

双极型与MOS半导体器件原理

黄均鼐 汤庭鳌 编著

复旦大学出版社

73.73
F2

双极型与 MOS 半导体器件原理

黄均鼎 汤庭鳌 编著



复旦大学出版社

9110047

内 容 简 介

本书在简述半导体基本性质及半导体表面特性的基础上,介绍了双极型晶体管的工作原理和直流、频率、开关、功率特性,以及 MOS 场效应晶体管的结构、原理、交直流特性,讨论了它的二级效应及小尺寸器件效应。

本书可供高等院校有关专业作为教学用书,也可供从事半导体器件及集成电路研究和制造工作的专业人员参考。

双极型与 MOS 半导体器件原理

黄均鼎 汤庭鳌 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 常熟文化印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 14.375 字数 423,000

1990 年 8 月第 1 版 1990 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—2,000

ISBN 7-309-00492-2/O·75

定价: 3.40 元

7:00:10

前 言

晶体管的发明和推广应用,大大促进了电子技术的进步,促进了半导体科学的进一步发展。本书主要阐述双极型及 MOS 型晶体管的结构、原理和特性。力求突出晶体管的物理图像和物理概念,尽量避免过分繁复的数学推导,以使读者能较深刻地从宏观和微观两个方面掌握半导体器件的全貌。本书还对近年来晶体管的研究成果作了简要介绍。第一~五章在简述半导体基本性质后,阐述了双极型晶体管的工作原理及它的直流、频率、开关和功率特性;第六~九章以半导体表面特性为基础,讨论了 MOS 场效应晶体管的结构、原理和主要特性,并就 MOS FET 的二级效应及小尺寸器件效应作了较详细的讨论。前五章及附录由黄均鼎编写,后四章由汤庭鳌编写。

由于我们的水平有限,书中一定会有不少缺点和错误,恳请使用本书的广大读者提出宝贵意见。

编 著 者

目 录

第一章 半导体器件的物理基础

1.1 半导体的特性	1
1.1.1 晶体的结构	1
1.1.2 半导体在电性能上的独特性质	4
1.2 电子能级和能带	4
1.2.1 电子的共有化运动	4
1.2.2 晶体中的能带	6
1.3 半导体中的载流子	8
1.3.1 电子密度和空穴密度表达式	8
1.3.2 载流子密度与费密能级位置的关系	11
1.4 杂质半导体	12
1.4.1 两种不同导电类型的半导体	13
1.4.2 杂质半导体	14
1.5 非平衡载流子	15
1.5.1 非平衡载流子的产生和复合	15
1.5.2 非平衡载流子的寿命	17
1.5.3 复合中心	18
1.6 载流子的运动	21
1.6.1 载流子的漂移运动	21
1.6.2 载流子的扩散运动	26
参考文献	28
习 题	28

第二章 p-n 结

2.1 平衡 p-n 结	31
2.1.1 空间电荷区和接触电位差	31
2.1.2 空间电荷区的电场和电位分布	34

2.2	p-n结的直流特性	40
2.2.1	加偏压 p-n 结的能带图及载流子和电流分布	40
2.2.2	p-n 结的伏安特性	43
2.2.3	势垒区的复合和大注入对正向伏安特性的影响	47
2.2.4	势垒区的反向产生电流	50
2.3	p-n 结电容	51
2.3.1	突变结势垒电容	52
2.3.2	线性缓变结势垒电容	54
2.3.3	扩散结的势垒电容	55
2.3.4	p-n 结的扩散电容	63
2.4	p-n 结击穿	67
2.4.1	电击穿	67
2.4.2	热击穿	74
	参考文献	75
	习 题	77

第三章 晶体管的直流特性

3.1	概述	79
3.1.1	晶体管的基本结构	79
3.1.2	晶体管的放大作用	81
3.1.3	晶体管内载流子的传输及电流放大系数	83
3.1.4	晶体管的输入和输出特性	86
3.2	均匀基区晶体管的直流特性和电流增益	88
3.2.1	均匀基区晶体管直流特性的理论分析	88
3.2.2	均匀基区晶体管的短路电流放大系数	96
3.3	漂移晶体管的直流特性和电流增益	101
3.3.1	漂移晶体管的直流特性	101
3.3.2	漂移晶体管的电流增益	107
3.4	晶体管的反向电流和击穿电压	111
3.4.1	晶体管的反向电流	111
3.4.2	晶体管的击穿电压	114
3.5	晶体管的基极电阻	119
3.5.1	梳状晶体管的基极电阻	120

3.5.2 圆形晶体管的基极电阻	122
3.6 晶体管的小信号等效电路	126
参考文献	128
习 题	129

第四章 晶体管的频率特性和功率特性

4.1 电流放大系数的频率特性	131
4.1.1 基区输运过程	133
4.1.2 共基极短路电流放大系数的频率关系	144
4.1.3 共发射极短路电流放大系数的频率关系	151
4.2 高频等效电路	156
4.2.1 本征晶体管小信号等效电路	156
4.2.2 混合 π 形等效电路	160
4.3 高频功率增益和最高振荡频率	164
4.3.1 高频功率增益	164
4.3.2 最高振荡频率	166
4.4 最大集电极电流	167
4.4.1 晶体管的大注入效应	167
4.4.2 有效基区扩展效应	173
4.4.3 发射极电流集边效应	176
4.4.4 最大集电极电流	178
4.5 功率晶体管的安全工作区	179
4.5.1 晶体管的最大耗散功率	179
4.5.2 晶体管的二次击穿	181
4.5.3 晶体管的安全工作区	182
4.6 晶体管的噪声特性	184
4.6.1 晶体管的噪声	184
4.6.2 晶体管噪声来源	185
参考文献	188
习 题	189

第五章 晶体管的开关特性

5.1 二极管的开关作用	192
--------------	-----

5.1.1 开关作用的定性分析	193
5.1.2 开关时间	196
5.2 晶体管的开关过程	198
5.2.1 晶体管的工作区	198
5.2.2 晶体管的开关过程	199
5.3 晶体管的开关时间	205
5.3.1 延迟时间	206
5.3.2 上升时间	208
5.3.3 储存时间	210
5.3.4 下降时间	212
5.4 开关晶体管的要求及工艺措施	213
5.4.1 正向压降和饱和压降	213
5.4.2 提高开关速度的措施	214
参考文献	214
习 题	215

第六章 半导体表面特性及 MOS 电容

6.1 半导体表面和界面结构	216
6.1.1 清洁表面和真实表面	216
6.1.2 硅-二氧化硅界面的结构	220
6.2 表面势	223
6.2.1 空间电荷区和表面势	224
6.2.2 表面的积累、耗尽和反型	225
6.2.3 空间电荷面密度与表面势的关系	229
6.2.4 ψ_s 及 W 与外加电压的关系	234
6.3 MOS 结构的电容-电压特性	236
6.3.1 理想 MOS 的 $C-V$ 特性	236
6.3.2 实际 MOS 的 $C-V$ 特性	242
6.3.3 MOS 结构 $C-V$ 特性曲线的应用	246
6.4 MOS 结构的阈值电压	250
6.4.1 理想 MOS 结构的阈值电压	250
6.4.2 实际 MOS 结构的阈值电压	252
参考文献	254

习 题	256
-----------	-----

第七章 MOS 场效应晶体管的基本特性

7.1 MOS 场效应晶体管的结构和分类	259
7.1.1 MOS 场效应管的结构	259
7.1.2 MOS 场效应管的四种类型	261
7.1.3 MOS 场效应管的特征	265
7.2 MOS 场效应晶体管的特性曲线	266
7.2.1 MOS 场效应管的输出特性曲线	266
7.2.2 MOS 场效应管的转移特性曲线	270
7.3 MOS 场效应晶体管的阈值电压	272
7.3.1 n 沟道 MOS FET 的阈值电压	272
7.3.2 p 沟道 MOS FET 的阈值电压	273
7.4 MOS 场效应管的电流-电压特性	274
7.4.1 MOS FET 在线性工作区的电流-电压特性	275
7.4.2 饱和工作区的电流-电压特性	277
7.4.3 击穿区	279
7.4.4 亚阈值区的电流-电压关系	281
7.5 MOS 场效应管的二级效应	283
7.5.1 非常数表面迁移率效应	283
7.5.2 衬底偏置效应	287
7.5.3 体电荷变化效应	290
7.6 MOS 场效应管的增量参数	293
7.6.1 跨导 g_m	293
7.6.2 增量电导(漏-源输出电导) g_D	295
7.6.3 串联电阻对 g_D 和 g_m 的影响	297
7.6.4 载流子速度饱和对 g_m 的影响	298
7.6.5 g_m 的极限	299
7.7 阈值电压 V_T 的测量方法及控制方法	300
7.7.1 $1\mu A$ 方法	300
7.7.2 $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$ 方法	300
7.7.3 10-40 方法	301
7.7.4 修改的 10-40 方法	302

7.7.5 输出电导法	303
7.7.6 阈值电压 V_T 的控制和调整	304
7.8 MOS 场效应管的频率特性	304
7.8.1 MOS 场效应管的宽带模型	305
7.8.2 最高振荡频率	306
7.8.3 寄生电容对最高振荡频率的影响	309
7.9 MOS 场效应管的开关特性	310
7.9.1 MOS 倒相器的定性描述	310
7.9.2 单沟道 MOS 集成倒相器	312
7.9.3 互补 MOS 集成倒相器	317
7.9.4 耗尽型负载 MOS 集成倒相器	319
参考文献	321
习 题	323

第八章 MOS 功率场效应晶体管的结构和特性

8.1 用作功率放大的 MOS 功率管	324
8.2 用作开关的 MOS 功率晶体管	326
8.3 MOS 功率晶体管的结构	328
8.3.1 二维横向结构	328
8.3.2 三维结构	331
8.4 功率 DMOS 晶体管的设计考虑	335
8.4.1 DMOS 晶体管的阈值电压	336
8.4.2 DMOS 晶体管的电导和跨导	337
8.4.3 DMOS 晶体管的导通电阻	339
8.5 DMOS 晶体管的击穿电压	347
8.5.1 雪崩击穿	347
8.5.2 穿通电压	347
8.6 DMOS 晶体管的二次击穿	348
8.7 温度对 MOS 晶体管特性的影响	350
8.7.1 温度对载流子迁移率的影响	350
8.7.2 阈值电压的温度效应	350
8.7.3 漏-源电流、跨导及导通电阻随温度的变化	351
参考文献	353

第九章 小尺寸 MOS 器件的特性

9.1 非均匀掺杂对阈值电压的影响	355
9.1.1 阶梯函数分布近似	355
9.1.2 高斯分布情况	357
9.2 MOS 场效应管的短沟道效应	360
9.2.1 短沟道 MOS 管的亚阈值特性	361
9.2.2 几何划分电荷的模型	366
9.2.3 电势模型	372
9.3 MOS 场效应管的窄沟道效应	398
9.4 MOS 场效应管的小尺寸效应	403
9.4.1 小尺寸效应	403
9.4.2 MOS 场效应管按比例缩小规则	406
9.4.3 热电子效应	408
参考文献	410
习 题	411

附 录	412
-----	-----

I 锗、硅、砷化镓的重要性质 (300 K)	412
II 硅与几种金属的欧姆接触系数 $R_c (\times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2)$	414
III 二氧化硅和氮化硅的重要性质 (300 K)	415
IV 余误差函数	416
V 锗、硅电阻率与杂质浓度的关系	419
VI 锗、硅迁移率与杂质浓度的关系	420
VII 硅扩散层表面杂质浓度与扩散层平均电导率的关系曲线	421
主要符号表	438

第一章 半导体器件的物理基础

半导体器件的发明和广泛应用，是建筑在对半导体材料特性、单晶生长、半导体中杂质的作用及载流子运动规律等方面进行详尽研究的基础上的，因此在阐明器件工作原理前，必须先了解上述各项内容，这也就是本章的主要内容。

1.1 半导体的特性

自然界存在的固体材料中，按其结构形式可分为晶体及非晶体两类；按其导电能力则可分为导体、绝缘体和半导体三类。制造晶体管和集成电路的材料，如硅、锗、砷化镓等，属半导体晶体。

1.1.1 晶体的结构

晶体具有一定的结晶形状，它的原子按一定规律在空间中整齐地排列，形成一个个格点，称为晶格。不同的晶体通常有不同的晶格结构，常见的有如下五种立方结构：

(1) 简单立方晶体，如图 1-1 *a* 所示。立方晶格的每个角被一个原子占据，这些原子又被相邻的八个晶胞所共有，长度 *a* 称作晶格常数；

(2) 体心立方晶体，如图 1-1 *b* 所示。除了立方晶格每个角上有一个原子外，在立方晶格的中心还有一个原子。钠、钼、钨等是具有这种结构的晶体；

(3) 面心立方晶体，如图 1-1 *c* 所示。在立方晶格的八个角上有一个原子，在立方晶格的六个面的中心还各有一个原子。铝、铜、金、银等是具有这种结构的晶体；

9110047

(4) 金刚石结构,如图 1-1*d* 所示。它是由两个面心立方晶格沿空间对角线错开四分之一长度互相套合而成。硅和锗就是具有这种结构的晶体;

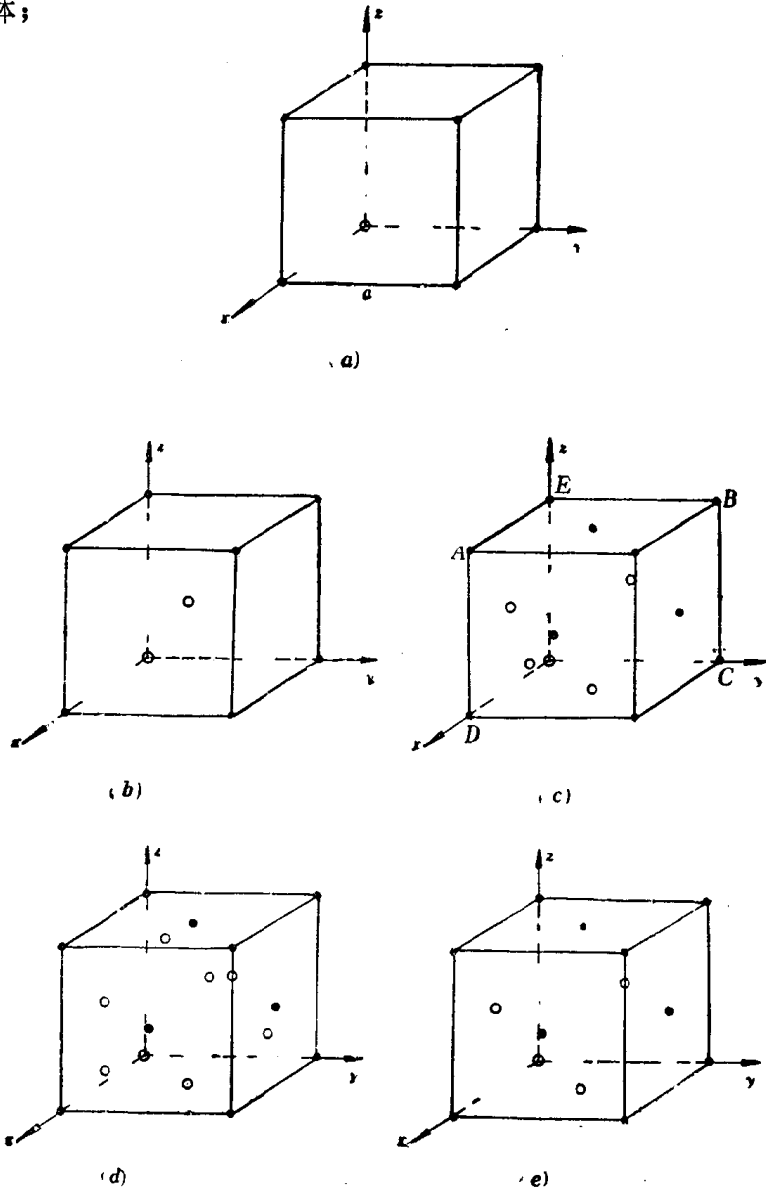


图 1-1 立方晶体的晶胞,简单立方(a)、体心立方(b)、面心立方(c)、金刚石结构(d)和闪锌矿结构(e)

(5) 闪锌矿结构,如图 1-1 e 所示。图中画出了砷化镓的结构: Ga 原子处在一个面心立方晶格上, As 原子处在另一个面心立方晶格上, 因此可从金刚石结构获得闪锌矿结构。具有闪锌矿结构的其它材料还有磷化镓、硫化锌、硫化镉等。

观察图 1-1 c 可知, $ABCD$ 平面内有六个原子。 $AEOD$ 平面内有五个原子, 且这两个平面内原子间距不同。这表明, 沿晶格的不同方向, 原子排列的周期和疏密情况是不相同的, 晶体的机械、物理特性也不相同, 这就是晶体的各向异性。通常用密勒指数来标志晶面的取向, 它是这样得到的:

① 确定某一平面在直角坐标系三个轴上的截距, 并以晶格常数为单位测出相应的截距;

② 取截距的倒数, 然后约化为三个最小的整数, 这就是密勒指数。

如图 1-2 所示, 晶面 $ABCD$ 在坐标轴上的截距为 $1, 1, \infty$, 其倒数为 $1, 1, 0$, 它的密勒指数便是 (110) 。图中列出了三个最主要晶面的密勒指数。晶面的方向垂直于晶面本身, 并以写在方括号中的该晶面的密勒指数表示, 如 (111) 面的晶向为 $[111]$ 。对于金刚石结构, (100) 面原子密度最小, (111) 面原子密度最大。

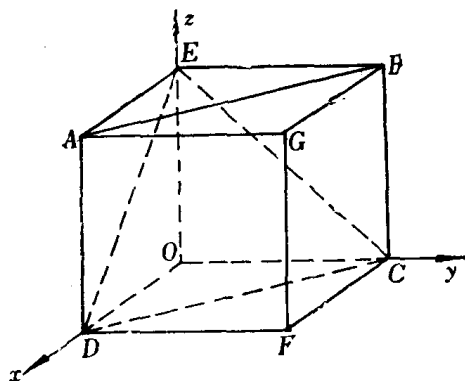


图 1-2 用密勒指数表示晶面:

晶面 $ABCD$ 的密勒指数 (110) ; 晶面 $AGFD$ 的密勒指数 (100) ;

晶面 CDE 的密勒指数 (111)

1.1.2 半导体在电性能上的独特性质

(1) 半导体的电导率随温度升高而迅速增加。与金属相比, 半导体电阻率的温度系数是负的, 而金属则是正的; 半导体电阻率随温度变化很快, 金属则很慢;

(2) 杂质对半导体的导电能力有极为明显的影响。例如, 纯硅的电阻率是 $214000\Omega\cdot\text{cm}$, 若掺入百万分之一杂质(如磷原子), 此时尽管硅的纯度仍很高, 但其电阻率却剧降至 $0.2\Omega\cdot\text{cm}$, 几乎降低了一百万倍;

(3) 半导体的导电能力随光照而发生显著变化。例如, 硫化镉薄膜的暗电阻为几十兆欧, 受光照后, 电阻降为几十千欧, 阻值改变了几百倍, 故可用作光敏电阻。

另外, 半导体的导电能力还随电场、磁场作用而改变。

1.2 电子能级和能带

1.2.1 电子的共有化运动

从原子物理中我们知道, 由于原子核对电子的静电引力, 使电子只能在围绕原子核的半径很小的轨道上运动。当然, 按照量子力学的观念, 应采用电子云概念, 即在空间的所有范围内都有找到某一电子的几率。对原子中的电子而言, 其几率的最大值则局限在离原子核中心很小的范围内(玻尔半径数量级), 轨道这一概念可视为电子云在空间分布几率最大值的轨迹。由于电子在空间运动的范围受到限制, 因此它的能量就呈现不连续的状态, 也就是电子的能量只能取彼此分立的一系列可能值——能级。以氢原子为例, 它的原子核带一个正电荷, 核外有一个绕核运动的电子。我们把该电子刚好脱离原子核束缚成为自由电子时的能量取为能量的零点, 则氢原子中电子可以取的能量特定值为:

$$E_n = -\frac{2\pi^2mq^4}{n^2h^2}$$

式中 m 是电子质量； q 是电子电荷值； h 是普朗克常数； n 称为主量子数，取正整数值。如 $n=1, E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ； $n=2, E_2 = -3.4 \text{ eV}$ ；…其能级图如图 1-3 所示。这表明电子可以处于能级 E_1 上，也可以处在 E_2 上，……但不能处在 E_1 与 E_2 之间，或 E_2 与 E_3 之间，等等。原子中电子能量只能取一系列不连续的特定数值的规律称为电子能量的量子化。

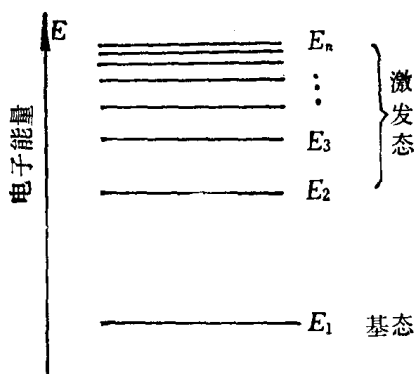


图 1-3 氢原子能级图

使两个氢原子彼此靠拢，形成一个氢分子，此时两个电子轨道将相遇而交迭，一个电子将同时受到两个原子核的影响，该电子不仅可以围绕自身原子核旋转，而且可以转到另一原子周围，即每一电子属于两个原子共有，这种运动形式称为电子的共有化运动。由于每一电子受到两个原子核的影响，电子可能有的能量状态也发生了变化：从原来的一个能级分裂成两个能级。

类似地，晶体中电子也有共有化运动，这是因为晶体是由大量的原子按照一定的方式在空间有规则地排列而成，每立方厘米包含的原子数达到 10^{22} 数量级，原子间距仅为 $\text{\AA}$ 的量级（如硅的原子间距为 $2.35 \text{ \AA}$ ），因此，一个原子轨道上的电子必有可能转移到相邻原子上去，还可从邻近原子再转移到更远的原子上去。晶体中任一电子实际上可在整个晶体中从一个原子转移到另一个原子，不再只围绕某一个原子核运动，这就是晶体中的电子共有化运动。在晶体中不但价电子的轨道有交迭，内层电子的轨道也可能有交迭，它们都会形成共有化运动，只是内层电子的轨道交迭少，共有化程度弱些。

1.2.2 晶体中的能带

设有 N 个原子排列起来结合成晶体, 根据不相容原理, 原来属于 N 个单个原子的相同的价电子能级必定分裂为属于整个晶体的 N 个能级, 其能量稍有差别。这些能级互相靠得很近, 分布在一定的能量区域, 称为能带, 如图 1-4 所示。由于晶体中内层轨道电子的共有化程度较弱, 因此分裂成的能带也较窄, 如图 1-5 所示。由图可知, 两个能带之间的区域, 不存在电子的能级, 即这区域中不可能有电子, 此区域称为禁带。

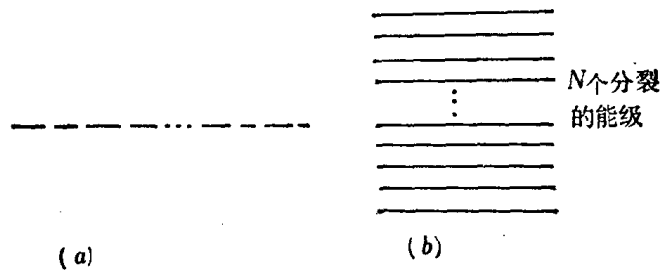


图 1-4 从单个原子的能级(a)到 N 个原子结合成晶体后的能带(b)

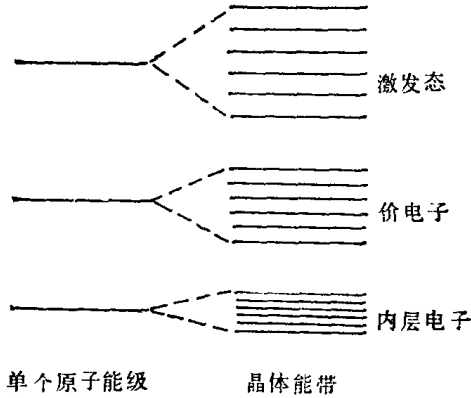


图 1-5 单个原子能级与对应的晶体能带