

集成电路

——设计原理与制造——

上海科学技术情报研究所

集成 电 路

設 計 原 理 与 制 造

R. M. 小 沃 納 編
J. N. 福登沃尔特

上海元件五厂 譯
上海无线电厂

DG 46/05

毛主席語錄

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

我們不能走世界各国技术发展的老路，跟在別人后面一步一步地爬行。我們必須打破常規，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期內，把我国建設成为一个社会主义的現代化的强国。

内 容 简 介

本书是美国莫托罗拉公司固体电子学丛书之一，原书名《Integrated Circuits Design Principles and Fabrication》(Mc Graw-Hill Book Co. 1965 年版)。这本书比较系统地介绍了半导体集成电路设计和制造的有关问题，全书侧重于定性叙述，比较简明扼要。本书共十五章，分三个部分。第一部分共四章，介绍半导体物理，P-n 结和晶体管的基本概念；第二部分共六章，谈集成电路的设计原理；最后一部分计五章，介绍有关集成电路的制造工艺。本书可供从事这方面工作的工人、科技人员和有关专业师生参考。

譯 者 序

在党的“九大”精神的鼓舞下，在伟大领袖毛主席关于“备战、备荒、为人民”的伟大战略思想的指引下，亿万革命人民贯彻执行毛主席提出的“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线和“自力更生”、“艰苦奋斗”的伟大方针，在全国范围内出现了社会主义革命和社会主义建设的新高潮。我国电子工业战线上的广大工人、革命干部和革命科技人员，也和其它战线上的同志们一样，以抓革命，促生产，促工作，促战备的实际行动，为完成“九大”的各项战斗任务，为狠狠打击帝、修、反不断作出贡献。

在当前这样一派大好形势下，我们遵循毛主席“洋为中用”和“知彼知己，百战不殆”的教导，译出了《集成电路设计原理与制造》一书，供有关人员参考。这本书共十五章，分成三个部分。第一部分共四章，介绍半导体物理、p-n 结和晶体管的基本概念；第二部分共六章，谈集成电路的设计原理；最后一部分计五章，介绍集成电路的制造工艺。

本书比较系统地介绍了半导体集成电路设计和制造的有关问题，全书侧重于定性叙述，很少冗长的数学推导和繁复的电路分析，比较简明扼要，此外，书中还收集了一些实用的参考曲线和图表。但是，原书是1965年出版的，集成电路的一些新分枝，诸如大规模集成电路、微波集成电路以及近年来出现的一些新技术、新器件如微电子束技术、离子注入技术、新的隔离技术和封装技术等都没有涉及或讲得很少，因此，本书只能作为一般参考。

在翻译的过程中，我们对原书中字里行间所散布的资产阶级观点作了批判和删改，希望同志们参阅本书时，遵循伟大领袖毛主席关于“批判地吸收外国文化”的教导，以毛泽东思想为武器，继续进行革命的批判。

译 者

一九七〇年六月

目 录

1. 半导体物理的一些基本概念	1
1-1 固体中的能带结构	1
1-2 费米分布函数和费米能级	5
1-3 半导体晶体中的电子和空穴	9
1-4 本征半导体中的载流子浓度	12
1-5 半导体中的施主杂质和受主杂质	16
1-6 电阻率和电导率	26
2. 结的理论与特性	35
2-1 载流子扩散	35
2-2 载流子寿命	38
2-3 平衡结	44
2-4 非平衡结	60
2-5 结电容	75
2-6 反向击穿	77
3. 杂质扩散和扩散结的性质	82
3-1 扩散理论	82
3-2 工艺因素对扩散分布的影响	89
3-3 扩散层的测定	94
3-4 扩散结的性质	104
3-5 金扩散	110
4. 晶体管基本原理	114
4-1 用作放大器的 $n-p-n$ 结型晶体管	114
4-2 电流增益和晶体管结构的关系	120
4-3 缓变基区的电流增益	127
4-4 晶体管的基极电阻	129
4-5 基极输入和集电极饱和电压	132
4-6 晶体管的最大电压特性	134
4-7 晶体管的频率响应	136

4-8 晶体管的开关特性	143
4-9 开关过程的定性描述	145
5. 单块和混合电路的设计原理	151
5-1 基本工艺过程	152
5-2 混合集成电路的设计原理	153
5-3 单块电路的设计原理	154
5-4 基本的单块结构	156
5-5 各种工艺的优缺点	167
5-6 $p-n-p-n-p-n$ 结构的形成	170
5-7 光致抗蚀工艺	175
5-8 光掩模的制造	176
5-9 单块电路设计中的考虑	179
5-10 单块电路设计举例	182
5-11 小结	190
6. 多相单块集成电路	195
6-1 多相单块集成电路的制造	198
6-2 多相单块集成电路的优点	202
7. 单块电路的晶体管和二极管	205
7-1 单块集成电路晶体管的结构	205
7-2 击穿电压特性	212
7-3 漏电流特性	214
7-4 单块(电路)晶体管的电容	214
7-5 电流增益	219
7-6 饱和特性	222
7-7 单块电路晶体管的频率响应	225
7-8 单块电路晶体管特性及电路应用小结	229
7-9 把集成电路晶体管用作二极管的五种基本接法	233
7-10 二极管反向击穿电压	235
7-11 二极管漏电流	236
7-12 二极管电容	238

7-13 二极管存貯時間 (二极管恢复時間).....	240
7-14 正向特性	242
7-15 $p-n-p$ 寄生晶体管 作用	244
7-16 集成电路二极管小結	246
8. 集成电路中的场效应器件	249
8-1 场效应晶体管的工作和設計原理.....	251
8-2 其他結型场效应器件.....	262
8-3 场效应器件工艺.....	268
8-4 絕緣柵 FET	275
9. 集成电路中其他有源器件	280
9-1 隧道二极管和反向二极管.....	280
9-2 变容二极管.....	283
9-3 单結晶体管.....	288
9-4 $p-n-p-n$ 开关	290
10. 集成电路的无源元件	295
10-1 結(型)电容器	296
10-2 薄膜电容器	302
10-3 扩散电阻器	307
10-4 薄膜电阻器	317
10-5 电感器	321
10-6 压电滤波器	323
10-7 大容量电容器	323
10-8 集成电路系統的其他元件	324
10-9 小結	324
11. 单晶生长和外延工艺	326
11-1 晶体生长	326
11-2 切片和拋光	327
11-3 外延	327
12. 晶片加工	343
12-1 外延	345

12-2 扩散	345
12-3 光致抗蚀法	357
12-4 二氧化硅-硅的界面效应	365
12-5 欧姆接触的形成	368
13. 集成电路中的薄膜	374
13-1 薄膜的淀积	376
13-2 薄膜的改性	386
13-3 薄膜图形的形成	387
13-4 薄膜参数的调整	389
13-5 薄膜的接触	390
13-6 衬底制备	391
13-7 相容电路的设计	392
13-8 薄膜电路的相容性	394
13-9 薄膜工艺小结	397
14. 装架工艺	401
14-1 管芯切割和焊接	401
14-2 引线焊接	408
14-3 封口	416
14-4 寄生成份	418
14-5 导热问题	419
15. 集成电路的封装	421
15-1 外壳的密封	422
15-2 扁平外壳	425
15-3 TO-5 型外壳	429
15-4 外壳的检验	431
15-5 散热问题	434
15-6 集成电路封装的发展趋势	441
附录 A	443
附录 B	444
附录 C	445

1 半导体物理的一些基本概念

目前的集成电路和半导体工艺有着紧密的联系。因此本章概述一下半导体的物理原理。对象是集成电路工作者或未来的集成电路工作者。这章的内容，大部分是定性的叙述，但在有助于问题的基本理解的地方，或者那些知识是实际工作者每天都要用到的地方，也作一些定量的叙述。

本章的概念按次序一步一步引出，前后有一定的连贯性，因此，具有一些基本理论知识或业已参加实际工作的技术人员阅读本章时不会有什么困难。想进一步深入的读者可以参考本章末尾的参考书目。其中，尤其是参考书目3，内容比较完全，而且该文末尾又介绍了很多基本的参考资料。

本书的第一部分主要讲理论。本章讲的是半导体体内性质的基础知识，然后，在第二章讲 $p-n$ 结的基本问题，第三章讲扩散结，最后第四章讲晶体管基础理论。一本讲集成电路的书用这么大的篇幅来讨论结型晶体管这一点最初也许会令人感到惊奇。然而双极性结型晶体管显然是目前集成电路的心脏。而且，结型晶体管体现了单块集成电路中其它元件的大多数性质和效应，所以对晶体管的基本了解将有助于对其它元件作进一步的研究。

1-1 固体中的能带结构

在一个孤立原子中，电子仅能存在于某些限定的能态。这些能态或运动状态以四个量子数来表示。这四个量子数是： n ，近似地表示电子的总能量； l ，表示轨道角动量的大小； m ，表

示轨道角动量的空间方向; s_z 表示电子自旋角动量的空间方向。而且,按照鲍利不相容原理,在一给定的系统中,每一个能态只能容纳一个电子(这里,“系统”就是孤立原子)。因此,当对一个原子补充适当数目的电子时,电子就填充那些限定的能态,开始填充最低的能态,然后填充较高的能态,直至所有电子填满为止。

当两个能量原是相等的原子彼此接近而开始相互作用时,它们相应的能级就开始产生能级的分离。这种现象有时称为能级分裂。当两个原子逐渐接近时,外层电子的能级首先分裂,而最内层电子能级的分裂所需要的接近程度,可能是物理上所不能实现的。而且,当原子相互作用的强度增加时,能级分裂的大小(或者说一个能级所产生的两个能态的距离)也随着增加。

机械振子模拟 上述原理可用机械模拟来说明。图 1-1 是一对机械振子,具有完全相同的弹簧和质量相等的负荷,作无摩擦的滑动。当它们完全独立时,它们的垂直振荡的共振频率

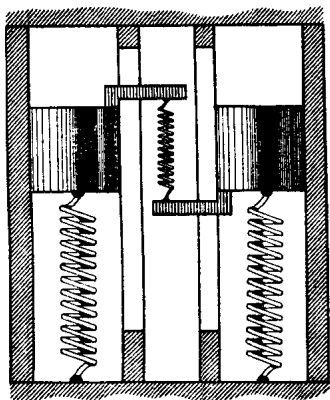


图 1-1 一对相互耦合的机械振子。

相等。如果用一个没有质量的小弹簧把它们耦合起来如图 1-1 所示。它们就可以步调一致地发生振荡,频率不变,因为这个耦合弹簧对这种运动不起作用。但是,当它们以相反方向振荡时,耦合弹簧使这个系统增加了硬性,振荡的自然频率也就提高。也就是说,振子通过耦合弹簧引起了相互作用,使自然频率产生分裂,分裂成对应于两种不同振

荡状态的两个数值。这种情况下的振荡频率就是原子情况下电子能量的模拟。这种模拟特别有趣，因为在量子力学中，能量与频率是成正比的。

虽然这种模拟比较粗糙，但还可以推进一步：增加耦合弹簧的强度，显然会使两个自然频率产生更大的分离。此外，让我们来考虑系统增加到三个耦合振子时的情况。此时，对应于三种振荡状态，将有三个自然频率。一种情况是它们的振荡频率仍然等于未耦合时的自然振荡频率。当中间的振子不动而两边的在相反方向运动时，振荡频率就较高。当两边的振子运动状态相同而和中间的振子运动相反时，振荡频率就更高。

在耦合系统中，每增加一个新的振子，就多一个自然频率。与此相似， N 个相互作用的原子将有 N 个电子能级，而不象一个孤立的原子那样，只有一个电子能级。这一组间距很小的能级称为能带。各个能态的间距非常小，以致在很多场合中，都把能带作为一个连续的能态来看待。为了对这种情况有一个概念，让我们设想在一立方微米单晶硅中有500亿个原子。我们感兴趣的能带总宽度不过一个电子伏左右，所以各能级的间距即便是在这样微小的样品中，也确实是很小的。

某些第四族元素的能带结构 为了更加详细地研究固体中的能带结构，我们想象一个有 N 个原子的晶体，它的原子间距可以在很大的范围内任意改变。如图1-2所示，设垂直方向为电子能级，水平方向为假想的原子间距。这里所谈的一些理论总的说来适用于金刚石结构，因而特别适用于晶体硅。当然，原子间距大时，我们看到的是孤立原子所具有的分离的能级。当原子从很大的间距逐渐缩小时，能级就分裂，而首先分裂的是高能级（图中以 n 及 $(n-1)$ 层能级为例进行比较）。原子间距再缩小时，能带就兼并。这象征着晶体中电子的一种新的特

性，当原子间距再继续缩小时，晶体中的能态就不能用孤立原子原来那样的能态来说明了。如图 1-2 所示，当原子间距缩小到实际晶体的间距时，在两个有关能带之间又产生了一个禁带。而且，低能带中的电子数 ($4N$) 正好等于可能存在的能态数，因此能带完全被填满；如果电子稳定于最低能态，则高能带就空着。晶体中的实际原子间距比给于电子系统以最小能量所要求的原子间距来得大，这似乎有点奇怪。这种情况是由于原子核的互相排斥造成的。在实际间距时，整个原子系统的能量处于最低状态。

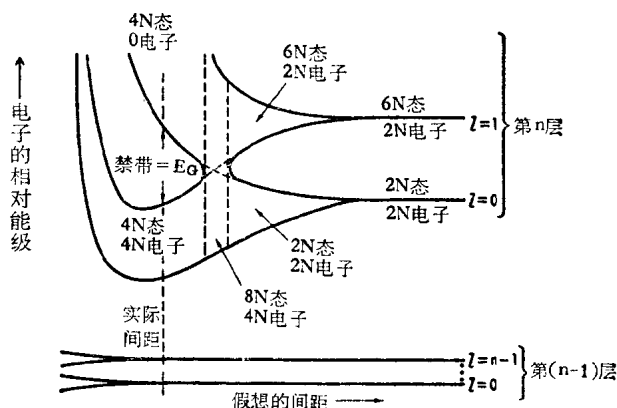


图 1-2 金刚石结构的理论能级与原子间距的关系。

（引自参考书目 1）

现在让我们着重看一看周期表第四族元素中的三个元素：碳、硅和锗。这三种元素都能形成金刚石结构的晶体，都能应用图 1-2 的能级图。虽然这些晶体从定性的角度来看都具有相似的性质，例如它们都很坚硬，但从量的方面来看，在其它特性方面有着重大的差别。在这些特性中，以禁带 E_0 最为突出。表 1-1 列出了这三种元素在室温下的 E_0 值。在室温下，纯锗

晶体中有大量的电子可以获得足够的能量，从低能带跃迁到高能带（当温度升高时，就有更多的电子可以获得足够的能量产生这种跃迁）。硅的禁带宽度比锗的大 50%，所以纯硅中能够实现这种跃迁的电子数远小于锗中的电子数，但是无论如何，数量还是相当大的。在原来几乎是空的高能带中，跃迁上去的电子给与纯硅和纯锗以足够的电导率，使之成为半导体。可是碳（金刚石）的电导率却很小，以致我们把它划分在绝缘体一类中。在室温时，金刚石由于禁带很宽，它的高能带几乎完全空着。这里要着重指出的是半导体和绝缘体仅在程度上不同，在绝对温度零度时，两者都有全部填满或完全空的能带。

表 1-1 室温时的禁带值

（单位 电子伏特）

碳.....	6~7
硅.....	1.11
锗.....	0.72

然而，导体与半导体、绝缘体不同。导体的特点是，即使在绝对零度，能带也是部分填满的。把图 1-2 中的能带重迭区扩大并向左延伸，远远超过表示实际原子间距的线之外，就可理解这种情况。实际上，金属中孤立原子几个分离能级形成的能带在实际原子间距时迭在一起，结果是一个宽的能带仅仅一部分充有电子，而且在任何温度下都是这样。

1-2 费米分布函数和费米能级

上节叙述了固体中电子可能存在的能态是怎样形成能带的；能带中的能态是如此之多而间隔又如此之小，以致完全可以把能带看成是连续的能态。下面研究固体中电子本身是怎样按能量分布的。

参考书目 2 提出的模拟有助于理解电子在能级中的分布。
 图 1-3a 表示一个盛水的容器,经搅动后水的表面产生了波动。
 波浪式的图形表示波动。现在来求在高度为 h 处的地方发现水
 的几率。图 1-3b 是高度 h 与几率 p 的关系图。这样的关系图
 可以恰当地用来描述水在容器中的分布。

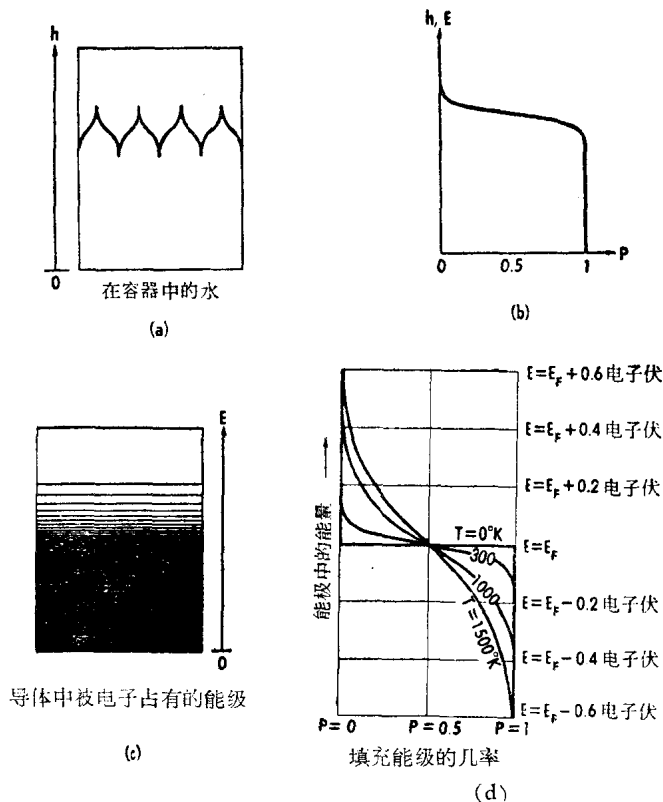


图 1-3 (a)容器中的水被搅动时的情况; (b)在各种不同高度
 (能级)时水(电子)的存在几率; (c)导体中被电
 子占据的能级; (d)四种不同温度时的费米分布函数。
 (引自参考书目 2)

现在来看图 1-3c, 图中阴暗部分表示导体能带中被电子占据的能级的分布。如上节所述, 这个能带仅仅一部分被电子填充, 因而可以用没有盛满水的容器来比拟。为了使模拟完全起见, 将电子能量 E 比拟成水的高度(即位能)。水的搅动相当于温度。无搅动时, 水的平静表面是一个理想的矩形几率函数。这个函数也适用于绝对零度时的电子分布。当温度升高时, 函数向垂直方向伸展, 但是以几率等于 $\frac{1}{2}$ 的点为中心, 两边仍保持对称。

这种情况由图 1-3d 四种不同温度时的电子分布函数来说明。这个重要的函数称为费米分布函数。它是由费米-狄拉克统计得出的。

通过函数对称中心的能级对于固体中电子的定量研究占有重要的地位。此能级称为费米能级, 有时也称为费米“栏”。“栏”这个名词对上述水的模拟有着特别重要的意义。具体的说, 费米能级就是被电子占据的几率为 $\frac{1}{2}$ 的能级。在这个能级上, 不一定有电子能态; 但如果真有电子能态存在的话, 则它被电子填充的几率为 50%。

当我们考虑半导体或绝缘体这些有禁带的材料的电子分布问题时, 最后那句话的意义就很清楚了。在这个问题上, 盛水容器的模拟类比就不行了。图 1-4 表示室温时的费米分布函数, 画在旁边的是纯硅的能带结构图。零点是任意取的。图中以低能带顶部的能级为零。很明显, 下面的能带几乎全部被电子所占据。上面的能带即使在它的较低的部分, 电子占据的几率也非常低, 不过还是有一些的。如前所述, 上面的能带必须有电子才能导电。因此, 纯硅在室温时的电阻率为 $10^5 \sim 10^8$ 欧姆·厘米。材料的禁带越宽时, 有足够能量达到上面能带的电子数就急骤下降; 在绝缘体中, 禁带宽度如此之大, 以致能导