理解晶体的许多物理和力学性质的重要基础。因此，本书现在仍可作为供学习而普遍使用的大学教本。学生和教师可以放心的是，在位错基本原理方面多年来几乎没有取得过重大的进展，因此不需要对位错内容和处理方法作重大的修改。

本书第一版问世已将近 20 年，但是我们发现并无必要改变本书的主要结构和所采用的处理方法。然而，这一版还是做了较大的修订，增添了一些新的重要段落。修订得较多的是关于实验技术、位错的弹性性质、作用在位错上的力、特定晶体结构中的位错、界面的位错实质以及晶体的强度等内容。为了避免本书过于冗长，我们还删去了少数由于技术和认识的进步而显得有些过时的段落。同时，我们还利用改写某些段落的机会，对其内容作了新的阐述，以便更符合现代的观点。

本版中我们仍着重从物理角度去阐明位错的几何性质和排列方式，但却用了稍许严格一些的方法去介绍位错理论的数学处理。这样做对于需要用到位错理论的读者是十分有用的，而对于那些只需要大致了解位错理论的读者也不会有害处。我们并没有打算把本书改写成一部学术专著。

我们要衷心感谢许多朋友和同事的帮助，他们对本书提出过许多宝贵意见或者允许我们使用他们的样图。我们所在的利物浦大学的同事们曾提出过许多有益的建议，这其中特别要提到 G. J. Tatlock 博士、R. C. Pond 博士和 F. W.

Noble 博士,他们对我们撰写本书第二章、第九章和第十章都各有贡献。Noble 博士还向我们提供了他的课堂笔记。

D. 赫尔

D. J. 培根

1983 年 7 月

第一版序言

晶体中存在位错,虽然早在 30 年前就提出过,但位错存在的重要意义得以普遍的承认,那还是最近 15 年的事。现在,位错是了解晶体材料诸多性能的基础。近 15 年来,位错这门学科已由深奥的研究课题转变为大学本科和大专(技术学校)学生的必修课程。通过 A. H. Cottrell 教授和 T. W. Reed 博士 10 年前分别编写的两部杰出专著及大量研究论文已知道,位错的用途已经十分广泛。虽然位错在很多方面的应用仍处于不断完善之中,但是根据理论分析和实验观察证实了渐臻完善的位错知识是构成许多概念和理论的基础。虽然有关位错一些带根本性的重要问题目前仍有待解决,但位错基本概念、尤其是位错入门知识似乎不会有太大的更改。

鉴于位错和建立普遍公认的位错原理的重要意义,我们有必要提供关于位错及其性能方面的资料,以便可用来作为了解晶体材料诸多性能的入门,这就是本书的目的。本书以一年课程的部分内容为基础,吸收了我给冶金系学生开设的“晶体缺陷与力学性能”课程和我为物理系及工程系学生讲授“材料性能”等入门课程的某些内容。

本书的处理方法反映了我对学生们所着重提出的要求,即学生们必须详细了解晶体中位错的三维几何。一旦掌握了这种处理方法,就很容易理解与位错有关的许多概念。

本书阐述了晶体中位错的几何形状、性质和行为。位错这门学科得以发展起来,就是因为这种位错处理方法适合所有的晶体材料。除了叙述观察和研究位错的方法之外,书中

的第一部分还叙述了位错的几何形状、运动和弹性性能等基本特征。之后,比较详细地叙述了面心立方、密堆积六方、体心立方、离子、层状和超点阵等特殊晶体结构中的位错特征。有两章是讨论诸如位错,割阶和位错增殖交互作用等与位错运动相关的位错基本性质。在另一章中描述了位错几何形状及其性能。最后,讨论了位错与杂质、点缺陷和其他位错等晶体缺陷之间的交互作用以及位错穿过含有这类缺陷而运动所需之应力。

本书是为满足大学本科高年级课程需要而编写的。有些材料可能超出学位结业考试的一般标准,但我认为让学生多学一些知识将有助于更深入理解已经学过的知识。从前四章及其他章节中可得到比学位考试标准更浅一些的课程内容。

每章末尾列出详尽的专著目录,这在大学教科书中并不多见。所列(专著和研究论文)是经过精选的,对于想要深入钻研位错的人,这些文献肯定是有参考价值的。这里还引入了许多有关位错的更为纯理论性的见解和说明位错理论的实际应用途径。为有助于学生审慎选择,除了文献资料的出处,书末还附有有关专著的目录。

(以下为著者对该书出版有关人员的致谢,从略)。

D. 赫尔

目 录

第三版序言.....	vii
第一版序言.....	ix
第一章 晶体中的缺陷.....	1
§1.1 晶体材料	1
§1.2 简单晶体结构	5
§1.3 晶体材料中的缺陷	10
点缺陷	11
层错	13
晶界	15
孪晶界	16
体缺陷	17
§1.4 位错	17
位错几何学	19
柏氏矢量和柏氏回路	21
第二章 位错的观测.....	27
§2.1 引言	27
§2.2 表面法	27
§2.3 缀饰法	30
§2.4 电子显微术	33
一般原理	33
位错	37
面缺陷	40
晶格象	42
其它因素	42
§2.5 X射线衍射形貌术	44

§2.6 场离子显微术	45
§2.7 计算机模拟	47
模拟成象	47
模拟缺陷	49
第三章 位错的运动	50
§3.1 滑移的概念	50
§3.2 位错和滑移	51
§3.3 滑移面	54
§3.4 交滑移	58
§3.5 位错的速度	59
§3.6 攀移	64
§3.7 攀移的实验观察	68
棱柱位错环	68
蜷线位错	69
§3.8 保守攀移	71
§3.9 位错运动所引起的范性应变	74
第四章 位错的弹性性质	77
§4.1 引言	77
§4.2 弹性理论的基本原理	77
§4.3 直线位错的应力场	82
螺型位错	82
刃型位错	84
§4.4 位错的应变能	86
§4.5 作用在位错上的力	89
§4.6 位错之间的相互作用力	92
§4.7 攀移力	96
§4.8 象力	98
第五章 面心立方金属中的位错	101

§5.1	全位错	101
§5.2	不全位错—— Shockley 不全位错	102
§5.3	滑移	104
§5.4	Thompson 四面体	113
§5.5	Frank 不全位错	114
§5.6	Lomer-Cottrell 不滑位错	120
§5.7	层错四面体	123
第六章	其它结构晶体中的位错	126
§6.1	引言	126
§6.2	密堆积六方金属中的位错	126
	柏氏矢量与堆垛层错	126
	基面滑移与非基面滑移	130
	空位环与填隙环	133
§6.3	体心立方金属中的位错	137
§6.4	离子晶体中的位错	145
§6.5	超点阵中的位错	149
§6.6	共价晶体中的位错	152
§6.7	层状结构中的位错	157
§6.8	聚合物晶体中的位错	157
第七章	割阶与位错交截	161
§7.1	引言	161
§7.2	位错的交截	161
§7.3	含元割阶位错的运动	165
§7.4	超割阶	168
§7.5	割阶与稜柱位错环	173
§7.6	扩展位错的交截与扩展割阶	175
§7.7	相吸的与相斥的交结	177
§7.8	扩展的层错结点	181

第八章 位错起源与增殖	184
§8.1 引言	184
§8.2 新生长晶体中的位错	184
§8.3 位错的均匀成核	186
§8.4 应力集中处的位错成核	187
§8.5 Frank-Read 源的位错增殖	191
§8.6 多重交叉滑移式增殖	194
§8.7 攀移增殖	196
§8.8 晶界源	198
第九章 位错排列与晶界	199
§9.1 范性形变、回复与再结晶	199
§9.2 简单位错晶界	206
§9.3 一般大角度晶界	209
§9.4 位错列阵的应力场	216
§9.5 位错排列的应变能	221
§9.6 大角度晶界的结构	225
§9.7 晶界的运动	231
§9.8 错配位错	234
§9.9 位错塞积	237
第十章 晶态固体的强度	240
§10.1 引言	240
§10.2 流变应力与温度、应变速率的关系	242
§10.3 Peierls 应力与点阵阻力	246
位错核心结构	246
Peierls 势垒	249
§10.4 点缺陷与位错的交互作用	253
§10.5 溶质气团与屈服现象	259
位错钉扎(锁)	259

屈服下降	264
§10.6 无规排列障碍下的流变应力	269
弥散作用力	269
局域作用力	271
§10.7 合金的强度	273
溶液、沉淀与时效	273
固溶强化	277
沉淀强化	278
§10.8 加工硬化	281
§10.9 多晶体的形变	286
参考文献	290
标准国际单位制 (SI)	299
《材料科学和技术丛书》的其他图书目录	301

第一章 晶体中的缺陷

§ 1.1 晶体材料

金属和许多重要的非金属固体都是结晶体，即组成固体的原子排列成三维周期性重复的花样。原子的实际排列可以用晶体结构来描述。大多数纯金属具有简单晶体结构，而在§1.2中叙述的体心立方、面心立方和密堆积六方结构是三种最常见的晶体结构。可是，合金和非金属化合物的晶体结构通常比较复杂。

晶体中的原子排列可用图 1.1(a) 那样的三维直线网格来描述，这些直线把空间分割成尺寸相同的平行六面体，这些

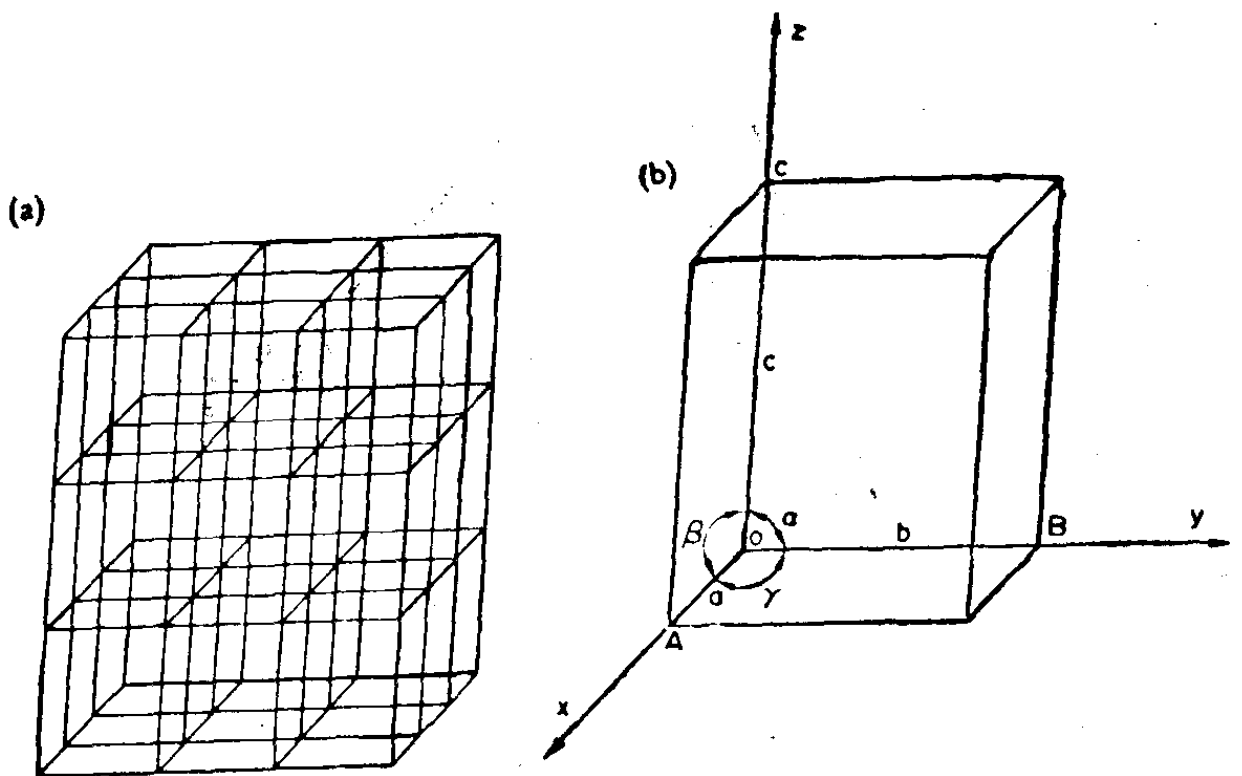


图 1.1 (a)空间点阵；(b)已算出主轴位置的单胞。

直线的交点称为空间点阵。空间点阵的每个点都具有相同的周围环境。每个平行六面体称为单胞，晶体是由单胞面对面堆砌成的完整的三维排列。在每个点阵位置上的一个或数个原子的基本单元可组成完整晶体的规则结构。

点阵中的晶面、晶向和结点位置可用单胞和三个主轴 x, y, z [图 1.1(b)] 来描述。单胞尺寸 $OA = a, OB = b$ 和 $OC = c$ 是点阵参数，而这些参数和角 $\angle BOC = \alpha, \angle COA = \beta$ 和 $\angle AOB = \gamma$ 一起完全确定了单胞的尺寸和形状。为简单起见，我们只讨论立方和六方晶体结构。在立方晶体中， $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，而其晶面和晶向的定义是一目了然的。对于六方晶体，采用不同的处理方法更为合适，这将在 §1.2 中叙述。

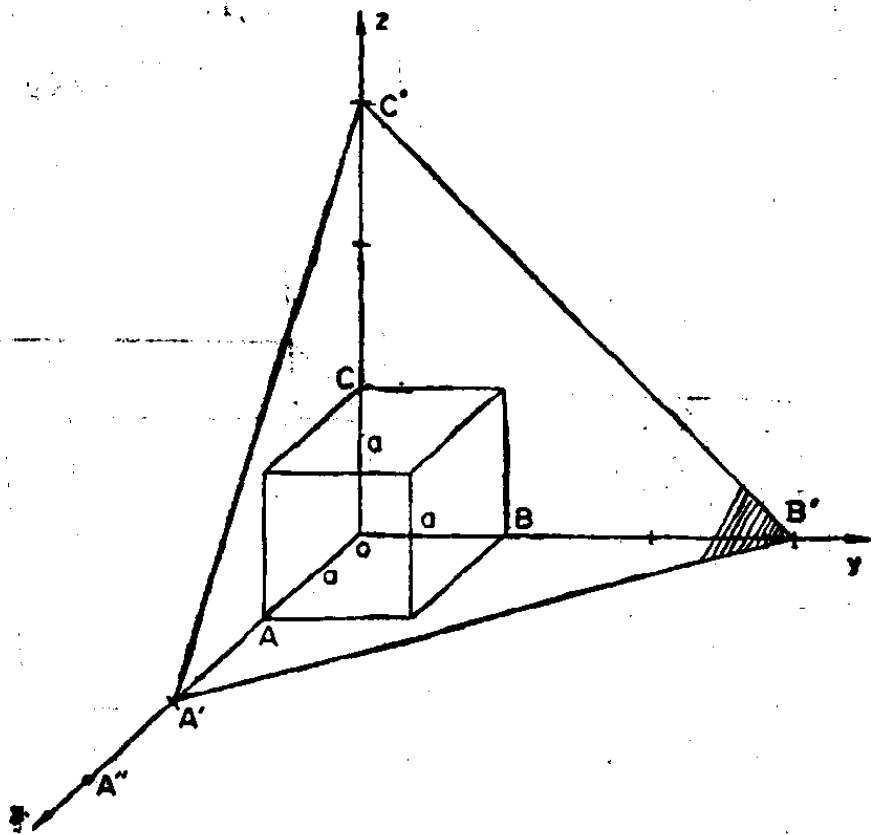


图 1.2 描述晶面位置的立方单胞图示方法。

在图 1.2 中，任一晶面 $A'B'C'$ 均可用它与三个主轴的截

距 OA' , OB' 和 OC' 来定义。通常采用的符号 (Miller 指数) 是取这些截距与相应单胞尺寸之比的倒数值。因此, $A'B'C'$ 由

$$\left(\frac{OA}{OA'}, \frac{OB}{OB'}, \frac{OC}{OC'} \right)$$

给出, 然后将该数再简化成具有相同比率的三个最小整数。

从图 1.2 中可得出, $OA' = 2a$, $OB' = 3a$, $OC' = 3a$, 所以 $A'B'C'$ 面的 Miller 指数为 (322)。截距为 OA , OB 和 OC 的晶面 Miller 指数为

$$\left(\frac{a}{a}, \frac{a}{a}, \frac{a}{a} \right),$$

或简化为 (111)。同样, 在图 1.3 中, $DFBA$ 面指数为

$$\left(\frac{a}{a}, \frac{a}{a}, \frac{a}{\infty} \right),$$

或 (110); 而 $DEGA$ 面为

$$\left(\frac{a}{a}, \frac{a}{\infty}, \frac{a}{\infty} \right),$$

或 (100); 而图 1.2 中的 $A'B'C'$ 面是

$$\left(\frac{a}{2a}, \frac{a}{3a}, \frac{a}{3a} \right),$$

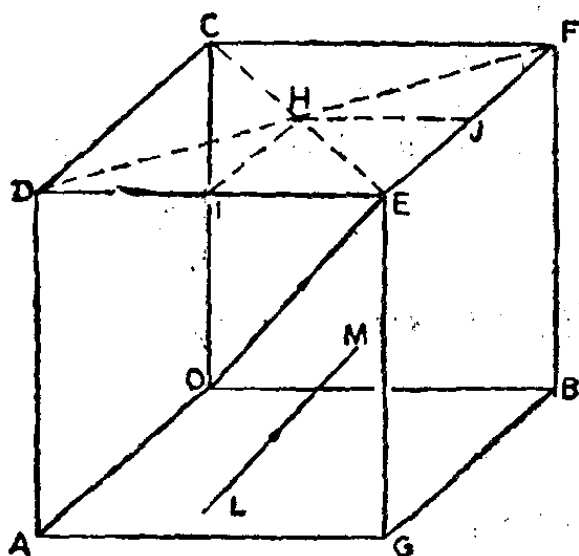


图 1.3 描述方向和结点位置的立方单胞图示方法。

或 (322)。为了确定任一晶面的指数, 最简便的办法是确定一个与该晶面平行的点阵平面, 使其与原点最靠近、且与主轴相交。图 1.2 中的 $A'B'C'$ 面平行于 ABC 面, 显而易见, 其晶面指数为 (111)。在图 1.3 中, 用这种处理办法可以看出: ABC , ABE , CEA 和 CEB 晶面指数分别为 (111), $(11\bar{1})$, $(\bar{1}11)$ 和 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 。在立方晶体结构中, 这些晶面构成具有相同晶体学类型的晶

面族,统称为 $\{111\}$ 。某一指数上方的负号表示晶面在坐标轴负方向与该坐标轴相交。

图 1.3 中示出的任一方向 LM 可用通过原点、且平行于 LM 的直线来表示。在此情况下,该直线为 OE 。这个方向为 OE 在三个主轴上的三个分量(即 OA,OB 和 OC)与单胞尺寸的最小整数比。因此,如果单胞由 OA,OB 和 OC 构成,则 LM 的方向为

$$\left[\frac{OA}{OA}, \frac{OB}{OB}, \frac{OC}{OC}\right],$$

或

$$\left[\frac{a}{a}, \frac{a}{a}, \frac{a}{a}\right],$$

即 $[111]$ 。方括号是用来表示方向的。 CG, AF, DB 和 EO 的方向分别为 $[1\bar{1}\bar{1}], [\bar{1}1\bar{1}], [\bar{1}\bar{1}1]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$,它们属于用一晶体学类型的方向,用 $\langle 111 \rangle$ 统称之。与此类同, CE 的方向是

$$\left[\frac{a}{a}, \frac{a}{a}, \frac{0}{a}\right],$$

或 $[110]$; AG 的方向是

$$\left[\frac{0}{a}, \frac{a}{a}, \frac{0}{a}\right],$$

或 $[010]$; GH 的方向是

$$\left[\frac{-a/2}{a}, \frac{-a/2}{a}, \frac{a}{a}\right],$$

或 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 。本书采用方括号 $[\]$ 和圆括号 $(\)$ 分别表示特定的晶向和晶面,而 $\langle \rangle$ 和 $\{ \}$ 则分别代表同一类型的晶向和晶面。

在立方晶体中,一个晶面的 Miller 指数和垂直于该晶面的晶向指数相同。因此,图 1.3 中的 $EFBG$ 面指数为 (010) ,而垂直于 $EFBG$ 面的方向 AG 的指数为 $[010]$ 。同理, OE $[111]$ 方向垂直于 $CBA(111)$ 面。

晶体中的任一点是通过该点沿三个主轴的位移与单胞尺寸之比的分数值来表征的。图 1.3 中单胞的中心为 $1/2, 1/2, 1/2$ ，而 F, E, H 和 I 点则分别为 $0, 1, 1$; $1, 1, 1$; $1/2, 1/2, 1$ 和 $1, 1/2, 1$ 。

§ 1.2 简单晶体结构

在这一节中我们把原子视为刚球，其尺寸随元素不同而变化。按照这种刚球模型，单胞参数可直接用球的半径 r 表示。在说明晶体结构的示意图中，小圆圈表示三维图中的原子，而大圆圈代表二维图中的原子，并表征刚球的大小。可以看出，晶体结构可以看成是原子层的堆垛，而每层的原子排列则是完全一样的。为了在二维图中清楚地看出这一点，纸面上的一层原子以大圆圈表示，而其上、下原子层中的原子用黑的小圆表示。原子层的顺序或序列，即堆垛顺序，是以给定某一层为 A 层作参考而确定的。原子位置与 A 层相同的其它原子层也称 A 层。堆垛中处于其它位置的原子层用 B, C, D 层表示。

在简单立方结构中(如图 1.4 所示)，原子坐落在单胞角顶。图 1.4(b), (c) 分别为 (100) 和 (110) 面上的原子排列。这些原子沿 $\langle 001 \rangle$ 方向邻接，因而晶格参数 a 为原子半径 r 的两倍 ($a = 2r$)。相邻 (100) 面内的原子在垂直于该面的方向上处于等价的原子位置上，从而使 (100) 面的堆垛顺序成为 $AA\cdots$ 。相邻的 (110) 面内的原子彼此沿 $[\bar{1}10]$ 位移了 $\frac{1}{2}a\sqrt{2}$ ，而沿 $[110]$ 方向上的原子间距为 $a\sqrt{2}$ 。由此可见，每间隔一层原子面，在垂直于 (110) 的方向上原子位置是相同的，因而 (110) 面的堆垛顺序为 $ABABAB\cdots$ 。相邻 (110) 面的间距为 $\frac{1}{2}a\sqrt{2}$ 。