

[美] J. W. 迈耶 L. 艾利克逊 J. A. 戴维斯 著

# 半导体硅锗中的 离子注入

科学出版社

73.722  
571

# 半导体硅锗中的离子注入

(美) J. W. 迈耶 L. 艾利克逊 J. A. 戴维斯 著

余怀之 朱祖芳 等 译

1107794



科

学

图书馆藏

1979

## 内 容 简 介

本书介绍在半导体(重点是硅和锗)中离子注入的现况。系统叙述离子注入掺杂的基本特点,注入离子的射程分布,注入后的晶格畸变和辐照损伤,注入原子的晶格定位以及离子注入技术在半导体器件生产上的应用。本书对于从事半导体上离子注入研究和器件生产人员是一本较完备的参考书,对于从事金属辐照损伤、离子束分析等工作的同志亦有参考价值,也可作为高等院校物理专业、半导体专业、金属物理专业等有关专业的教学参考书。

James W. Mayer, Lennart Eriksson and John A. Davies  
ION IMPLANTATION IN SEMICONDUCTORS  
SILICON AND GERMANIUM  
Academic Press, New York and London, 1970

### 半导体硅锗中的离子注入

[美] J. W. 迈耶 L. 艾利克逊 J. A. 戴维斯 著  
余怀之 朱祖芳 等译

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

1979年11月第一版 开本:787×1092 1/32  
1979年11月第一次印刷 印张:9 3/8  
印数:0001—13,120 字数:211,000

统一书号:15031·244

本社书号:1482·15—7

定价:0.97元

## 译 者 的 话

离子束可用来在固体表面引入外来元素。离子注入掺杂就是利用一定能量的离子,直接射到固体靶上,产生一定厚度的掺杂表面层,从而改变表面的物理特性和化学特性。由于离子注入的掺杂层可以精确控制注入原子的类型、浓度、浓度分布和深度,并且不受平衡溶解度的支配,因此显示出其它技术不具备的突出优点,而在生产优质半导体器件上开辟了全新的领域。

自1952年Ohl首次利用质子、氦离子、氮离子和氢离子轰击硅点接触二极管,从而改变了二极管特性,到1960年第一个离子注入的 $p-n$ 结的出现,经历了一个不甚迅速的发展过程。近十余年来,离子注入掺杂技术已成为优质半导体器件不可缺少的工序,注入工艺也日臻完善,并从注入元素半导体硅和锗,发展到注入化合物半导体(如砷化镓等)引起了国内外的重视。近年来,国外正探索在半导体以外的其它材料上进行离子注入表面合金化的研究,以改善金属和合金表面的物理、化学性能(如超导性、耐蚀性、耐磨性),也可用来引入表面催化剂,展示出新的前景。

本书全面介绍在半导体硅和锗中离子注入的现况,对离子注入的基本特点、注入原子的射程和分布、注入后的晶格畸变和辐照损伤、注入原子的晶格定位以及在半导体器件方面的应用,均作了系统叙述。还适当地精简了繁杂的数学推导和理论计算。

本书对于从事半导体离子注入的研究人员和生产人员是

一本较完备的参考书,对于从事金属辐照损伤、离子束分析等专业的同志也有参考价值,同时也可作为高等院校半导体物理、固体物理、金属物理等有关专业的教学参考书。

参加本书译校工作的有余怀之、朱祖芳、马本堃、赵渭江、陈鉴璞、董洪良、明成、周瑞英、孙煜、朱悟新、吴绪礼同志。由于水平所限,译文中错误之处在所难免,望广大读者指正。

# 目 录

第一章 离子注入的一般特点	1
1.1 射程分布	3
1.2 晶格畸变	5
1.3 晶格定位和电学性质	6
1.4 器件应用	9
第二章 注入原子的射程和射程分布	10
2.1 引言	10
2.2 射程分布的实验方法	15
2.2.1 放射性示踪法	15
2.2.2 散射法	16
2.2.3 霍耳效应和电导率测量	17
2.2.4 结-染色法	17
2.2.5 电容-电压法	19
2.3 在无定形靶中的射程分布	19
2.3.1 实验工作	19
2.3.2 理论概述	22
2.3.3 修正因子	28
2.3.4 $R_p$ 值——实验和理论的比较	34
2.3.5 射程偏离	35
2.3.6 注入原子的平均浓度	39
2.3.7 在有氧化层衬底中的射程	40
2.3.8 可变能量注入	40
2.3.9 质子和氦离子射程	41
2.4 在单晶中的射程分布	42

2.4.1	一般原理	42
2.4.2	沟道束的射程分布	46
2.4.3	最大射程 $R_{\max}$	53
2.4.4	$R_{\max}$ 中的 $Z_1$ 振荡	54
2.4.5	硅中的射程分布	57
2.5	增强型扩散	63
2.5.1	辐照增强型扩散	64
2.5.2	间隙扩散	65
2.5.3	在后轰击退火过程中的增强型扩散	69
第三章 晶格畸变和辐照损伤		71
3.1	引言	71
3.2	理论考虑	72
3.2.1	位移过程的有效能量	72
3.2.2	位移原子的平均数	77
3.2.3	位移原子的空间分布	79
3.3	实验技术	83
3.3.1	光学效应	83
3.3.2	电子衍射和电子显微术研究	85
3.3.3	X 射线透射技术	92
3.3.4	离子相互作用和电子发射	94
3.3.5	沟道效应测量	99
3.4	结果和讨论	105
3.4.1	室温下产生的晶格畸变	106
3.4.2	晶格畸变的深度分布	113
3.4.3	衬底温度对晶格畸变的影响	117
3.4.4	晶格畸变的退火行为	122
3.5	离子注入与快中子辐照的比较	128
3.5.1	晶格畸变	129
3.5.2	电学和光学特性	133

第四章 注入原子的晶格定位 .....	136
4.1 引言 .....	136
4.2 沟道效应技术 .....	137
4.2.1 一般原理 .....	137
4.2.2 单晶体的对准 .....	147
4.2.3 反向散射测量 .....	147
4.2.4 核反应技术 .....	158
4.3 晶格定位实验概述 .....	161
4.3.1 观测总论 .....	161
4.3.2 观测结果梗概 .....	165
4.3.3 注入原子行为的简单图象 .....	169
4.4 晶格定位的详细结果 .....	171
4.4.1 第V族元素注入硅中 .....	171
4.4.2 第III族元素注入硅中 .....	175
4.4.3 其他族离子的注入 .....	180
4.4.4 向锗中注入 .....	181
4.4.5 第III族和第V族混合注入硅和锗中 .....	183
4.4.6 注入样品的后轰击 .....	185
4.5 影响晶格定位因素的讨论 .....	191
4.5.1 一般模型 .....	191
4.5.2 注入反应 .....	193
4.5.3 荷电状态效应 .....	195
第五章 硅的霍尔效应和薄层电阻率的测量(与 O. J. Marsh 合作) .....	197
5.1 引言 .....	197
5.2 霍尔效应测量的解释 .....	203
5.3 载流子迁移率与掺杂剂电离能 .....	210
5.4 退火特性 .....	215



5.4.1	一般考虑	215
5.4.2	退火特性的温度区间	218
5.4.3	间隙成分	226
5.4.4	注入温度的影响	231
5.4.5	沟道的影响	234
5.5	扩散效应	234
5.6	对电学特性的限制	237
5.7	不常用掺杂剂元素的分析	240
第六章 器件研究和应用 (R. W. Bower)		244
6.1	引言	244
6.2	离子注入产生的掺杂层的性质	245
6.3	离子注入在平面结构上的应用	250
6.3.1	平面工艺过程的讨论	250
6.3.2	离子注入掺杂在平面工艺过程上的应用	251
6.3.3	栅-掩模离子注入的 MOSFET	254
6.3.4	栅-掩模离子注入 MOS 技术在集成电路和大规 模阵列上的应用	255
6.3.5	离子注入技术在 MOSFET 上的进一步应用	261
6.3.6	双极晶体管	262
6.3.7	离子注入掺杂在平面集成电路工艺上的应用	263
6.4	离子注入在非平面工艺过程器件上的应用	265
6.4.1	点接触二极管	265
6.4.2	超突变可控电容-电压二极管	265
6.4.3	$p-n$ 结 IMPATT 二极管(碰撞雪崩渡越时间二极 管)	266
6.4.4	半导体核粒子探测器	268
6.5	离子注入器件应用的分析	269
6.6	结论	270
附录 低 Z 兆电子伏的粒子在金刚石型晶格中的沟道特 性		271

A.1 概论.....	271
A.2 实验.....	272
A.3 理论.....	274
A.4 实验和理论的比较.....	276
参考文献 .....	280
词汇索引 .....	290

## 第一章 离子注入的一般特点

离子注入就是用具有千电子伏到兆电子伏能量范围的离子轰击固体,从而把各种原子注入到固体衬底的表面层中.因为固体的各种物理性质对于外来痕量原子是敏感的,所以固体的特性是很广泛的.外来原子的存在使力学性质、电学性质、光学性质、磁学性质乃至超导性质都要受到影响,其实,常因外来原子的存在而支配上述各种性质.采用离子注入技术有可能引入各种类型的原子,这样就有可能得到特别值得重视的杂质浓度和杂质分布;在许多情况下,这些分布用别的什么方法是不能得到的.离子注入的当前工作,已集中在离子注入半导体中掺杂剂行为的研究,并已为用这种方法可能制造新型器件结构所鼓舞.所以,我们集中注意这样一些影响着硅和锗注入层电学特性的因素,这些因素是掺杂剂的射程分布,晶格畸变以及晶格中在替代和间隙位置上掺杂剂原子的定位.

电子线路中半导体的应用,过去是建立在控制掺杂元素向半导体单晶(通常是硅)热扩散基础上的.这些掺杂剂占据了硅晶格的位置,并决定了器件的电学性质.它们的浓度决定于处理温度(900—1100°C)下的平衡溶解度,深度分布决定于扩散常数和处理时间.

离子注入提供了把掺杂剂原子引入到晶格中去的另一个方法.在这个方法中,掺杂剂离子束一般通过10—100千伏电压加速,再打到半导体表面上.在图1.1所示的离子注入系统中,图解说明了注入技术所要求的基本部件.用不同类

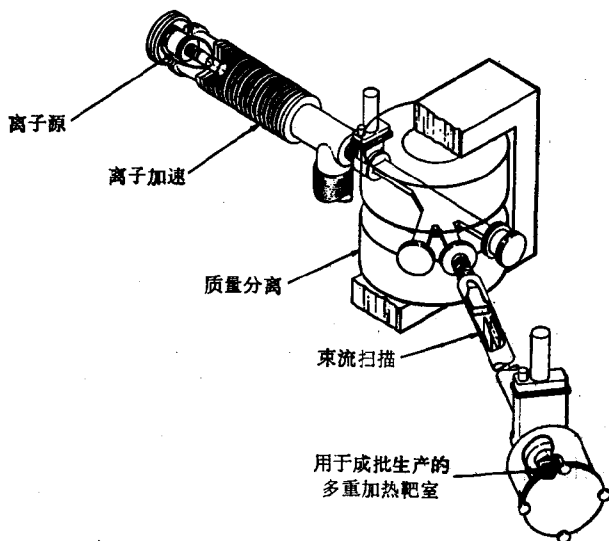


图 1.1 离子注入系统示意图。质量分离磁铁用来选择需要的离子，束流扫描设备保证了大面积均匀注入

型的有效的离子源，就能产生注入所要求的足够强度的多种多样的离子束。  $10^{14}$ — $10^{15}$  离子/厘米<sup>2</sup>(比“单层”小)是有代表性的离子剂量。值得注意的是，质量分离磁铁能用来除去几乎所有不需要的杂质，而这些杂质常常在所引出的束流中是占主要的。除此之外，基本的设备是很简单的。

和扩散过程比较起来，离子注入应用到半导体工艺上的一个很重要的特点是，注入离子的数目由外界系统来控制，而不受衬底物理性质的控制。例如，在通常扩散可以完全忽略的温度下能进行离子注入掺杂。此外，掺杂剂浓度不受通常溶解度的限制，于是各种掺杂剂元素都可以用。因此，离子注入一个潜在的应用是可能研究某些杂质的性质，这种杂质用平常的方法是不能掺入到半导体中去的。

使得离子注入应用成功的一些主要因素是，注入原子的

射程分布,由注入产生晶格畸变的数量和性质,在晶体的单位晶胞中注入原子的位置和由于注入及其后的退火处理而得到的(最终)电学性质. 为了对整个问题得到一个全貌,我们在本章中将简要地考虑所有这些因素,在以后的章节中再详细论述每一种因素.

## 1.1 射程分布

显然,在注入过程的任何描述中,最重要的考虑之一就是注入离子的深度(射程)分布. 近几年来,大量的实验和理论工作是致力于弄清决定射程分布的能量损失过程. 对于上述大多数因素,现在都能精确地预言. 例如图 1.2 所示. 在无定形衬底中,典型的射程分布是近似高斯形式. 所以,能用平均射程和平均射程偏离来表示其特性. 像在第二章中要讨论

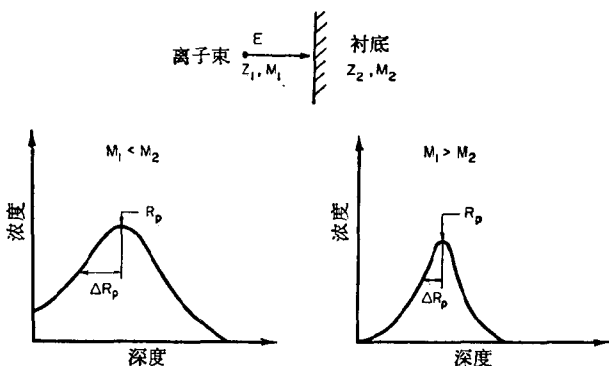


图 1.2 在注入原子质量小于或大于衬底原子质量的情况, 无定形靶中注入原子的深度分布. 对于一级近似, 平均深度  $R_p$  依赖于离子质量  $M_1$  和入射能量  $E$ , 而分布的相对宽度  $\Delta R_p/R_p$  主要依赖于离子质量  $M_1$  和衬底原子质量  $M_2$  的比值

的,这两个量是以复杂的但可预期的形式与许多变量有关.从图 1.2 明显看出,离子注入的注入分布和单调降低的典型扩散过程的剖面分布形成强烈的对照.而且,在注入过程中用连续改变能量的方法,(在原则上)几乎能得到任意形式的掺杂剂剖面.对于 100 千电子伏离子平均射程的典型值为 $\sim 0.1$ 微米,而扩散掺杂通常能得到 1—10 微米的平均深度.

许多实验已表明,在单晶衬底中射程分布强烈地依赖于晶体相对于注入方向的取向,也就是和“沟道效应”有关.如果离子射入几乎是平行主轴或晶面,那么一系列相互碰撞能使离子顺利地通过晶格,于是能量损失率降低了,同时增加了它的穿透深度.这就导致在图 1.3 所示的典型剖面.在大多数离子注入中,只有一小部分注入离子在它们的整个路径上

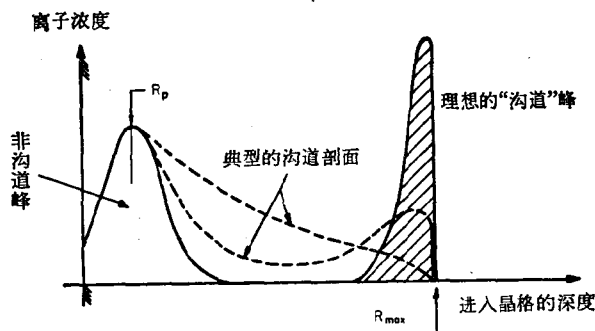


图 1.3 单晶中注入原子的深度分布,束流是和主轴对准的.阴影部分表示完全“沟道的”离子,穿透接近于最大的沟道射程  $R_{max}$ .原子的分布对于许多因素(如束的方向、晶格振动和表面畸变)都很灵敏.虚线表示在一般的注入条件下,在硅和锗中所能得到的分布形状

维持沟道,而这样的分布形状是与许多很难控制的因素关系极大.

## 1.2 晶格畸变

在利用离子注入技术时，由于入射离子所产生的晶格畸变(第三章)和辐照损伤效应引起了其他一些问题。当入射离子逐渐减缓以至停止时，要和晶格原子发生多次猛烈的碰撞，并使这些原子从它们的晶格位置上产生位移，这些位移的原子又能依次使其他原子位移，最后的净结果是在离子路径附近产生了高畸变区域。图 1.4 表示了对于 10—100 千电子伏重原子注入的情况。在足够高的剂量下，这些单个畸变的区域能够重迭，于是形成非晶层或无定形层。

孤立的畸变区域和无定形层有很不相同的退火行为。在

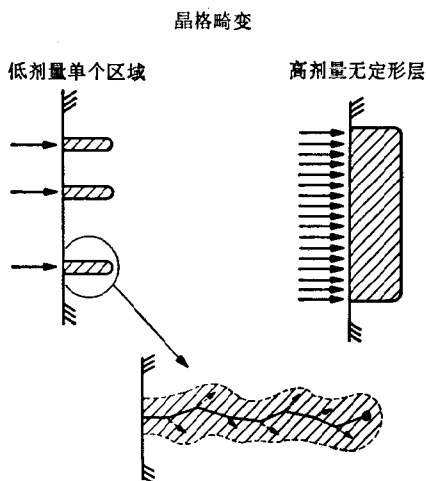


图 1.4 室温下能量为 10—100 千电子伏重离子注入产生畸变的示意图。在低剂量下，在离子径迹周围的高畸变区是相互分开的，畸变区大小主要取决于离子的终止点和位移的晶格原子的射程(虚箭头表示)。在高剂量下，畸变区域能重迭，形成无定形层

锗和硅的情况下，孤立的畸变区域分别在约 200°C 和 300°C 这样的中等温度下进行退火。无定形层也具有退火特性，但要在相当高的温度下进行，也就是对硅而言约 600°C，对锗而言约 400°C。需要注意的是，即使这两种型式畸变的退火温度比掺杂剂元素发生扩散的温度低得多，但仍有缺陷存在。退火温度在 600°C 以上，硅中发生位错生长时，这些缺陷是最明显的。

如果对硅在约 300°C 以上而对锗在约 200°C 以上进行离子注入，孤立的畸变区域就在轰击过程中连续退火，于是就能以很高的剂量注入而不会产生无定形层。目前，已经就硼那样的轻离子对在硅和锗中产生的晶格畸变作了研究。这里的一个重要特点就是，在注入的过程中，甚至在室温下就会发生显著的退火，这和注入重元素的行为有很大的不同。

### 1.3 晶格定位和电学性质

大多数离子注入的总课题在于产生这样一个区域，其电学性质只由位于半导体晶格的确定位置上的掺杂原子所决定。在早先关于注入层的研究中，注入原子占据位置的形式一点也不明确，事实上也不清楚掺杂剂的性质。然而，现在已可能用沟道效应的测量(第四章)来确定注入原子精确的晶格位置，以及用霍尔效应测量(第五章)来确定它们的电学性质。在某些情况下，发现了晶格畸变的退火与替代式晶格上原子增加的相互关系，以及与注入层中载流子数的增加的相互关系。把第 V 族元素在室温注入到硅中，最清楚地说明了这一点。如图 1.5(a) 所示，在替代式晶格上的镱原子数和载流子数看来是非常一致的。在 600°C 时显著增加反映了无定形层的外延恢复有序。较高衬底温度 ( $>300^{\circ}\text{C}$ ) 下注入时，在替



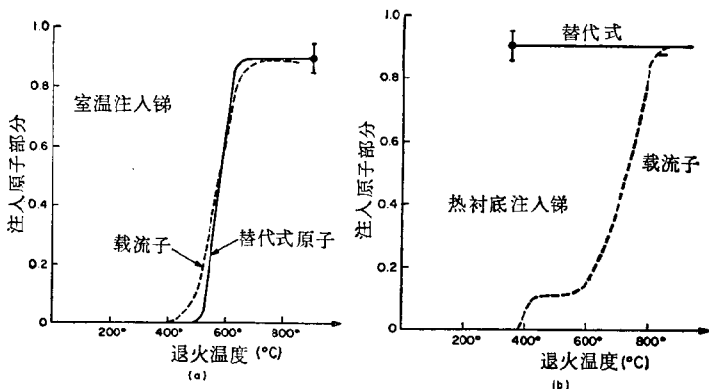


图 1.5 注入原子浓度不超过最大溶解度的注入条件下，晶格位置上的注入铈离子数(沟道效应测量)和载流子数(霍尔效应测量)的退火行为  
 (a) 室温注入，形成无定形层。曲线陡峭上升反映了无定形层的退火；  
 (b) 衬底温度为 350°C 时的注入。在注入以后约 90% 的原子是在替代式晶格位置上。载流子数接近注入原子数之前，约需 800°C 的退火温度

代式和电学性质之间没有出现这样的关系。如图 1.5(b) 所示，在注入过程中，注入的铈原子到达了替代式晶格，并在其后的退火过程中仍然维持其晶格位置，所以一直到接近 800°C 还没有观察到完全的电活化。在注入过程不形成无定形层的几乎所有情况下，发现都需要高温退火。这是归结于存在电活性缺陷中心，能导致补偿注入原子的掺杂行为。现在，这些缺陷中心的性质还不知道。事实上，800°C 的退火温度已经远高于通常用在研究辐照损伤的温度。

第 III 族元素在硅和锗的晶格定位中呈现更复杂的情况。常常发现既有间隙也有替代式成份。这种复杂行为的一个例子在 450°C 的硅中注入铈的图 1.6 中可以看到。在“注入态”条件下(即在退火之前)，约 30% 的注入原子是在规则的间隙