

# 半导体器件基础

[美] 爱德华·S·杨 著

卢 纪 译

叶良修 校

人民教育出版社

# 半导体器件基础

[美] 爱德华·S·杨 著

卢 纪 译

叶良修 校



人民教育出版社

4110728

## 内 容 提 要

本书内容共分四部分：半导体物理的基本原理及器件制造工艺；二端器件；三端器件；集成器件。并配有习题和习题答案。

本书力图把各种商品化的器件的结构和它的基本工作原理联系起来，在对内容表述的逻辑顺序上作了充分的考虑。由浅入深易于理解和掌握。

本书是作者在给美国哥伦比亚大学有关专业的大学和低年级研究生讲课的过程中写成的，可供我国半导体专业及设计和使用集成电路及系统的师生和科技人员参考。

DHS/21

### 半导体器件基础

[美] 爱德华·S·杨 著

卢 纪 译

叶良修 校

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

沈阳市第一印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张13.125 字数318,000

1981年7月第1版 1983年3月第1次印刷

印数 00,001—12,800

书号 13012·0638 定价1.70元

## 中文版序言

自从巴尔丁发明第一只晶体管到今天的三十多年间，对半导体的研究与应用已经有了巨大的进步，其发展真可以说是一日千里。现在，半导体器件已不仅渗透到人们的日常生活中，更重要的是在电子计算机、通讯工程、空间技术、机器人等方面也均离不开它。半导体对人类的科学进程已经产生了十分深远的影响，因此，目前美、日、西欧等各国仍在积极从事于这一技术领域的开发与研究，积累的文献与书籍已不可胜数，本书是应美国大学电机系半导体器件的基础教材之需而作，叙述力求清晰，扼要，全书除对半导体器件的基本原理与工艺作一简述之外，尚力图概括近年来半导体器件的最新进展，俾使读者能对新器件有一粗浅的瞭解。此书发行后，获悉受到国内半导体同行的青睐，承蒙卢纪，叶良修二位先生惠予翻译成中文出版，对此作者表示十分感激，并盼本书能对国内电子工业起一点微薄的贡献，书中内容难免有疏漏或错误之处，尚祈海内外学者指正幸。

杨雄哲序于纽约哥伦比亚大学

1981.11.

# 序

近代电子学是以十分完备的半导体工艺为基础建立起来的,这种工艺导致硅集成电路芯片的制造。由于在集成电路中器件、网路以及系统之间有相互影响,对于一个电气工程技术人员来说,了解这种器件的基本工作原理就显得相当重要。本书的目的是要向正在就读的和刚毕业的电气工程专业的大学毕业生,以及需要得到最新集成电路知识的从事实际工作的工程技术人员介绍半导体器件的物理原理和它们的实际运用。它是安排在大学二三年级基础电子学课之后的一门课程。本书所选的材料主要是想满足那些设计和使用集成电路及系统的学生和工程技术人员的需要。阅读本书的读者需要学完微分方程方面的课程,但无需量子力学的知识。

本书由四部分组成。第一部分,从第一章到第三章介绍半导体物理的基本原理与器件制造工艺。第一章叙述处于平衡态的半导体,并引进能带图、载流子浓度以及迁移率等概念。在第二章中讨论了非平衡载流子的复合与输运。在第三章中讲解基本的制造工艺,即:杂质扩散、氧化、外延、光刻以及离子注入等。

本书的第二部分专门叙述二端器件。第四章阐述了  $p-n$  结的静态和动态特性,其中包括电流-电压、电容-电压以及雪崩击穿特性。在第五章中叙述了金属-半导体结和异质结,侧重于叙述肖脱基势垒二极管。在第六章中描述了太阳电池和发光二极管(LED)的工作原理与特性。

本书的第三部分,从第七章中结型场效应晶体管开始讨论三端器件。在第八章中叙述金属-氧化物-半导体结构和 MOS 场效应晶体管(MOSFET),其中结合工艺叙述了不同类型的 MOS 场

效应晶体管。双极结型晶体管 (BJT) 和  $p-n-p-n$  器件包含在第九章中。但对于双极结型晶体管仅限于叙述小功率器件的特性。

本书的最后部分叙述集成器件。在第十章中包括集成晶体管、侧向晶体管、集成注入逻辑 (I<sup>2</sup>L) 以及 MOS 倒相等。此外，还叙述 D-MOS、V-MOS 以及 FAMOS 等。在最后一章中叙述电荷耦合 (Charge-Coupled) 器件与斗链 (Bucket-Brigade) 器件。

本书力图把各种商品器件的结构和它们的基本工作原理联系起来。阶跃恢复二极管和变容二极管在  $p-n$  结一章加以讨论，并把肖脱基箝位晶体管包括在金属-半导体结的理论叙述之中。由于器件的结构往往对器件的特性起决定性的影响，所以，一般是用实际的器件结构或数值示例来说明器件的原理。当某一问题不宜于在正文中叙述时，就采取措施在习题中给出有关的基本概念。例如，光电导体和热敏电阻就是以这种方式介绍的。为此，应把习题视为本书的一个不可分割的组成部分。备有习题解答。采用本书的教师可从出版者那里得到一本。

本书对内容表达的逻辑顺序作了充分的考虑。章节编排的原则是从叙述基本原理和简单器件开始，进而叙述较为复杂和较不易了解的各种结构。为此，在第九章中叙述双极晶体管，而不是把它们放在第四章  $p-n$  结的后边。这种叙述顺序的优点是使 MOS 和双极晶体管处于同等重要的地位。对于喜欢采用其他顺序的人来说，也可对某些章节重新编排，而不失其连贯性。但我们建议，前四章作为一个单元来讲授。然后可以把第九章放在第四章后边。此外，第六章可以作为最后一章，第十和第十一两章可以对调。附录 A 为没有学过电子学的学生提供了近代物理与半导体理论之间的联系。虽然本书是为一个学期的课程 (one-semester course) 编写的，但它的内容足够两个学期 (two quarters) 讲授之用\*，特别是如果把附录 A 也包括进去的话就更是如此。

本书是作者在哥伦比亚大学七年期间向高年级学生、第一年

的研究生、偶尔也向低年级的学生授课过程中写成的。书中内容曾在课堂上试教过，并得到了哥伦比亚和其他地方一些同事们提出的建议和批评，获益非浅。

爱德华·S·杨

# 目 录

序 .....	i
<b>第一章 半导体的物理基础</b> .....	1
1-1 晶体结构 .....	1
1-2 固体的价键模型 .....	4
1-3 有效质量和能带的概念 .....	5
1-4 半导体中的自由载流子浓度 .....	10
1-5 本征和非本征半导体 .....	16
1-6 电子和空穴的散射与漂移 .....	21
1-7 半导体中的传导电流和扩散电流 .....	26
<b>第二章 半导体的非平衡特性</b> .....	34
2-1 载流子的产生、复合和注入 .....	34
2-2 载流子的注入水平 .....	35
2-3 复合机制 .....	36
2-4 复合瞬态响应 .....	42
2-5 表面复合 .....	43
2-6 静电场和势 .....	44
2-7 非均匀半导体和自建电场 .....	46
2-8 准费米能级 .....	47
2-9 半导体中的基本控制方程 .....	49
<b>第三章 器件制造工艺</b> .....	56
3-1 衬底制备和结的形成 .....	56
3-2 平面工艺 .....	59
3-3 固态杂质扩散 .....	60
3-4 外延生长 .....	67
3-5 热氧化 .....	71



3-6	氧化硅和氮化硅掩蔽 .....	76
3-7	离子注入 .....	78
3-8	掺杂层的表征 .....	83
<b>第四章</b>	<b><math>p-n</math> 结</b> .....	<b>90</b>
4-1	平衡突变结 .....	91
4-2	耗尽近似 .....	94
4-3	加偏压的 $p-n$ 结 .....	97
4-4	少数载流子的注入与输运 .....	100
4-5	直流电流-电压特性 .....	102
4-6	空间电荷区的复合电流和产生电流 .....	107
4-7	隧道电流 .....	109
4-8	$V-I$ 特性的温度依赖性 .....	112
4-9	小讯号交流分析 .....	113
4-10	过渡电容、求杂质分布和变容二极管 .....	116
4-11	电荷贮存和反向瞬变: 阶跃恢复二极管 .....	120
4-12	$p-n$ 结中的雪崩击穿 .....	125
<b>第五章</b>	<b>金属-半导体结</b> .....	<b>135</b>
5-1	肖脱基势垒的能带图 .....	135
5-2	电流-电压特性 .....	140
5-3	镜像力降低势垒高度 .....	145
5-4	金属-绝缘体-半导体肖脱基二极管 .....	146
5-5	肖脱基势垒二极管和 $p-n$ 结二极管之间的比较 .....	147
5-6	欧姆接触: 非整流的 $M-S$ 结 .....	149
5-7	肖脱基势垒二极管的结构 .....	151
5-8	肖脱基势垒二极管的应用 .....	151
5-9	异质结 .....	153
<b>第六章</b>	<b>太阳电池和发光二极管</b> .....	<b>160</b>
6-1	半导体中的光吸收 .....	160
6-2	光生伏特效应和太阳电池效率 .....	162
6-3	光产生电流和收集效率 .....	166

6-4	材料选择和设计考虑 .....	169
6-5	肖脱基势垒和 MIS 太阳电池 .....	174
6-6	$p-n$ 结的光产生: 发光二极管(LED) .....	176
6-7	少数载流子注入和注入效率 .....	177
6-8	内量子效率 .....	178
6-9	外量子效率 .....	180
6-10	肉眼的灵敏度和亮度 .....	183
6-11	材料考虑 .....	185
<b>第七章</b>	<b>结型场效应晶体管 .....</b>	<b>196</b>
7-1	引言 .....	196
7-2	JFET 的理论 .....	198
7-3	静态特性 .....	201
7-4	小讯号参数和等效电路 .....	203
7-5	截止频率 .....	206
7-6	肖脱基势垒场效应晶体管 .....	206
7-7	夹断后 JFET 的性能 .....	207
<b>第八章</b>	<b>金属-氧化物-半导体晶体管 .....</b>	<b>211</b>
8-1	理想 MOS 结构的表面电荷区 .....	212
8-2	MOS 电容器 .....	217
8-3	沟道电导 .....	219
8-4	平带电压和阈值电压 .....	221
8-5	表面态和氧化硅中的电荷 .....	225
8-6	MOS 晶体管的静态特性 .....	228
8-7	小讯号参数和等效电路 .....	232
8-8	衬底(本体)偏压的影响 .....	234
8-9	制造工艺 .....	235
8-10	其他场效应晶体管 .....	240
<b>第九章</b>	<b>双极结型晶体管 .....</b>	<b>245</b>
9-1	晶体管的作用 .....	245
9-2	电流增益与电流-电压特性 .....	249

9-3	电流分量和电流增益表示式的推导	251
9-4	爱拜尔斯-莫尔方程	256
9-5	缓变基区晶体管	258
9-6	基区扩展电阻和电流集聚	261
9-7	晶体管的频率响应	263
9-8	混接 $\pi$ 型等效电路	267
9-9	开关晶体管	269
9-10	击穿电压	273
9-11	$p-n-p-n$ 二极管	276
9-12	硅可控整流器(可控硅)	279
9-13	双向 $p-n-p-n$ 开关	281
<b>第十章</b>	<b>集成器件</b>	<b>288</b>
10-1	双极集成器件的隔离工艺	288
10-2	集成双极晶体管	294
10-3	多晶体管结构	296
10-4	侧向 $p-n-p$ 晶体管	298
10-5	集成注入逻辑	300
10-6	MOS 倒相器	302
10-7	互补 MOS(CMOS)倒相器	307
10-8	D-MOS 和 V-MOS 晶体管	309
10-9	不挥发 MIS 存贮器件; MNOS 和 FAMOS 结构	311
<b>第十一章</b>	<b>电荷转移器件</b>	<b>322</b>
11-1	电荷转移的概念	322
11-2	MOS 电容器的瞬态特性	324
11-3	电极排列和制造工艺	328
11-4	转移效率	333
11-5	电荷的注入、检测和再生	337
11-6	体内(埋入)沟道电荷耦合器件	341
11-7	集成斗链器件	342
11-8	电荷耦合图象器	344

11-9 讯号处理和存储器应用 .....	346
<b>附录</b> .....	354
A 原子、电子和能带 .....	354
A-1 玻尔原子 .....	354
A-2 物质的波动特性：薛定谔方程 .....	356
A-3 状态密度 .....	359
A-4 元素的电子结构 .....	360
A-5 晶体的能带理论 .....	362
B 热离子发射电流的推导 .....	369
C 误差函数的一些特性 .....	371
<b>答案</b> .....	372
<b>索引</b> .....	378

# 第一章 半导体的物理基础

本章讨论了半导体的基本性质,从叙述晶体结构和标志晶面开始,然后叙述价键和能带的模型,接着讨论本征和非本征半导体中载流子浓度及费米能级的计算,还阐述了散射和载流子的运输机制。本章引入的一些概念构成了以后研究所有半导体器件的基础。

## 1-1 晶体结构

按照固体的结构分类,可把它区分为晶体、多晶和无定形诸类型。无定形固体没有完全确定的结构;事实上,它的特征就在于它没有固定结构形式。在过去几年里,一些无定形固体越来越受到人们的注意,并已用它做成了开关器件。然而,把它们作为有源电子器件的材料使用,其重要性却是值得怀疑的。在多晶固体中,存在许多小区域,每个小区域都具有完好的结构,但它又与其邻区不同。在晶态固体中,原子在三维空间规则地排列着,形成了一种周期性的结构,称作晶格。在这种固体中,可以规定一种晶胞,它本身在三维空间内重复地出现,从而构成晶态固体。一个晶胞包含了有关原子排列的全部知识,因而可用晶胞来描绘晶体的结构。在许多晶体结构中,我们将限于论述与以后学习有关的五种立方结构。

1. 简单立方(*sc*)晶体。图 1-1 *a* 中示出了 *sc* 晶体,立方晶格的每个角均被一个原子所占据,这些原子又都为相邻的八个晶胞所共有。立方晶胞中的长度 *a* 称作晶格常数。很少有晶体表现出这种结构,钋是以这种形式结晶的唯一元素。

2. 体心立方(*bcc*)晶体。图 1-1 *b* 中示出了 *bcc* 晶体,其中,

除了角上的各个原子外,还有一个原子处在立方体的中心。具有这种结构的晶体,包括钠、钨和钨。

3. **面心立方(*fcc*)晶体**。图 1-1 *c* 中示出了 *fcc* 晶体,除了八个角上的原子外,在立方体的六个面上还各有一个原子。有大量的元素以这种晶体形式出现,其中包括铝、铜、金、银、镍和铂。

4. **金刚石结构**。在图 1-1 *d* 中描绘了金刚石的晶胞。可把它看成是两个相互穿插的 *fcc* 亚晶格,一个相对于另一个沿着立方体的对角线位移四分之一的距离。这样两个穿插的 *fcc* 晶格的俯视图以二维形式示于图 1-1 *e* 中。注意,第二个 *fcc* 晶格的四个原子位于第一个 *fcc* 格子之内。而金刚石结构中,这四个原子

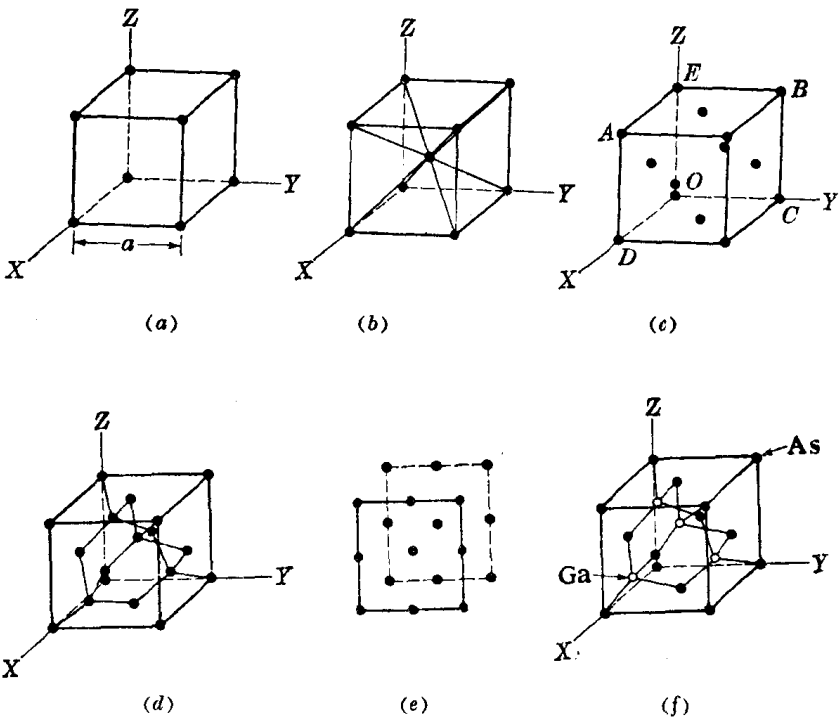


图 1-1 立方晶体的晶胞:(a) 简单立方,(b) 体心立方,(c) 面心立方,(d) 金刚石,(e) 以二维表示的两个互相穿插的 *fcc*,(f) 闪锌矿结构。

属于第一个  $fcc$  晶格的同一晶胞。在该晶胞以外的各个原子属于相邻的各个晶胞。硅和锗都呈现这种结构。

5. **闪锌矿结构**。砷化镓(GaAs)呈现图 1-1  $f$  所示的闪锌矿结构。当 Ga 原子处在一个  $fcc$  晶格上,而 As 原子处在另一个  $fcc$  晶格上时,由金刚石结构便可得到闪锌矿结构。闪锌矿族的其他材料还包括磷化镓、硫化锌以及硫化镉等。

进一步考察图 1-1  $c$  所示的  $fcc$  晶体。我们看到  $ABCD$  平面内有六个原子, $AEOD$  平面内有五个原子,还看到在这两个平面内原子间距不同;因此,晶体的性质沿不同方向而有差异,即晶体是各向异性的。因而,需要找到一个简便的方法来标志晶面和晶轴的取向。实际上,晶面是由它的密勒指数来标志的,这些密勒指数是通过下列步骤得到的:

1. 确定平面在三个直角坐标上的各个截点。
2. 以晶格常数为单位,测出各个截点离原点的距离。
3. 取截距的倒数,然后按同一比值把它们约化为三个整数,通常取最小的三个整数。

例如,若晶面在各轴上的截距为 4、2、1,则其倒数为  $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、1。这样,晶面的密勒指数便为 (124)。晶面的方向垂直于晶面本身,并以同样的密勒指数括入括号表示它。例如, (111) 平面的方

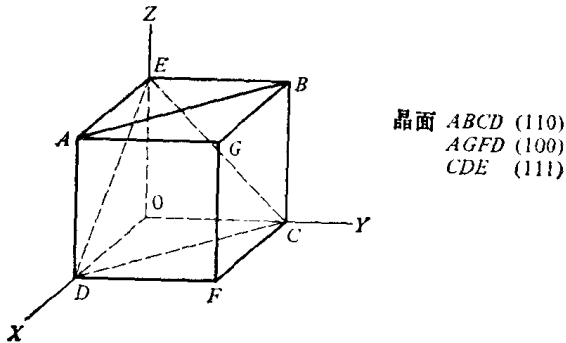


图 1-2 用密勒指数表示的三个重要晶面。

向写作 $[111]$ 。由于晶格中的某些晶向只和坐标轴的取向有关,所以,它们是等效的。例如,在立方晶格中,晶轴的方向标为 $[001]$ , $[010]$ 和 $[100]$ 。由于它们所代表的晶面相同,其差别仅在于坐标轴的选取不同,因而这些方向是等效的。可把这些等效方向的指数写作 $\langle 100 \rangle$ 。在图 1-2 中示出了三个重要晶面的密勒指数。

## 1-2 固体的价键模型

在组成晶格的每个原子中,有一个带正电荷的原子核被带负电荷的轨道电子包围着。倘若原子是密排的,则外层电子的轨道发生重叠,以致产生强烈的原子间力。外层电子称为价电子,它们在决定固体的电学特性方面有头等重要意义。在像铝或金这样的金属导体中,价电子为固体中的所有原子共有。这些电子不是被束缚于个别的原子上,而是自由的,在有外加的电场时,能传导电流。金属导体中的自由电子密度为 $10^{23}\text{cm}^{-3}$ 的数量级,由之所得的电阻率小于 $10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}$ 。在像石英( $\text{SiO}_2$ )这样的绝缘体中,几乎所有的价电子都仍然紧紧地束缚在组成原子上,不能传导电流。结果是,二氧化硅的电阻率高于 $10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$ 。在结晶半导体硅中,每个原子具有四个价电子,如图 1-3 a 中以二维示意图所示,在称为共价键的成对组态中,价电子是共有的(与它的四个最邻近原子共有)。在低温时,这些电子被束缚住,它们不能导电。在高温时,热能可使一些电子摆脱共价键的束缚,这些电子被释放以后便自由地参加电流传导。因而,半导体的性能在低温时像绝缘体,在高温时像导体。但在室温时,纯硅的电阻率为 $2 \times 10^5\Omega\cdot\text{cm}$ ,它远高于一个良导体的电阻率。

如图 1-3 b 所示,每当在半导体中有一个价电子被释放出来时,便在共价键中留下一个空位。这个空位可被它近邻的一个价电子填充,这样就会造成空位的移动。从而,可以认为空位在晶体



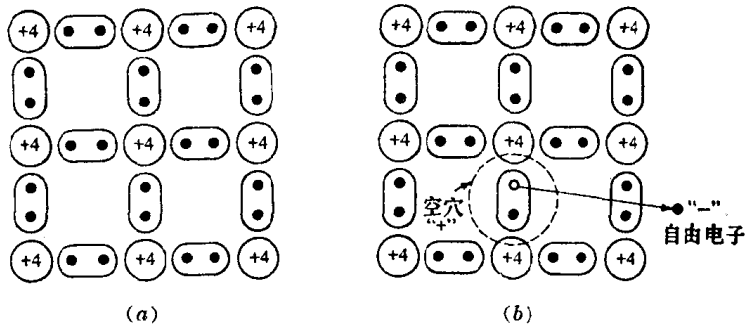


图 1-3 表示硅晶体结构的二维示意图：  
(a) 完整的共价键，(b) 断开的共价键。

结构内运动着。结果，可把这种空位看成与电子相似的一种粒子。这种虚构的粒子称为空穴。它带有一个正电荷，并且，在外电场的作用下沿着与电子运动相反的方向运动。

### 1-3 有效质量和能带的概念

一个未被共价键俘获的电子(称为传导电子)或一个空穴，它们在半导体中类似于在真空中的一个电子，可以比较自由地来回运动。然而，电子或空穴受到荷电的原子实的周期势的作用。结果，一个传导电子的“有效质量”和一个自由电子在真空中的电子质量不同。这个有效质量体现电子或空穴在半导体中运动的量子力学性质。它是一个极端重要的简化，这种简化使我们可把空穴和传导电子当作经典的荷电粒子来考虑。采用这种简化时，一个电子在晶体中的能量-动量关系由下式给出：

$$E_k = \frac{P^2}{2 m_e} \quad (1-1)$$

式中  $m_e$  = 电子的有效质量

$E_k$  = 动能

$P$  = 晶体动量