

微处理器设计

——从设计规划到工艺制造

〔美〕Grant McFarland 著
何虎 沈钇 谭洪贺 译

微处理器设计 ——从设计规划到工艺制造

〔美〕Grant McFarland 著
何 虎 沈 钰 谭洪贺 译

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2008-1302 号

内 容 简 介

本书以微处理器设计为中心,内容涵盖了从设计规划到工艺制造的全部设计流程。全书共 11 章,对设计中需要的所有步骤进行了一一介绍,重点讲述了微处理器的发展历程、计算机部件、设计规划、计算机架构、微处理器架构、逻辑设计、电路设计、版图、半导体制造、微处理器封装以及硅片的调试和测试。书末给出了有关处理器设计的关键概念和术语,便于读者理解和掌握。

本书的读者对象为高等院校微电子专业的广大师生及工程技术人员、研发人员。

图书在版编目(CIP)数据

微处理器设计:从设计规划到工艺制造/(美)Grant McFarland 著;何虎等译.
—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-023139-0

I. 微… II. ①G…②何…③沈…④谭… III. 微处理器-设计 IV. TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 153405 号

责任编辑:刘红梅 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 11 月第一次印刷 印张: 18 1/2

印数: 1—4 000 字数: 364 000

定 价: 44.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

• 阅读本书

微处理器设计虽然并不难,但是有时它也很难。随着处理器复杂度的提高以及处理器设计团队规模的扩大,设计工程师的工作已经变得更加专业化,只专注于设计流程中的一部分。设计流程中的每一步骤都有各自的专业知识。现在,在处理器设计团队中工作一点也不难,并且也不需要设计中和自己无关的各个方面都有清晰的了解。同样,大部分书籍只关注于处理器设计中的一个特定方面,通常不考虑前面和后面的步骤。本书的目的就是给出一个微处理器设计流程的整体描述,从处理器的原始规划开始,涵盖所有必需的步骤,一直到向客户发货。

在单单一本书里涵盖完整的设计流程,意味着只能涉及每个步骤中最重要的方面。书末给出处理设计的关键概念和术语,使读者能对每个步骤都有更多的了解。学生可以通过本书对设计有一个广泛的认识,然后决定哪方面是他们最感兴趣的、想要进一步探索的领域。已经从事设计工作的工程师可以认识到他们的专业是如何嵌在整体流程中的。非技术人员,如经理、商家或客户,可以了解到与他们共事的工程师用到的术语和概念。

本书按照微处理器设计的流程进行编写。前两章涵盖了设计真正开始之前所必需的概念。第1章讲述了晶体管及其发展是如何驱动微处理器设计的。第2章描述了一些其他的与处理器进行通信的部件。第3章从设计规划开始讲述处理器设计流程,后面的章节对每个所需的步骤进行一一介绍,一直到最终产品的发货。

处理器设计中的很多专业术语和缩写词在正文中进行了解释,但是在本书最后依然给出了术语表,以供参考。在阅读本书之后,微处理器设计就不会显得很难了。

• 处理器设计的未来

半导体工业的飞速发展使得对处理器设计未来的预测非常困难,但是有两个在未来几年里设计者必须解决的关键问题。

① 如何能充分利用不断增加的晶体管数量?

② 如何能将处理器设计得更加节能?

本行业有史以来,第一个问题一直是处理器设计者面对的最大的问题。截至2006年年底,市场上拥有最高晶体管数量的处理器包含的器件数超过了10亿。如果以现在的增长率继续增长,2015年之前会出现100亿器件的处理器,1000亿器件的处理器会于2025年之前出现。这些处理器会是什么样呢?对于如何使用更多的晶体管这一问题,最近有一种回答,就是将多个处理器核放在一个芯片上。这是否意味着,一个100亿晶体管的处理器仅仅是10个10亿晶体管处理器的组合?这的确是有可能的,但是,一个1000亿晶体管的处理器几乎不可能是一个有100个核的处理器。至少现在,大多数软件问题还不能分割成这么多独立的片段。也许会有新的方法涌现,但是

很有可能在未来的处理器中,核的数量更多地受限于软件,而不是硬件。

如果多数软件应用只能使用数量非常少的核,那么每个单核会包含数百亿的晶体管吗?今天的设计工具和方法还不足以完成这样一个处理器的设计。当处理器设计不再决定于生产制造的限制,而是决定于设计过程本身的限制时,才可能继续向前发展。也许,就像过去一样,处理器会吸收其他计算机部件的功能。带有几个通用目的处理器核的微处理器、图形处理器、存储控制器甚至存储器本身,都嵌在一个芯片内,这可以真正地充分利用大量的晶体管。也许,这种类型的真正的“片上系统”(system-on-a-chip)就是未来。过去,一直害怕再过几年制造技术方面的进步就要终结了。晶体管以当前的速度继续缩小在物理上是不可能的,但是到目前为止,每个关于缩小终结的预测都是错误的。现在,与生产制造方面的限制相比,新的软硬件设计方法论的问题对减缓处理器性能的提高更加具有威胁性。

第二个低功耗的关键问题最近已经受到了工业领域的高度重视。早期的低功耗处理器是简单的桌上型计算机的设计,为了省电而工作于较低的电压和频率。最近,便携计算产品的快速普及导致了大量低功耗概念的处理器设计的产生。由于高性能的桌上型计算机和服务处理器已经达到了功耗传递和制冷有效成本的极限,所以节能变得更加重要了。突然间,人们就开始对 100W 的服务器处理器和 1W 的嵌入式处理器进行低功耗的设计了。

工业界已经使用了大量的电路设计和一些生产制造技术来降低功耗,但是,我们几乎还不能迈入节能结构或微结构设计的门槛。诸如设计验证、测试和封装等问题应该如何支持功耗的降低?晶体管自身的设计应该如何改变?我们不仅要关心最大功耗,还要关心多种应用的平均功耗,这方面渐增的需求使这些问题变得更加复杂。每瓦特的性能很快变得比简单的性能更加重要,而我们的方法刚刚把这一点考虑进去。

讨论对这些问题的目的并不是为了这本书。时间会证明,本书未来的版本很有可能包括更多新问题及一些解决办法。同时,本书描述的方法是这些未来设计的基础。对整体设计流程有了了解,读者就可以问关于当前方法的问题了,而提问是寻找答案的第一步。

作者

致 谢 ◀◀◀

感谢 George Alfs、Elaine La Joie 和 Robert McFarland, 他们花了很多时间和精力审阅本书的草稿。感谢 Mark Louis, 他给了我在 Intel 教授课程的机会。还特别要感谢那些在课堂上向我提问的学生, 从学生和其他教师那里, 我学到了很多。

目 录 ◀◀◀

第 1 章 微处理器的发展历程	1
1.1 引 言	1
1.2 晶体管	2
1.3 集成电路	8
1.4 微处理器	10
1.5 摩尔定律	13
1.6 晶体管尺寸缩小	14
1.7 互连尺寸缩小	17
1.8 微处理器尺寸缩小	20
1.9 摩尔定律的未来	21
1.9.1 多阈值电压	22
1.9.2 绝缘体上硅	22
1.9.3 应力硅	23
1.9.4 高 K 值栅极电介质	23
1.9.5 改善的互连线	23
1.9.6 双栅极/三栅极	23
1.10 总 结	24
复习题	24
参考文献	25
 第 2 章 计算机部件	 27
2.1 引 言	27
2.2 总线标准	28
2.3 芯片组	29
2.4 处理器总线	32
2.5 主存储器	34
2.6 视频适配器(图形卡)	37
2.7 存储设备	39
2.8 扩展卡	40
2.9 外设总线	42
2.10 主 板	43
2.11 基本输入输出系统	46
2.12 存储器分层结构	47
2.13 总 结	51

复习题	52
参考文献	52
第 3 章 设计规划	53
3.1 引 言	53
3.2 处理器路标	55
3.3 设计类型和设计时间	59
3.4 产品成本	63
3.5 总 结	68
复习题	69
参考文献	69
第 4 章 计算机架构	71
4.1 引 言	71
4.2 指 令	73
4.3 计算指令	74
4.4 数据传输指令	77
4.5 流程控制指令	83
4.6 指令编码	85
4.7 CISC 与 RISC	87
4.8 RISC 与 EPIC	88
4.9 近期 x86 扩展	91
4.10 总 结	92
复习题	92
参考文献	93
第 5 章 微处理器架构	95
5.1 引 言	95
5.2 流水线	96
5.3 高性能设计	100
5.4 性能评估	102
5.5 微处理器架构的关键技术	106
5.5.1 缓存存储器	107
5.5.2 缓存一致性	110
5.5.3 分支预测	112
5.5.4 寄存器重命名	114
5.5.5 微指令和微码	115
5.5.6 重新排序、隐退以及重演	117

5.5.7 指令寿命	119
5.6 总 结	125
复习题	125
参考文献	126
第 6 章 逻辑设计	127
6.1 引 言	127
6.2 硬件描述语言	128
6.3 设计自动化	130
6.4 前硅验证	132
6.5 逻辑最小化	135
6.5.1 组合逻辑	135
6.5.2 卡诺图	137
6.5.3 时序逻辑	141
6.6 总 结	145
复习题	145
参考文献	146
第 7 章 电路设计	147
7.1 引 言	147
7.2 MOSFET 特性	148
7.3 CMOS 逻辑门	153
7.3.1 晶体管尺寸	156
7.3.2 时序逻辑	160
7.3.3 电路检查	163
7.3.4 时 序	163
7.3.5 噪 声	167
7.3.6 功 耗	171
7.4 总 结	173
复习题	174
参考文献	174
第 8 章 版 图	175
8.1 引 言	175
8.2 创建版图	176
8.3 版图密度	180
8.4 版图质量	185
8.5 总 结	190

复习题	191
参考文献	191
第 9 章 半导体制造	193
9.1 引 言	193
9.2 晶片制造	194
9.3 增 层	196
9.3.1 掺 杂	196
9.3.2 沉 积	199
9.3.3 热氧化	201
9.3.4 平坦化	202
9.4 光 刻	203
9.4.1 掩 膜	204
9.4.2 波长与光刻	206
9.5 刻 蚀	208
9.6 CMOS 工艺流程范例	210
9.7 总 结	219
复习题	221
参考文献	221
第 10 章 微处理器封装	223
10.1 引 言	223
10.2 封装层次	224
10.3 封装设计选择	227
10.3.1 引脚数量和引脚配置	227
10.3.2 引脚类型	228
10.3.3 衬底类型	230
10.3.4 芯片黏着	234
10.3.5 退耦电容	235
10.3.6 热阻抗	236
10.3.7 多芯片模型	238
10.4 组装流程实例	239
10.5 总 结	242
复习题	242
参考文献	243
第 11 章 硅片的调试和测试	245
11.1 引 言	245

11.2 可测性设计电路	246
11.3 流片后验证	250
11.4 验证平台和测试	251
11.5 漏洞的一生	252
11.6 硅片的调试	254
11.7 硅片的测试	259
11.8 总 结	261
复习题	262
参考文献	263
 术语表	 265

第 1 章 微处理器的发展历程

本章讲述晶体管的发展历程,描述晶体管演变成成为集成电路和微处理器的过程,以及按比例缩小是如何驱动微处理器的发展历程的。

► 学习目标

- 对 N 型和 P 型半导体进行描述。
- 了解二极管和晶体管的工作原理。
- 了解不同类型的晶体管之间的差别。
- 对摩尔定律和它的一些推论进行描述。
- 理解在集成电路中按比例缩小晶体管和连线时的限制。
- 对各种互连线的按比例缩小策略进行描述。
- 解释“前沿性微处理器”和“精简产品”之间的区别。
- 写出未来按比例缩小晶体管的可行的方向。

►► 1.1 引言

处理器是计算机的大脑。虽然其他元件可以协助计算机存储或调出数据以及输入或输出数据,但唯有处理器能够实施运算并对数据进行有用的操作。处理器决定着下一步在计算机里将会进行什么操作,并且指引着整个操作过程的进行。在早期的计算机里,处理器是由许多独立的元件组合而成的。不过,随着技术的发展,将处理器的所有元件集成到硅片上一个单一的小块中,或者是集成到一个单一的芯片中已经成为可能。这些集成电路就是微处理器。

如今,微处理器遍布于我们生活的每一个角落。用数百个或者数千个微处理器搭建起来的超级计算机被设计用来执行计算任务。即使是只有一个中央处理器的计算机也具有使用其他的处理器协助控制显示、网络交互、光盘的驱动以及其他一些功能。除此以外,还有一些我们并不将其归类为计算机的数以千计的产品在使用着的微处理器。如汽车、音响、移动电话、微波和洗衣机等都内嵌有微处理器。本书关注的重点是那些用来作为计算机的核心处理单元的最大规模和最复杂的微处理器的设计,处理器普遍存在的原因是它们能够提供多种不同功能的能力。

一些处理器芯片只能完成某一种特定的功能,而微处理器则能够运行程序。通过将处理器设计为可以以任意次序运行许多不同种类的指令,可以对处理器进行编程来运行任何当前所需要的功能。一般而言,处理器可以具有哪些用途,只受编程人员想象力的限制。这种适应性正是微处理器如此成功的一个关键所在,而另一个关键就是微处理器性能的稳步提升。

在过去的 30 年里,随着制造工艺的改进,微处理器的性能基本上每 2 年就能提高

1倍。对于绝大多数产品来说,它们只是被设计来运行某一种特定的功能,如此的性能提高是没有必要的。微波炉相对于传统烤炉的先进之处就在于它能更快地烹调食物,但是假如现在它被改进成不需要几分钟来加热食物,而是只要数秒呢?可能的确有这种需求,但是对微波炉实施进一步的改进,让它仅仅需要十分之几秒甚至百分之几秒来加热食物,有这种需求吗?

从某种观点上看,对于一个单一的任务,由于它的执行已经足够快了,再不断地提高它的性能就变得毫无意义。然而,处理器的适应性使我们可以通过对它进行编程来执行新的任务,从而持续地产生更多的性能。处理器所能做的就是运行软件,而不断提升的性能使更多的新软件可以在处理器上使用。那些原本需要花费很长时间才能完成的任务突然间可以在短时间内完成了。

假设从未更换过计算机上的软件,那么最有可能发生的事情是在某个时候它会变得足够地快。虽然在几分钟之内完成对一个完整、庞大的文件的语法检查是一种非常有用的特性,但是在几分钟之内完成一百次这样任务的能力却是过度且没有必要的。新的功能驱使着对性能的需求不断提高。人们有时候会说,他们的旧计算机变得太慢了,所以需要买一台新的。当然,这只是感觉的问题。他们的计算机速度和刚刚买回来时的速度完全相同,只是计算机上运行的软件不同了,所以感觉计算机变慢了。随着计算机性能的提升,新软件被开发出来,以便运行需要更高性能的新任务,所以当把最新的软件安装在已经有几年历史的计算机上时,确实会让它变得比较慢。

由于被设计成可以运行程序,所以微处理器拥有多种不同的功能,而性能的快速提升又持续地支持着新出现的功能。对新应用的不断需求促使制造工艺的提升改进,而制造工艺的提升改进又让性能的提升成为可能。

去除微处理器所能执行的这些功能之后,它只是一堆晶体管和电线的组合。设计微处理器的目的就是决定如何连接这些晶体管从而满足快速地执行运行程序的需求。随着处理器上晶体管的数目由数千个增加到百万量级,设计处理器的任务变得越来越复杂。但是,微处理器终归还是一堆晶体管的组合,作为计算机的大脑运行着。因此,关于微处理器的第一个故事也就是发明晶体管和集成电路的故事。

►► 1.2 晶体管

1940年,人们对半导体晶体做了很多实验,试图利用半导体来制成更好的二极管。二极管允许电流朝一个方向流动,却禁止另一个方向的电流。无线电通信和雷达接收器都需要二极管。精确雷达需要工作在高频下,而真空二极管虽然可以在高频下工作,但效果不好。作为替代品,人们使用了半导体晶体。在当时,虽然人们对于半导体晶体如何工作了解得很少,但普遍知道的是当一根金属针和某些半导体晶体的表面接触时可以形成一个二极管。这些像猫的胡须一样的二极管可以工作在高频下,但是非常不稳定。半导体晶体里有很多的缺陷和杂质,因此使用者需要随机地在晶体上尝试不同的点,直到找到一个可以工作的点。任何一点点振动都可能使整个设备失去效用。这个应用需要一个稳定而可靠的电源开关。

在AT&T[®]贝尔实验室,Russell Ohl研究一个半导体晶体时注意到一种非常奇妙

的现象:当这个半导体晶体暴露在光线下时,它会产生电流。这种效应在其他的晶体中也曾见过,但没有这么明显,而且一直无法解释清楚它的产生机制。Ohl更加仔细地检查过晶体后,在晶体中发现了一处裂缝,这是在制造晶体时形成的。这条裂缝导致晶体中的杂质非均匀地分布在裂缝的两边。

裂缝的一边分布着含有可以在晶体内自由移动的电子的杂质。他将这一边称为N型硅,因为它含有带负电荷的载流子。而另一边的晶体所含有的杂质则可以产生空位,这些空位是空的,但可以被电子占据,也称为空穴。当一个接一个电子移动并填补空穴时,这些空穴就可以在晶体内移动。就如同把车一辆接一辆地开进一个空的停车位时,停车位就开始移动起来一样。空穴就像是带着正电荷的载流子,因此 Ohl 称这一边的晶体为P型硅。由这两种类型的硅形成的结只允许电流朝一个方向流动,也就是说光所施加的能量可以产生只朝一个方向流动的电流。于是,单片的固态二极管被发明了。

如今,我们对于为什么某些杂质可以产生N型的半导体,而另外一些杂质可以产生P型的半导体以及结型二极管的工作原理已经有了更好的理解。世间万物都由原子组成,而所有的原子都包含有电子,所以任何物质都可以产生电流。任何见过雷暴的人都应该知道,只要有足够强的电场,即使是空气也可以产生庞大的电流。人们依据物质导通电流的难易程度对它们进行分类。像铜这类可以轻易地导通电流的物质被称为导体,而像玻璃这类难以导通电流的物质则被称为绝缘体。有一些物质,比如硅,在正常情况下是不容易导通电流的,然而只需要非常少量的杂质就能让它们成为好的导体,这些物质被称为半导体。这种特性来自电子能带和带间间隙(图 1.1)。

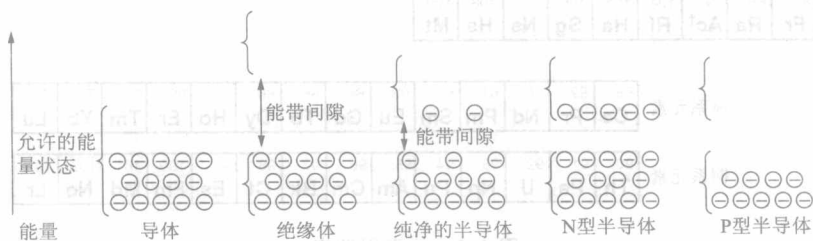


图 1.1 能带

量子理论告诉我们,电子只能处在有限数目的分立的能量等级上。任何非结晶态物质原子的间隙都是不均匀的,因此,各种物质的可能的量子态也各不相同。然而,在晶体内,原子的间隙是相同的,于是连续的可允许的能量状态形成了能带。在导体内,电子并没有完全填满这些能带,因此任何能量都可以促使它们在导体内部移动。

在绝缘体内,最低的能带,即价电子带是被电子完全填满的。与它相邻的是导带,导带内没有电子。两个能带之间有一个很大的能量间隙。因为在价电子带里没有任何空穴可供电子移动,而这些电子又没有足够的能量到达导带,所以没有电流流动。导带中有空穴,却没有任何电子来运载电流。

半导体的价电子带和导带之间的能带间隙很小。这意味着在室温下价电子带中

的小部分电子将会具有足够的能量到达导带。这些导带中的电子和由于它们的离开而在价电子带中留下的空穴,就可以在外界电场的影响下,自由地移动和运载电流。

在纯净的半导体中,自由载流子的数目很少,但通过在半导体中添加杂质可以极大地提高载流子的数量。如图 1.2 所示的元素周期表中,硅是第四族元素,即硅元素有四个可以和周围的原子相联结的外围电子。如果我们将一个第五族的元素,例如砷或者磷,添加到硅的晶体中,这些第五族元素的原子将会通过四个外围电子与周围的四个硅原子联结在一起,这样还剩余一个外围电子,这个电子就可以在导带里自由地移动,成为一个带负电荷的载流子。因此,在硅中添加第五族的元素可以产生 N 型硅。第三族的元素,例如硼,有三个外围电子,所以它们必然会在价电子带内产生空穴。这些空穴担当了带正电荷的载流子的角色。因此,在硅中添加第三族元素将会生成 P 型硅。清楚了 N 型和 P 型硅的原理,我们就能够理解 Ohl 阐述的 PN 结二极管的原理。

I																VIII																			
1																2																			
H																He																			
3	Li	4	Be													5	6	7	8	9	10														
11	Na	12	Mg													13	14	15	16	17	18														
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	57	La*	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89	Ac†	104	Rf	105	Ha	106	Sg	107	Ns	108	Hs	109	Mt																		

镧系元素														58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
														Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

锕系元素														90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
														Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

图 1.2 元素周期表

图 1.3 示出了一个结型二极管。P 型硅中含有带正电荷的载流子,而 N 型硅中含有带负电荷的载流子。当把一个正电压施加到二极管的 P 型硅一边,并且在 N 型硅一边施加一个负电压时,正电压将排斥带正电荷的载流子,而负电压会排斥带负电荷的载流子。在结形成的地方,从导带抽离出来的电子将会填补价电子带中的空穴,于是空穴和电子重新结合。与此同时,电压源驱使更多的自由电子进入 N 型硅一边,而通过移动电子又在 P 型硅一边制造出更多的空穴。随着这个过程的继续,电流流动起来。如果反置电压,负电压将会吸引空穴,而正电压会吸引电子。自由的载流子彼此分离开来,于是没有电流流过。因为结型二极管是由一片单一的硅片制成,所以它比早期的猫须二极管可靠得多,而且能够工作在比真空二极管高得多的频率下。

Ohl 的结型二极管让人们看到了用半导体来革新电子设备的曙光,但是当时所需

要的是一种能够像真空管一样可以作为开关或者放大器使用的半导体器件。1945年, William Shockley 开始负责贝尔实验室半导体方面的研究工作, 他的研究目标是研制出固态的放大器。Shockley 的计划是将一块金属板放置在半导体表面的附近, 但是不让它们互相接触, 以此控制半导体内流动的电流。他认为金属板发出的电场将能够在半导体内构建起一个电荷载流子的通道, 从而可以在半导体中导通比没有电场存在的情况下大很多的电流。这个计划听起来似乎不错, 但是当 Shockley 搭建起仪器验证他的理论时, 却没有奏效。即使是在金属板上施加 1000V 的电压, 他也无法测量到一丝一毫的放大效果。

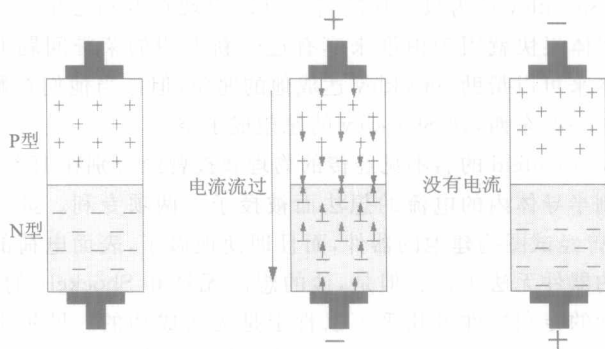


图 1.3 PN 结二极管

Shockley 将这个难题交给了其小组中的两位研究者。John Bardeen 是当时世界上少数几个对半导体的物理特性有着透彻理解的人之一, 而 Walter Brattain 则是一位非常有经验的实验人员, 他被誉为“可以构建任何东西的人”。他们两人开始进行实验以找出 Shockley 的“场效应”器件不能工作的原因, 慢慢发现问题的症结在于被困在半导体表面的电荷。如果在半导体的表面天生就形成了一小部分过剩的电子, 而这些电荷又不能在电场的影响下移动, 那么它们可能会阻止电场穿透表面并产生放大效应。Bardeen 和 Brattain 开始寻找一种方法来中和这些表面的电荷。他们尝试把半导体放置在不同的液体中, 并且作了一些改进, 却一直没有得到可用在足够高的频率下的足够的放大效果。

Bardeen 和 Brattain 在一块锗(另一种第四族半导体)的顶部生成了一层薄的氧化层。他们希望这层氧化层能够或多或少地中和表面的电荷。Brattain 仔细地清洗了晶体, 然后开始测试。刚开始时, 他没有得到一点有意义的结果。设备的反应就像是氧化层并不在那里一样。接着, Brattain 突然意识到自己在清洗晶体时已经无意中除掉了氧化层。锗的氧化层在水中是可溶解的。没有了这层氧化层, 他所生成的是许多在同一块半导体上的猫须二极管。虽然感到灰心, 但他还是继续对此设备进行实验, 结果惊奇地发现了二极管所显示的一些放大效应。他认为, 也许完全没有必要去中和表面电荷。

他们决定试着用两个猫须二极管在几乎同一个位置接触同一个半导体晶体。1947 年 12 月, 他们用一片金箔包裹一块三角形的塑料, 然后用剃须刀在三角的一端的

金箔上切了一刀。当把三角形的这一端与一块锗晶体接触时,就制成了两个猫须二极管。他们发现从一个二极管发送到半导体内的电子被另一个二极管收集了起来。在晶体基极施加的电压可以增强或者减弱这种效应,这样他们所制成的设备就可以放大半导体基极上的信号。因为通过一个控制可以改变发射极和集电极之间的电阻,于是稍后他们决定将这种设备命名为转移电阻器或晶体管。

显而易见,晶体管将是一个非常重要的发明,因此贝尔实验室立刻着手申请专利。Shockley认为Bardeen和Brattain的成功应该归功于他的场效应概念,而贝尔实验室应该书写一份包含他的场效应概念和这个新发明的晶体管的专利文档。而且,作为这个团体的领导者,Shockley认为只有他的名字可以出现在专利之中。本来和睦相处的Shockley的研究团体很快就因为由谁来享有这个新发明的荣誉问题而分崩离析。贝尔实验室的律师本来可以帮助Shockley达成他的愿望,但是当他们在翻阅以往记录在案的专利时发现了一些东西,让Shockley的愿望成了空。

一个叫Julius Lilienfeld的名不见经传的物理教授曾经分别在1930年和1933年由于通过电场来控制半导体内的电流的想法而被授予了两项专利。虽然并没有任何记录表明Lilienfeld曾经试图构建他的器件,而且即使他做了,表面电荷的问题也几乎毫无疑问地会让他的器件无法工作。但是,他的想法无疑和Shockley的想法如出一辙。申请场效应晶体管的专利这件事几乎可以肯定是无法成功的。贝尔实验室的律师决定为Bardeen和Brattain书写一份稍微窄范围的专利申请,将内容局限在与Shockley的原理不同的点接触晶体管上。最终名为“使用半导体材料的三电极的电路元件”,专利号为2524035的专利只将Bardeen和Brattain列为发明者。

Shockley认为Bardeen和Brattain抢走了本属于他的荣誉,于是他开始独立地进行研究工作,试图发明一种新的更好的晶体管。点接触晶体管和猫须二极管存在着同样的问题。因为点接触晶体管要求两条金属线刚刚接触在半导体的表面,因此它非常不稳定,而且难于持续地再生产。Shockley推论,如果一个晶体管可以由共享同一个电极的两个猫须二极管构成,他可能就能用共享一个电极的两个结型二极管制造出一个晶体管。

他开始着手进行工作来验证这个结型晶体管理论,但他没有告诉贝尔实验室的任何人,直到1948年2月,他对点接触晶体管所做的实验表明带电荷的载流子可以在半导体衬底内移动,而不像Bardeen和Brattain所假设的那样只能在半导体的表面移动,Shockley知道这将会是他所构思的晶体管可以工作的证据,他才向他的团队描述了这个构思。Bardeen和Brattain当然明确地意识到Shockley琢磨这个想法已经很久了,而且故意将他们蒙在鼓里。1948年6月,尽管并没有一个可工作的原型,贝尔实验室还是为结型晶体管申请了一个专利,在这个专利里只列出了Shockley的名字。而Bardeen和Brattain再也不会与Shockley有效地合作了。

在Shockley的指导下,Morgan Sparks于1949年构建了第一个可以工作的结型晶体管。到1950年,Sparks和Gordan Teal对他们的技术已经进行了很多改进。在之前的两年,Teal一直致力于用纯净的晶体来制造半导体器件。那时使用的“晶体”事实上只是很多个有着各自不同取向的晶体的混合物,其中还有许多非晶体缺陷。Teal制造