

BAN DAO TI  
ZHONG LI ZI ZHU RU

[英] G. 加特 W.A. 格兰特 著

5.3  
半导体中离子注入

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍运动离子与固体原子的相互作用、离子注入固体中的分布、沟道效应、离子注入在固体内产生的损伤以及离子分布和损伤的测量方法，最后介绍了离子注入在半导体器件上的应用。着重介绍离子注入方面的基本概念和理论。

本书可供从事离子注入方面工作的科研和技术人员使用，亦可供大专院校有关专业师生参考。

## ION IMPLANTATION OF SEMICONDUCTORS

G. Carter W. A. Grant  
Edward Arnold Ltd. 1976

\*

### 半导体中离子注入

G. 加 特 著  
〔英〕 W. A. 格兰特  
张光华 赵 越 译  
黄永宝 校

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1/32</sup> 印张7<sup>13/16</sup> 199千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·2324 定价：1.00元

## 译者的话

离子注入是低能核物理和固体物理之间的一门边缘学科。近二十年来，离子注入的理论和应用在国外已有很大的发展，六十年代初，林哈德等人建立了离子注入无定形固体的理论，奠定了离子注入技术发展的理论基础，而大量的实验工作正在探索离子注入固体的各种物理（包括光学、机械、电学和热学）性质。离子注入在半导体方面的应用最为突出，已经成为半导体集成电路和电子器件制造中的一项重要新技术。目前，已开始离子注入金属、绝缘体、磁性材料和超导材料方面的研究。

本书是根据 G. 加特、W. A. 格兰特所著《半导体中离子注入》一书的第一版（1976年版）翻译的，也是作者在英国设菲尔德（Salford）大学讲授的材料，内容较全，取材新颖。它对离子注入的基本概念和理论阐述比较详细，介绍了实验方法，引用了大量的实验结果，并对离子注入在半导体方面的应用作了概述。因而，它是一本对科技人员和大学有关专业的师生们很有益的书。由于译者水平有限，译文中一定有不少错误，希望读者批评指正。

## 目 录

第1章 引言 .....	1	5.2 固体中的点缺陷 .....	126
1.1 历史的回顾 .....	1	5.3 固体中的扩展缺陷 .....	130
1.2 基本概念 .....	2	5.4 离子注入产 生的缺陷 .....	135
1.3 应用 .....	4	5.5 级联的尺寸 .....	149
1.4 晶体结构 .....	6	5.6 晶状固体中产生 的无序 .....	159
1.5 半导体的掺杂 .....	9	5.7 缺陷的迁移和退火 .....	171
第2章 原子间的碰撞 .....	12	第6章 辐射损伤 的测量 .....	177
2.1 引言 .....	12	6.1 引言 .....	177
2.2 弹性碰撞 .....	14	6.2 观测损伤的直接法 .....	177
2.3 非弹性碰撞 .....	43	6.3 观测损伤的间接法 .....	186
第3章 离子射程 .....	49	6.4 实验测量 .....	188
3.1 引言 .....	49	6.5 无序的稳定性 .....	206
3.2 射程概念 .....	51	第7章 器件应用 .....	210
3.3 射程计算 .....	56	7.1 引言 .....	210
3.4 LSS的概述 .....	61	7.2 注入层的电学性质 .....	211
3.5 计算机计算和模拟 .....	67	7.3 平面扩散工艺 .....	219
3.6 测量技术 .....	69	7.4 注入结的性质 .....	222
3.7 实验结果 .....	72	7.5 特殊器件 中的应用 .....	227
第4章 沟道效应 .....	79	参考文献 .....	240
4.1 沟道现象 .....	79		
4.2 卢瑟福散射和沟道 .....	94		
4.3 通量峰 .....	111		
第5章 缺陷的产生 .....	125		
5.1 引言 .....	125		

# 第1章 引言

## 1.1 历史的回顾

应用离子束改变固体表面层的性质是一个较为近期的发明。它在固体电子器件的生产方面起了促进作用，并得到了广泛的应用。1948年研制出第一个晶体管后，1956年实现了用离子注入法有控制地引入电活动的掺杂剂，并将许多专利归了档。第一个应用是在核粒子探测器的制造方面<sup>(1)</sup>。因为掺杂用的离子束容易进行大面积扫描和借离子能量控制穿透深度，所以这一新技术适用于这些大面积的浅结二极管。起初，离子注入的应用发展较慢，约从1966年开始加快，到七十年代的早期，生产电子器件的主要厂家便都积极采用这项新技术。在许多情况下，离子注入是作为发展器件的研究工具，但也正在成为大量生产中一个不可缺少的制造方法。

自然，用辐照改变固体的性质这一客观事实，早在最近应用于半导体掺杂之前很久就已实现。远在35年前，核反应堆的发展促进了固体中辐照损伤的研究。反应堆材料中的原子与中子碰撞后以千电子伏的能量反冲，而裂变碎块也具有较大的动能。由于这些投射体与其它原子碰撞时失去能量，它们会引起大量的辐照损伤。曾用离子束模拟反应堆材料中发生的情况，仅仅几小时的离子注入就能准确地模拟反应堆运转许多年的效果。

能够产生强力聚焦离子束的机器的发展<sup>(2)</sup>，与离子注入的进展和辐照损伤的研究紧密相关。世界各地已在元素同位素分离机器上进行了大量的研制工作，而一些现代的离子注入机直接仿效这些分离器。关于离子注入的最早的会议之一，基本上是一次关于同位素分离器的会议。今天可以得到的离子束机，包括产生各种同位素离子束的尖端研究装置，和只提供一、二种离子的简单

生产机器。并且，已把它们用于集成电路的常规注入中。

六十年代的早期，人们发现了沟道现象，尔后投入大量的研究力量。在用计算机模拟重离子在单晶点阵中的运动时，人们发现，当离子陷入靶原子排（或面）内时，某些轨道能让离子移动很大的距离。不久，进行了实验证明，并从此对沟道现象进行了广泛的理论和实验研究。在探索离子注入的固体的许多性质时，已证明沟道是一种极为有用的方法。

在近几年中，离子注入在电子器件的生产中起了作用。在这个领域最早地推动了该项技术的发展。在其它领域中<sup>[3,4]</sup>，应用离子注入的兴趣也正在增长，因为除电学性质外，固体的许多性质，可利用掺杂或辐照损伤来改变。

## 1.2 基本概念

具有大能量的离子束，可把掺杂剂引入固体表面层，这一过程称作离子注入。为了讨论和描述这个过程，需要考虑对总的图象起作用的各个概念和题目。这些如下所述：

1. 二元碰撞 虽然离子注入是包含许多离子的束与包含许多原子的固体相互作用，但一个离子和一个靶原子间的碰撞是最基本的。在许多情况下，可把离子进入固体的问题看作是一系列的二元碰撞，离子每次只与一个靶原子相互作用（或碰撞）。因此，二元碰撞动力学的研究是离子注入中任何研究的基础。

2. 原子间的势 两个原子间的碰撞，实质上取决于原子间的势 $V(r)$ 。可从 $V(r)$ 导出作用于两个粒子上的力和它们的轨迹，所以了解原子间的势是最基本的。因此，我们需要讨论用来求得满意的 $V(r)$ 表达式的不同方法。

3. 能量损失 当一个离子穿透固体时，它与靶原子进行一连串的碰撞，因而失去本身的能量，直到最后停止。每次碰撞损失的能量将决定其总的路程长度（或离子射程）。能量的损失可看作是通过弹性或非弹性过程发生的。前者，动能是守恒的，后

者，通过原子的电子激发，动能变成了另外的形式。

4. 离子射程 一个离子的射程由它的能量损失率所决定。有了对能量损失过程的描述和计算，便能算出离子的射程和预测靶表面层内注入杂质的空间分布。在非晶体或无定形材料中，具有大能量的注入离子是高斯型分布，但在单晶中，因为晶体结构能决定射程的分布，所以分布变得比较复杂。

5. 沟道效应 在单晶中，点阵原子在空间周期性地排列着，而在某些方向，结构具有敞开的沟道，沟道限制在密排的壁之间。离子进入这些方向，不象在无定形材料中那样作相继的随机碰撞，而是与沟道壁的原子进行连续的相关碰撞。这对离子注入的许多方面有着深远的影响。

6. 损伤 当投射体减慢时，能量从投射体传给靶原子。一个获得足够动能的原子将从其点阵位置移动，而靶将受到辐照损伤。由于移动一个原子所需能量的典型值是 $\approx 25$ 电子伏，那么，具有几千电子伏能量的重离子可引起严重的损伤。反冲的靶原子本身可以有足够的能量，它起第二个投射体的作用，使其它的原子移动，并产生级联的位移碰撞。

7. 退火 注入过程中，位移的原子在较后的阶段，可能返回到它们正常的位置。这种退火可以在短时间内发生（例如在级联碰撞正在通过点阵进行的期间），或者在注入完成之后的较长时间内发生。提供热能往往促进退火。辐照损伤常常是离子注入的必然结果，并可能掩盖住希望的掺杂效果。所以辐照损伤和退火的机理是极为重要的。

8. 掺杂 加入杂质（或掺杂剂）能改变大部分材料的化学和物理性能。这些变化应当与辐照损伤引起的变化区别开，最引人注目的效果已在半导体中见到。在其中加入百分比很小的杂质，就能控制电子的导电过程，并成为固态器件工艺的基础。离子注入掺杂类似于其它方法掺杂，又显著不同于其它方法（其中主要是热激发的扩散方法）掺杂。在扩散技术中，把掺杂剂淀积在衬

底表面上，然后利用高温退火驱入。掺杂剂的浓度分布依赖于特定的掺杂剂/靶组合的热平衡标准。对比起来，离子注入是一个非平衡过程，掺杂原子利用它们多余的动能强行驱入固体。这样，可形成用传统的方法所不能获得的化合物。

除上述提到的几点以外，离子注入过程中还包括其它的题目和概念，这些将在以后的章节中讨论。比如，离子可能没有穿透靶的表面，而是与最表层的原子碰撞后反射回来。在预测掺杂浓度时，这个效应很重要。由于反射的离子在碰撞时被中和，这就给测得的注入离子剂量带来了误差。导致错误测量离子剂量的另一个效应，是重离子的辐照引起靶释放二次电子。进入的一个带正电的离子可以释放一个或多个靶电子，为了正确地测量离子流，必须抑制电子的释放（即反回或限制在靶内）。得到足够的能量，并在适当方向运动的靶原子，可以从靶中发射出来，此过程称为溅射。因溅射而引起的表面腐蚀将改变掺杂的分布，因为在靶表面后退缩时，以前俘获的离子被释放出来。所以在大多数离子注入半导体的实验中，离子剂量一般是 $<10^{18}$ 离子/米<sup>2</sup>，同时，对千电子伏的重离子投射体而言，溅射系数（即每个入射离子释放的靶原子数）的典型值 $<5$ ，所以可以忽略靶的腐蚀（在固体靶的表面上包含 $10^{19}$ 离子/米<sup>2</sup>）。在高剂量实验中，溅射过程可以决定能够达到的最大掺杂浓度。

### 1.3 应 用

一般来说，只限于讨论上述1到8中描述的那些概念和过程。尤其关心用离子注入进行半导体掺杂。然而，这一技术能够用来大幅度改变固体的物理和化学性质，因此需要对其中的一些过程加以注意。

金属的腐蚀是个表面现象，用离子注入的表面层很适合研究它。低浓度掺杂剂的存在能决定不锈钢的性质，例如掺入低浓度的铬，在多种环境条件下，它形成保护性的氧化物。图1.1示出



了铬和钽注入铁的水腐蚀的研究结果<sup>[6]</sup>。这些实验是将样品浸入特殊的水溶液中，外加不同的电位，测量流过的对应电流。刚好在保护性氧化物形成和表面钝化开始之前，流过的最大（或临界的）电流用作腐蚀的量度。对于通常的铁/铬合金块，以  $I_c$  对铬的百分比作图，图中表明，铬的百分比较高时，钝化前的溶解速率较小。用离子注入样品获得的数据也画在图 1.1 中，并且证明离子注入的铁/铬表面合金具有与大块合金同样的性能。20 千电子伏， $5 \times 10^{20}$  离子/米<sup>2</sup>剂量的铬与一个含  $\approx 4.2\%$  铬的通常合金性能相似。比如，化学掺杂的效果显然优于辐照损伤引起的任何相反的效果。此外，也研究了离子注入产生的铁/钽表面合金。用常规的方法不能制造这种合金。它比铬合金优越（至少在这些研究的条件下是如此）。在金属腐蚀方面的许多研究中，离子注入是一项新技术。

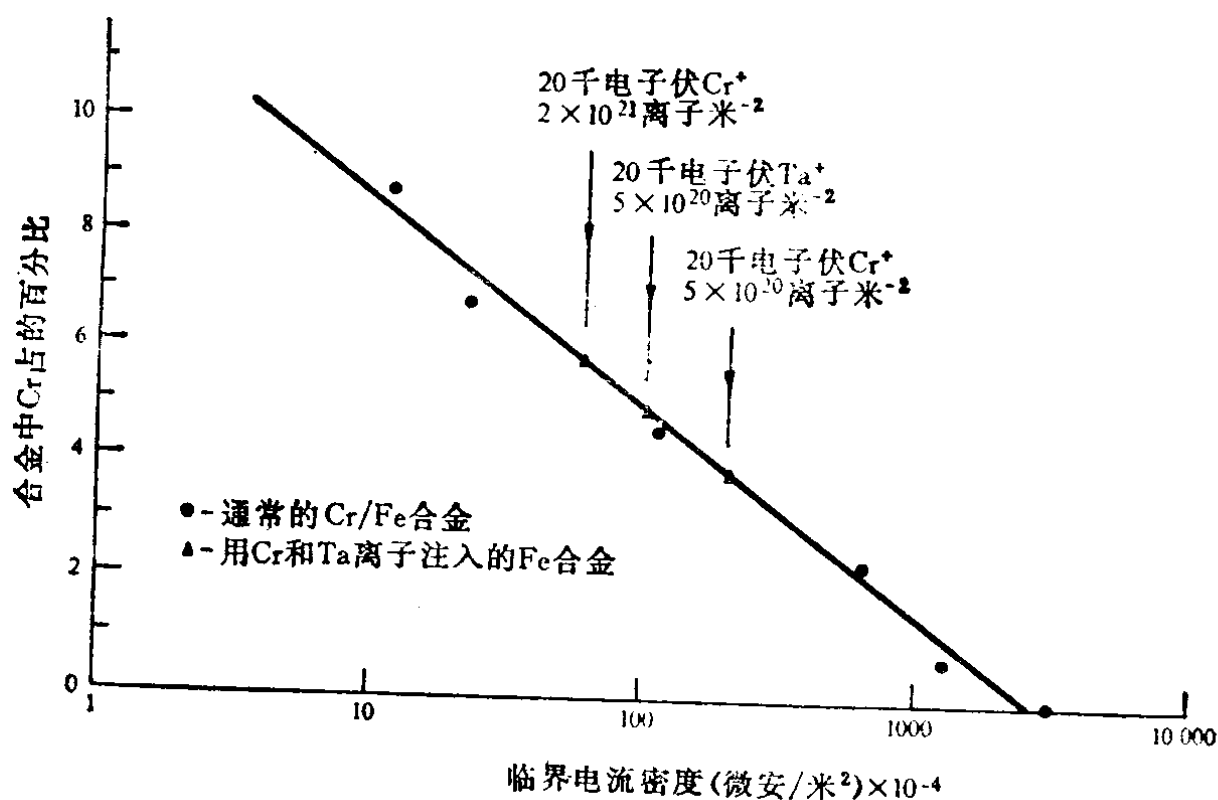


图1.1 用于钝化的临界电流密度  $I_c$  与铬/铁合金中含铬百分比的关系

注入能够改变许多材料表面层的光学性质。比如，改变折射指数应能制造光集成电路的波导<sup>[6]</sup>。尽管目前还不清楚是化学掺杂还是辐照损伤决定光学效应，但折射指数的改变却是已由离子

注入产生了。因为在记忆存储系统中，磁泡有很大的潜力，所以目前正在进行磁性石榴石薄膜内磁泡的研究<sup>[7]</sup>。已经发现，离子注入能够改变这种薄膜及其所包含的磁泡的性质。这些变化的机理尚未弄清楚，它们既可能是由化学掺杂，也可能是形变形式的点阵损伤引起的。

还可以看到许多其它普遍的或可能的应用，包括：(i) 研究超导合金和金属<sup>[8,9]</sup>。(ii) 产生低摩擦和耐磨损金属的表面<sup>[10]</sup>。(iii) 模拟太阳风<sup>[11]</sup>。(iv) 表面层转变成氧化物和氮化物<sup>[12]</sup>。(v) 将催化剂引入表面层<sup>[12]</sup>。离子注入最重要的应用领域曾是模拟核反应堆材料中发生的辐照损伤<sup>[13]</sup>。

## 1.4 晶体结构

在这本书的许多场合中，涉及到具有大能量的离子和单晶之间的相互作用。所以在这里概要地讨论一下点阵几何学。在描述晶体结构中，一个基本的概念是空间点阵。三个非平行平面组（每一组平面是平行和等距离的）将相互交叉给出一组点（每个点在三个平面的交界处），这些点形成一个矩形图象或空间点阵，每个交界面或阵点具有完全相同的近邻，如果原子（或原子团）位于每个点上，那么就得到了一个晶体结构。因此，我们可以给出空间点阵的类型（即给出三组平面间的间距和夹角）和与每一点有关的原子排列，这样就给出了晶体结构。可以证明共有14种基本的布拉伐（Bravais）空间点阵。图 1.2 表示简单三斜晶体和简单正交晶体的两种原胞。在前一种中，平面之间的角度（ $\alpha$ ， $\beta$  和  $\gamma$ ）既不相等也不等于  $90^\circ$  角，而且点阵间的单位长度  $a$ 、 $b$  和  $c$ （沿 OX，OY 和 OZ 轴测量）也不相等。在第二个例子里， $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ，但  $a \neq b \neq c$ ，很容易想象出其它类似于这种的空间点阵，特别是  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  和  $a = b = c$  的简单立方点阵。

在单晶中，常常需要表示特殊的方向或特殊的平面，最方便

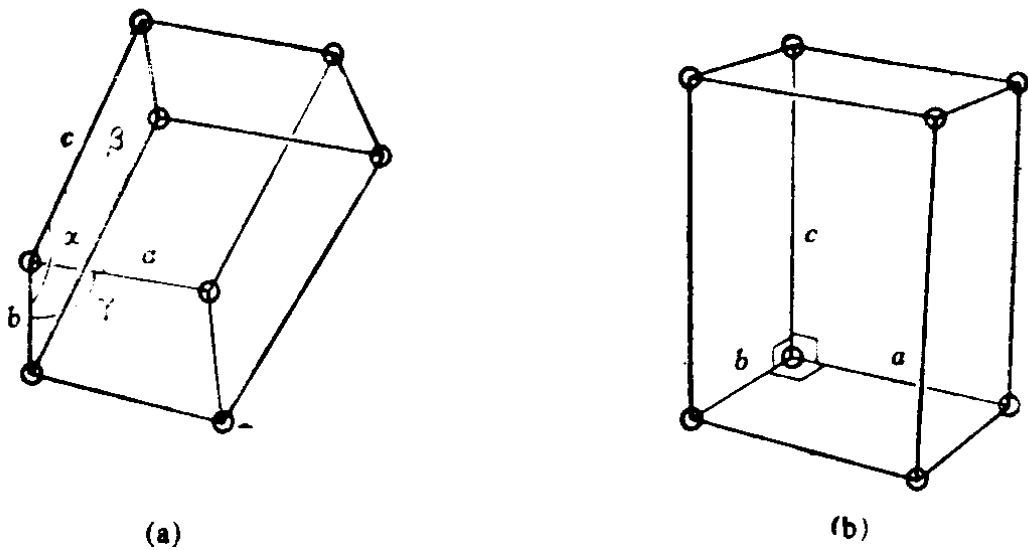


图1.2 简单三斜晶体 (a) 和简单正交晶体 (b) 的空间点阵的原胞

的方法是用密勒指数来表示，图 1.3(a) 为一例。一个平面由下述方法表示，即 (i) 注出该平面在三个晶轴上所截（沿单原胞边缘画）取的距离（分别以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为单位）。(ii) 写出这些距离的倒数，并简约到可能最小的一组整数，括在括弧里。图中的平面与  $OX$ 、 $OY$  和  $OZ$  交割，距离分别是 1、1 和  $\frac{1}{2}$  一个原胞距离，这样，密勒指数便是 (112)。在图 1.3(b) 中给出了其他的例子。在具有高度对称性的立方晶系中，(110) 面与 (101)

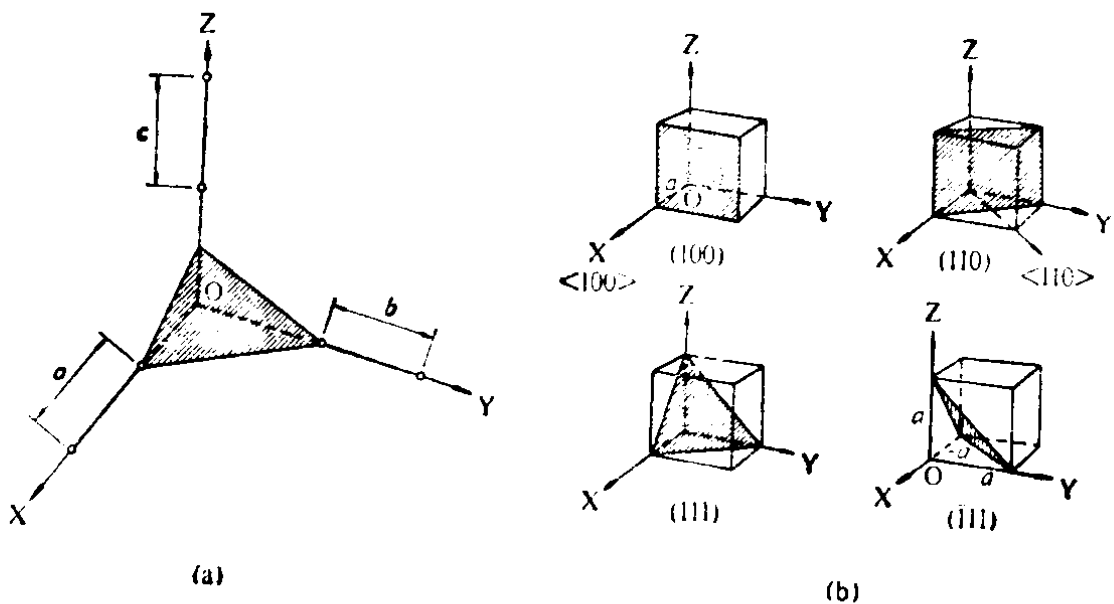


图 1.3 密勒指数系

(a) 在 1.1 和  $1/2$  单位距离处交割三个轴的 (112) 平面；  
(b) 立方系晶体的平面和方向的密勒指数表示法举例。

面,  $(011)$ 、 $(1\bar{1}0)$ 、 $(10\bar{1})$  和  $(01\bar{1})$  面完全相等。数字上的横线表示平面与从选定的原点画出的负轴相交。要表明构成这一形式的一组平面, 可将指数写入大括弧中, 如  $\{110\}$  的形式。

晶体中的方向可用从原点指向那一方向的矢量的坐标来表示。这样,  $OX$  轴用  $[100]$ , 负  $OZ$  轴用  $[00\bar{1}]$  表示。坐标用处在矢量上的点所确定的一组最小的整数来表示。在一些对称的晶系中, 一些方向完全相等。比如在立方晶系中  $[111]$ ,  $[\bar{1}1\bar{1}]$ ,  $[1\bar{1}1]$  和  $[\bar{1}11]$  是相等的, 都用  $\langle 111 \rangle$  来表示。在图 1.3(b) 中示出了各种晶面的方向, 应该注意, 只有在立方晶系中,  $[hkl]$  方向垂直于  $(hkl)$  平面。

一些元素的晶体结构具有很高的对称性, 一半以上的元素不是具有面心立方 (fcc)、体心立方 (bcc) 结构, 就是具有六角密排 (hcp) 结构。这里, 我们将简要地看一看 fcc 和金刚石结构。图 1.4(a) 表示 fcc 原胞, 在这个原胞中, 每个点阵上有一个原子。在原胞面中心处的原子有完全相同的四围, 这可从延伸的结构中看出。对于  $\{111\}$  面, 每单位面积具有最密的原子排列; 而在  $\langle 110 \rangle$  方向, 每单位距离具有最密的原子排列。因此, 它们被称为 (与其他低指数平面和方向一起) 密排平面和密排方向。在第 4 章中考虑沟道效应时, 这个概念很有用。

硅和锗都具有如图 1.4(b) 所示的金刚石型结构, 它是碳的结晶形式之一。可以把这个点阵看作是由两个交错的面心立方点阵组

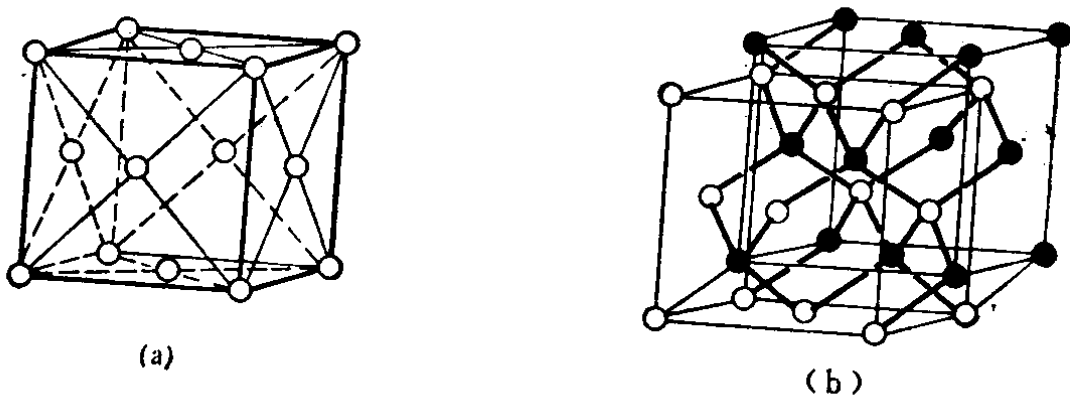


图 1.4

(a) 面心立方原胞; (b) 两个相互交错的面心立方晶体的基本立方结构。

成。每个原子与4个最近邻原子形成共价键，这4个原子排列成正四面体形。

## 1.5 半导体的掺杂

本书讨论离子注入的主要目的是要把掺杂剂引进半导体，所以，这里介绍一些有关它们的电学性质。IV族元素的原子，例如硅和锗，它们的外层电子结构与碳一样，外部的M和N壳层上各有4个电子。如上所述，具有金刚石型结构的硅、锗和碳的结晶，每个原子有4个共价键。当它们结合成结晶形式时，单个原子的电子能级分裂，给出能带结构，如图1.5所示。上面的导带对应于可在晶体中自由运动的电子的能量，下面的价带对应共价键中的电子能量。正好有足够的价电子填满下面的能带。

在导带和价带之间是禁带，碳的禁带宽5.3电子伏，硅的禁带宽1.1电子伏，锗的禁带宽0.67电子伏。在 $0^{\circ}\text{K}$ 时，所有的电子都占据价带中的能态，导带是空的，晶体是绝缘体。

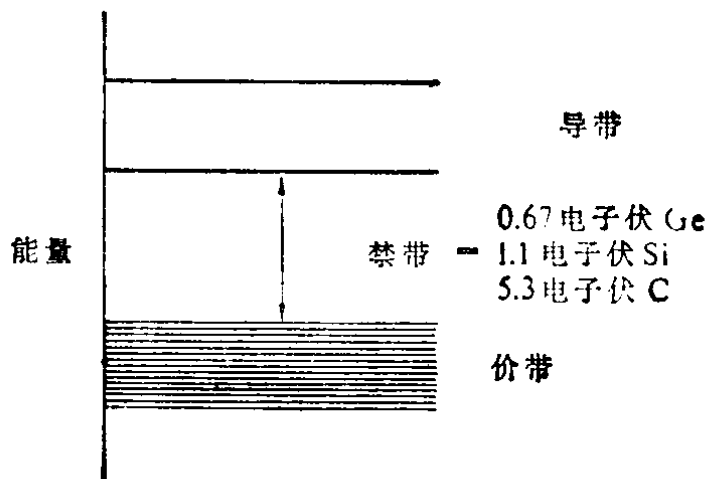


图1.5 锗、硅和碳的能带结构

在较高温度时，硅和锗中的一些电子将获得足够的热能而激发，越过禁带，跳到导带中去。在导带里，它们象导电的电子一样，能自由地从一个状态移动到另一个状态。在常温下，碳的禁带宽度太大，热激发不能使电子跳越禁带，所以在这种结晶形式中，它依旧是绝缘体。当一个电子被激发到导带时，它就在价带中留下一个空位(或空穴)。可以认为空穴带正电荷，它可被从一个邻近位置跳过来的电子占据。因此，导带中的电子和价带中的空穴都能运动，从而使晶体导电。

加入少量的杂质可以改变半导体硅和锗的电学性质。(V)族元素磷是五价的,当把它加到硅中时,它能占据替代的点阵位置。4个价电子将与近邻的硅原子键合,第五个是多余的电子,这个电子停留在磷 $\bullet$ 杂质原子附近,它所占据的能态稍低于导带(图1.6)。没有被激发的多余电子的能级叫作施主能级,它只存在于施主杂质原子附近,即它是一个局部态。在室温下,热能把大部分施主电子从这些局部态中激发到导带,产生n型非本征半导体。如果用三价的掺杂剂(如硼),要与其近邻的硅原子完成四个共价键,每个硼还缺一个价电子。可以通过俘获一个近邻的价电子来完成这个键,但这样就在价带内留下了一个空穴。象硼这样的掺杂剂,称为受主,并产生p型非本征半导体。受主掺杂剂原子近邻的能级刚好在价带之上(图1.6),所以,激发一个价电子占据受主位置只需要小量的热能,并在价带中留下一个空穴。这些空穴提供p型半导体中导电的机构。如果一个半导体含有施主和受主两种杂质,那么,数目多的一种掺杂剂决定是p型还是n型的性质。

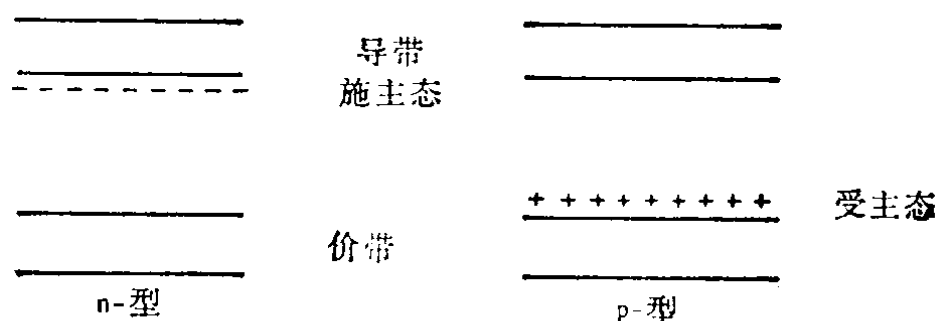


图1.6 n型和p型半导体中局部杂质能态

硅和锗中掺杂用的最重要的元素是V族施主(磷、砷和锑)和III族受主(硼、铝、镓和铟)。在已知的基质衬底中,这些掺杂剂的施主和受主,它们的局部态能量略有不同。其它的元素也能用作掺杂剂,例如锌和铜,它们分别能接受两个和三个电子。因

● 原文误写为“砷”,应改为“磷”。——译者

此，锌产生两个、铜产生三个局部态。而且，因为它们的核电荷不同，所以，能级处在价带和导带之间的禁带中很深的位置（图1.7）。这些深能级作为陷阱和复合中心，它们能使少数载流子的寿命显著地减小。

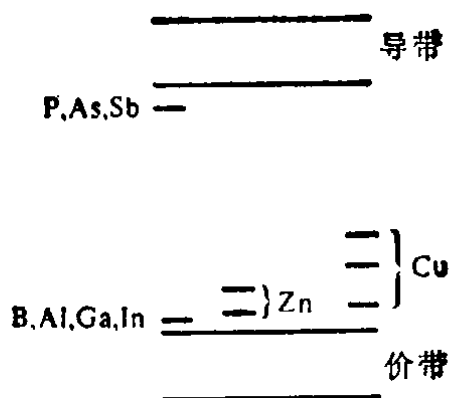


图1.7 用各种杂质掺入铜产生的局部能级

一般是用热扩散方法引入掺杂剂，但离子注入提供了另一个方法。然而，用注入法掺杂时，可能会严重地损伤晶体，因此，为了重新排列好点阵和使掺杂剂处于电活动的位置，需要进行热退火。离子注入产生的辐照损伤常常使电导率改变，这样便掩盖了用掺杂离子得到的效果。退火常常可以消除大多数缺陷能态和陷阱中心（尽管有些地方还保持着缺陷和陷阱）。

## 第2章 原子间的碰撞

### 2.1 引言

离子注入的过程以高能离子可能较深地注入固体为依据。为达到这样的深穿透，离子必须与固体点阵的原子进行单一的或集体的相互作用和碰撞。在这些碰撞过程中，运动的离子和起初是静止的点阵原子交换能量，在离子损失能量的同时，原子获得了能量。能量损耗使离子变慢，最终停止在点阵内；原子获得能量使点阵产生缺陷或无序。除能量损耗外，在每一单独的或多次的碰撞中，注入的离子将受到偏转，这一连串的偏转将决定它在固体中的具体轨道。同样，获得了足够能量而从正常位置移动的点阵原子，它们的轨道由它们的能量传输和偏移的顺序所决定。因此，点阵无序的总图象将和许多单个碰撞有关。由于离子和原子碰撞顺序地发生，并且是可分开的，因此，要估计离子的穿透和点阵无序，其中心问题是了解运动离子和初始是静止的原子之间碰撞的动力学。这就是现在我们要研究的课题。

在经典的原子图象中，中心带正电的原子核（核电荷 $+Ze$ ，其中 $Z$ 是原子的原子序数， $e$ 是电子电荷）被轨道电子（数目等于 $Z$ ）围绕着。电离使一个或几个电子脱离其轨道，而使原子带上了正电，因而，它们既能在静电场中加速，也能在静电场和磁场存在的情况下偏转。在运动的离子（或原子）和静止的原子之间发生碰撞时，会出现这样的情况：即在核和电子之间存在着吸引力，并且，原子核之间和电子之间存在排斥力。原子间的合力是各质点之间各种作用力的总和，而合力的空间积分决定了运动的和静止的原子之间相互作用的势。因此，用经典力学的方法，可把两个碰撞原子间的相互作用描述为两个质点（ $M_1$ 是入射的或



运动的离子或原子的质量， $M_2$ 是被碰撞的粒子的质量）之间的碰撞，并建立和解出在向心力约束下的经典动力学运动方程。在这样的系统中，运动离子的轨道由向心力规律的空间变化所决定，但是，因为这个力作用在所有粒子间隔内，所以被碰撞的（或靶的）原子也被引起运动，其轨道也是由向心力规律所决定。在这样的保守系统中，若没有外界因素，总的能量是守恒的，只有运动的能量和空间的势能之间的转换，这样的碰撞过程称为弹性碰撞，并且在碰撞结束时（粒子分开无限远时），被碰撞的粒子获得了碰撞粒子失去的所有能量。因为入射粒子的轨道被原子间的力改变，所以人们说发生了散射作用<sup>[1]</sup>。

这种经典的描述，忽略了相互作用粒子的具体电子结构，并假设在建立合力和势函数时取平均和简化为点原子。实际上，在碰撞期间，每个电子都将分别受到扰动，并将激发每个参与碰撞的原子中的电子；有时会发生电离。随后，受激电子的衰变将引起光子发射，而在某些情况下，会进一步引起电子发射。在这些激发过程中，被吸收的能量一般不再恢复成系统的动能和粒子间的势能，而将产生非弹性碰撞，在碰撞中，原子的内能改变。由于激发过程从碰撞中分出去了能量，在某种程度上说，他们的轨道和动能也有相应的改变；这就是说，弹性碰撞（相互作用的散射部分）和非弹性（相互作用的能量损耗部分）碰撞之间必须有一定的相互关系。然而，一般来说，相关的程度不大，为了方便，假定非弹性过程引起系统总的能量损失，而没有过分影响散射过程。因此，可分别估计弹性和非弹性的作用，在一级近似中，可看作彼此无关。在对原子碰撞的分析中，假定原子碰撞是可以分开的，并分别讨论弹性和非弹性过程。

最后，由于要讨论原子间的相互作用，那末，比较正确的模型是采用两个相互作用的波动力学系统模型，实际上，在离子注入中，大多数原子碰撞都可用上述经典力学的简化来阐述。以后将分析这个论点的合理性。