

TURING

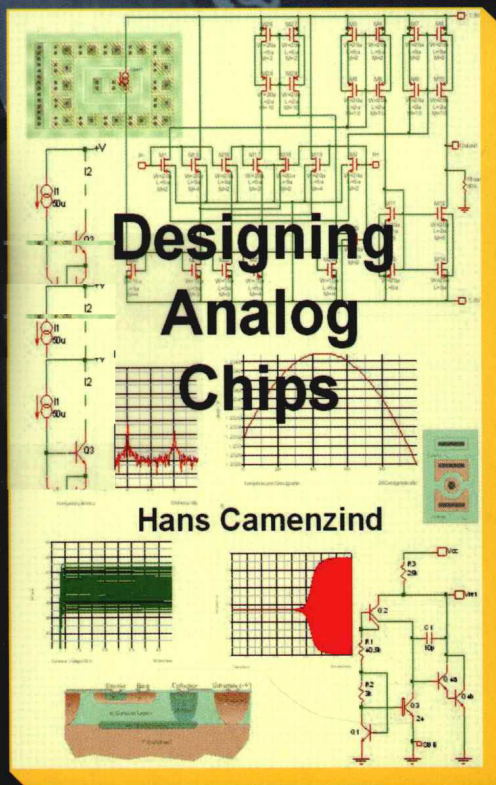
图灵电子与电气工程丛书

模拟集成电路设计的艺术

Designing Analog Chips

[瑞士] Hans Camenzind 著

白煜 李锵 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

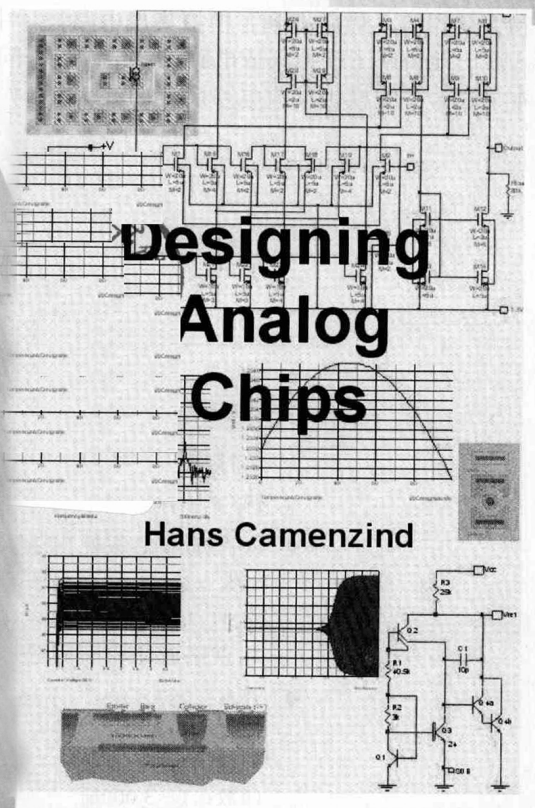
TURING

图灵电子与电气工程丛书

模拟集成电路设计的艺术

Designing Analog Chips

[瑞士] Hans Camenzind 著
白煜 李铨 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

模拟集成电路设计的艺术 / (瑞士) 克马恩齐恩德
(Camenzind, H.) 著; 白煜等译. — 北京: 人民邮电出版社, 2010. 11

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Designing Analog Chips

ISBN 978-7-115-23988-4

I. ①模… II. ①克… ②白… III. ①模拟集成电路—电路设计 IV. ①TN431.102

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189046号

内 容 提 要

本书主要讲述了模拟集成电路设计的相关问题。全书从模拟集成电路设计所需的基本器件开始, 先简要介绍了各个器件的属性和发展历程, 接着讲述了模拟设计中重要的一步——仿真。后面一一讲解了模拟集成电路设计中重要的单元模块, 包括电流镜、电流源、带隙参考电路、运算放大器、比较器、计时器和振荡器等, 最后提到了模拟集成电路设计中的布局问题。全书内容简明扼要, 利用层层推进的方式深入浅出地讲解了模拟集成电路设计中的各个问题。

本书适合各类模拟集成电路设计人员, 也可作为模拟集成电路设计方面的教材和参考书。

图灵电子与电气工程丛书 模拟集成电路设计的艺术

-
- ◆ 著 [瑞士] Hans.Camenzind
 - 译 白煜 李镡等
 - 责任编辑 王军花
 - 执行编辑 李胜华

 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京铭成印刷有限公司印刷

 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 13.5
 - 字数: 329千字 2010年11月第1版
 - 印数: 1-3 000册 2010年11月北京第1次印刷

 - 著作权合同登记号 图字: 01-2008-4084号

ISBN 978-7-115-23988-4

定价: 39.00元

读者服务热线: (010)51095186 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

版 权 声 明

© POSTS & TELECOM PRESS 2010. Authorized translation of the English Edition © 2004, 2005 Hans Camenzind, *Designing Analog Chips*. This translation is published and sold by permission of Hans Camenzind, the owner of all rights to publish and sell the same.

本书中文版由 Hans Camenzind 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有，侵权必究。

模拟世界

“任何事物都在向着数字化的方向发展”，手机、电视、视频光盘、助听器、电视控制器、音频放大器、玩具、打印机等你能拥有的东西都是数字化的。

模拟设计已经过时了，或者说不久后就会过时了，相当多的人是这样认为的。

PC的诞生似乎已经预示着模拟设计马上就要消亡，但模拟电路至今仍在广泛应用。不仅如此，模拟集成电路也保持着与数字集成电路近乎相同的发展速度。与（模拟）录像机相比，DVD播放器中包含的模拟电路更多。

对于这一问题的解释相当简单：世界本身就是模拟的。听觉是模拟的，视觉、味觉、触觉、嗅觉等均是模拟的，垂直与水平方向的运动也是模拟的。发电机、电机、扬声器、麦克风、螺线管、电池、天线、照明灯、LED、激光二极管、传感器等从本质上说都是模拟器件。

数字化革命是构建在模拟世界的基础上的，这一事实毋庸置疑。人们总会在不同程度上、以不同的方式进出于数字系统，并与现实世界交换信息。

遗憾的是，数字系统的优势与魅力已经对模拟系统构成威胁。学校培养的模拟系统设计人员数量稀少，形成空白，从而使得数字系统设计工程师常常作出损害模拟系统性能的决定。

在集成电路中，对更高数字速率的永无止境的追求已经导致供电电压不断降低，这对于高性能模拟电路设计而言是非常不利的。对于350 nm (3.3 V) 工艺而言，虽然5 V电压更好，但对高性能模拟设计仍然存在足够的动态范围。对于180 nm (1.8 V) 而言，这项设计就会变得既复杂又耗时，而且性能也开始下降。对于120 nm (1.2 V)，即使降低性能，模拟设计也变得相当困难。对于90 nm工艺而言，模拟设计几乎变得不可能。

“混合信号”处理技术据称可将数字电路和模拟电路设计在同一芯片上。例如，采用180 nm工艺可以制造出能在较高供电电压（如3 V）下工作的器件。虽然这种附加功能会受到欢迎（即使是微不足道的欢迎），但其设计数据（即模型）通常是不充分的，而且是面向数字设计的。

正是上述原因构成了出版本书的动机。该书将全面介绍模拟集成电路设计知识，从而使读者能够判断哪类模拟电路功能能够实现集成；哪类不能实现集成；哪类模拟电路功能应该进行集成，哪类不应该进行集成；以及哪些模拟电路应该与数字电路设计在同一块芯片上，哪些模拟电路应该与数字电路隔离开。同样重要的是，本书能够帮助读者提出正确的问题，从而使自己设计的芯片能够正常工作。这也是作者的首次尝试。

* * *

读者会发现，几乎所有的模拟集成电路都包含大量可识别的电路单元，即包含少量晶体管的功能模块。这些电路单元是非常有用的，因此在不同的设计中重复出现。所以有必要首先详细了解一下诸如电流镜、复合晶体管、微分单元、共源共栅（共发共基）电路、有源负载、达

林顿电桥或电流源的知识，之后再研究怎样将这些电路单元组合起来构成完整的功能。

* * *

有关集成电路设计的教材通常会介绍大量的数学知识，理解基本原理固然重要，但计算每个设计的细节却很浪费时间。用仿真器完成这些烦琐的运算，会比人工计算做得更好更快。通过仿真器分析在几秒钟内就可以得出你的设计路径是否正确以及所设计电路的性能是否良好。如果你已经掌握了元件模型以及功能强大的仿真器，那么就可以通过仿真分析学到比书本中的文字和图表所能表达的更多的器件和电路方面的知识。

目 录

第 1 章 器件	1	第 4 章 优质差分对	49
1.1 半导体	1	第 5 章 电流源	57
1.2 二极管	3	5.1 双极型晶体管电流源	57
1.3 (双极型) 晶体管	5	5.2 CMOS 电流源	63
1.4 集成电路	9	5.3 理想电流源	64
1.5 横向 PNP 晶体管实例	16	第 6 章 超时: 模拟测量	65
1.6 CMOS 晶体管	17	6.1 分贝	65
1.7 衬底 PNP 晶体管	20	6.2 均方根值	66
1.8 二极管	20	6.3 噪声	67
1.9 齐纳 (Zener) 二极管	21	6.4 傅里叶分析与失真	68
1.10 电阻器	21	6.5 频率补偿	71
1.11 电容器	23	第 7 章 带隙参考	77
1.12 其他工艺	24	7.1 低电压带隙参考电路	86
1.13 CMOS 工艺与双极型工艺比较	25	7.2 CMOS 带隙参考	87
第 2 章 仿真	26	第 8 章 运算放大器	90
2.1 你可以仿真什么	26	8.1 双极型运算放大器	90
2.1.1 直流分析	26	8.2 CMOS 运算放大器	97
2.1.2 交流分析	28	8.3 自动归零运算放大器	102
2.1.3 瞬态分析	29	第 9 章 比较器	105
2.2 波动的重要问题	31	第 10 章 跨导放大器	111
2.3 模型	32	第 11 章 计时器与振荡器	118
2.3.1 二极管模型	32	11.1 振荡器仿真	130
2.3.2 双极型晶体管模型	34	11.2 LC 振荡器	130
2.3.3 横向 PNP 型晶体管模型	36	11.3 晶体振荡器	132
2.3.4 MOS 晶体管模型	37	第 12 章 锁相环	135
2.3.5 电阻器模型	38	第 13 章 滤波器	142
2.3.6 电容器模型	39	13.1 有源滤波器: 低通	142
2.3.7 焊盘与引脚	39		
2.3.8 一个模型有多精确	39		
第 3 章 电流镜	41		

13.2	高通滤波器	147	16.4	整流器和平均电路	187
13.3	带通滤波器	148	16.5	温度计	191
13.4	开关电容滤波器	149	16.6	过零检测器	192
第 14 章	电源	152	第 17 章	布局	194
14.1	线性稳压器	152	17.1	双极型晶体管	194
14.2	低压差稳压器	154	17.2	横向 PNP 晶体管	197
14.3	开关稳压器	159	17.3	电阻	197
14.4	线性功率放大器	164	17.4	CMOS 三极管	198
14.5	开关功率放大器	166	17.5	穿接	200
第 15 章	数模转换器和模数转换器	172	17.6	开尔文连接	201
15.1	数模转换器	172	17.7	金属连线和接地	201
15.2	模数转换器	177	17.8	背减薄和镀金	202
15.3	Δ - Σ 转换器	178	17.9	设计规则检查和版图与电路图 一致性比较	202
第 16 章	拾遗	181	参考文献	203	
16.1	吉尔伯特单元	181	索引	206	
16.2	乘法器	183			
16.3	峰值检测器	185			

第 1 章 器 件

假设你所设计的集成电路需要一个运算放大器（以下简称“运放”），你会使用哪种类型的运放呢？如果查阅线性集成电路供应商提供的数据手册，你会发现有数以百计的运算放大器可供选择。有些功耗低，但速度慢。而有些相当复杂，但具有轨到轨（rail-to-rail）输入和输出功能。有些运放的输入对于低偏置电压是经过出厂校准的，有些的输出对于高电流是经过出厂校准的，还有些运放的设计是针对单供电电压、快速器件的，等等。

对于模拟模块存在一个固有的问题：不存在理想的设计，仅存在对于特定应用最优的结构配置。假定存在这样一个模块库，可以从中抽取各种各样的模拟模块，并将其应用到自己的设计中，那么你会惊奇地发现：这个模块库将非常庞大，几乎包含了各种数据手册上列出的放大器（及其他所有线性功能元件）。如果不存在这样的模块库，你所设计的集成电路必定不及由若干独立的集成电路构成的电路。

总之，不存在标准的模拟单元。如果你的应用要求不是很高，则可以自行修改已经成型的模块或者设计新的电路。无论哪种情况，都需要自己完成器件级的设计工作，即将晶体管、电阻器和微小电容连接起来。

为了完成这项工作，你必须知道哪些器件可以用以及这些器件的局限性是什么。但是，最重要的是必须详细掌握器件的特性。学习复杂技术的最容易的途径就是研究其发现的过程，将从前人（该领域的先驱者）那里学到的知识用前人揭示它们的方式将其揭示出来。

1.1 半导体

1874 年，德国莱比锡一位 24 岁的青年教师费迪南德·布劳恩（Ferdinand Braun）发表了一篇堪称具有革命性的论文：他发现某些材料不遵循欧姆定律。在方铅矿石（亚硫酸铅，铅矿的主要成分）及其他自然形成的亚硫酸盐晶体表面上，他按下弹簧金属片的末端，观察到通过该装置的电流取决于电源电压的极性。更令人费解的是，在导电性更好的方向，电阻值随电流的增加而减小。

布劳恩（后来他发明了阴极射线管）当时所发现的，正是我们现在所说的二极管，或是整流管。它的效果并不好，前向电流和反向电流之间仅相差 30%，并没有实际应用价值。布劳恩无法解释这一现象，当时所有人都不能解释这一现象。

1879 年，约翰霍普金斯大学（Johns Hopkins University）的埃德温·霍尔（Edwin Hall）发现了后来被称为霍尔效应的一种现象：当将磁场通过一片金属时，通过金属的电流会发生偏移。在他试验的所有金属中，电流均偏向同一侧，他非常欣慰地认识到，这恰恰证实了电子是带负电荷的。

但是，奇怪的事接着发生了，在某些材料中电流的偏移转向另一侧。或许那些材料中存在带正电荷的电子？

直到1904年，相关研究才取得一定的进展。无线电的出现需要一台“探测器”实现信号检测。信号经过幅度调制后，为使音乐或语音信号再次变为可以听到的信号，需对无线电频率进行整流（即取平均）。因此，布劳恩三十年前发现的金属接触方铅矿石（其他很多材料也具有类似的特性，如金刚砂、碲和硅）产生的“奇怪的行为”得到了实际应用。这样的器件被称为“猫的胡须（触须）”，实际上其效果并不好，必须在晶体上试验若干个触点才能找到一个产生足够高声音的点。

这种器件随即就被真空管所取代，真空管不仅能够实现整流功能，而且能够很好地放大信号。因此，半导体整流器（即二极管）很快就落伍了。

直到1927年，出现了另一项实际的应用：大面积整流器。这些复杂、笨重的装置使用氧化铜（后来使用硒）从线电压中产生直流电，主要用于给汽车电池充电。但到目前为止，仍未搞明白这些器件是如何工作的。

在这种背景下，虽然半导体工业还没有形成，但在很多大学和大公司的实验室里，一些研究仍在进行。1931年，A. H. 威尔逊（A. H. Wilson）提出了完整的能带模型：电子仅存在于离散能级，位于高能带电子的能量高于位于低能带电子的能量；在同一能级上只能有两个电子，但其旋转方向相反；最后一个能级（即最高能级）上是价电子，与距离其最远的电子之间存在一个能量间隙，即传导带；一旦电子到达最高能级，该电子就会在电场中加速，从而实现电传导。

这个理论非常好，但研究人员却花费了15年的时间才将其与二极管联系起来。

有两个问题掩盖了实际的半导体效应。首先，当时观察到的所有现象均为表面效应。触须采用了金属线、铜氧化物和硒整流器金属板。现在，这种触须被认为是一种相当特殊的结构，仅在肖特基二极管中存在。其次，半导体绝对不是一种纯净物，它所包含的各种元素和分子相互抵消才产生了这种特性。

随着第二次世界大战的爆发，雷达出现了。为了得到足够的精度，雷达需要工作在很高的频率。而真空管速度太慢，于是被人遗忘的“触须”再次受到关注（紧接在天线后对电波进行整流，从而与本地晶振器信号实现混频，并产生真空管可以处理的低频信号）。

这次世界范围的紧急状况成为相关科学研究的驱动器，很多研究团队获得了大量的研究基金。他们从“触须”着手开始研究，试图确定导致其变幻无常和不可靠的原因。研究很快表明，需要更加纯净的材料，并且这种材料应该是单晶体。当将晶体的一部分加热到熔点附近时，移动被加热区域，则外部材料会跟随其移动。至此研究人员认识到这些杂质实际上是产生二极管效应所必需的，并且所有这些杂质都位于元素周期表中的某一特定区域。

硅和锗均为四价元素。化合价仅仅意味着在电子轨道的最外层有4个电子。例如，硅的元素号是14，也就是说它一共有14个电子。第一层轨道（即能级）有两个电子，第二层轨道有8个电子，第三层轨道有4个电子。

不同原子的最外层轨道是相互连接的，并且该轨道中的电子不属于某一个特定的原子，它们在各轨道之间运动。正是这种电子的共享将不同的原子连接起来。电子这种在原子之间运动的能力也是电传导的基础：在导体中，电子无时不在漫游，并且很容易在电场的作用下运动，

然而，在绝缘体中，电子基本上是停留在原子核附近。

在电学上，纯净硅不大受到关注，它是绝缘体，但绝缘性不是很好。可是当加入适当的杂质或掺杂剂后，情形就大不相同了。

在元素周期表中，与硅紧挨着的右侧元素是磷，元素号为 15。与硅一样，其第一层轨道也有两个电子，第二层轨道有 8 个电子，但是其第三层轨道有 5 个电子。下面假定我们可以从一块硅中抽出一个硅原子，用一个磷原子代替这一空位置。该新原子的 4 个价电子就会与硅电子一起旋转，但第 5 个电子则无法嵌入。这个剩余电子就会产生负电荷，此时的硅就是我们现在所称的 N 型构架。

剩余电子的引入不同于静态电荷。梳头时，头发会直立起来，这只是暂时转移了一些电子。对硅进行“掺杂”处理后，所产生的电荷则是永久的，已经嵌入在晶格中（但不会变成电池）。

类似地，在元素周期表中，与硅紧挨着的左上方元素是硼，元素号为 5。其第一层轨道有两个电子，第二层轨道有 3 个电子，原子价为 3。如果用一个硼原子取代一个硅原子，就会缺失一个电子，从而产生一个正电荷，即 P 型材料。由于 N 型硅中存在一个剩余电子，所以可以施加一个电场，从而产生电流，但是实际的效果是空穴的运动，而不是电子的运动。这就是造成霍尔效应中偏向错误方向的原因。

理解掺杂半导体中的这种空穴和电子运动的机制是非常重要的。在 N 型材料中，剩余的磷电子游移到相邻的硅电子轨道上，并且取而代之。这个被取代的电子进入另一个原子的轨道，如此进行下去，直到最后一个电子进入起始磷电子的轨道。

这种永无休止的抢座位游戏（以接近光速的速度进行）在很大程度上取决于温度。在绝对零度是不存在运动的。大约 -60°C 时，这种运动在硅中足以引起半导体效应。大约 200°C 时，硅中电子的频繁运动，实际上使硅变为导体。仅在相当窄的温度范围内，大约 -50°C 到 150°C ，硅才是有用的半导体。

在 P 型材料中，这种运动从与硼原子相邻的硅原子中的一个电子开始。这个电子先填补硼原子中的空穴，然后自身被另一个电子取代，如此下去，直到第一个电子再次从硼原子离开。这种运动是由电子完成的，但实际效果是一个空穴的运动。

当电场存在时，运动朝一个方向进行：电子流向正极，其位置被其他从负极流出的电子所取代。

令人吃惊的是，仅需要非常少的杂质就可以构成 N 型材料或 P 型材料。每立方厘米硅中有 5×10^{22} 个原子，仅需掺杂 5×10^{15} 个硼原子或磷原子，也就是说每一千万个硅原子仅需要一个掺杂剂原子。由此可见，研究人员花费如此长时间才发现半导体效应的真正本质就不足为奇了。实际上，各种杂质所占的比率远远大于千万分之一。

1.2 二极管

掺有杂质的硅依然无法引起人们的兴趣，因为它不是一个良好的导体，而作为电阻器的性能又不及金属薄膜甚至不如碳。但是，如果同一硅晶体同时具有 N 型原子和 P 型原子，情况就大不相同了。

根据异性电荷相吸的原理，N 型区域边缘附近的剩余电子就会运动到 P 型材料区域，并停

留在那里。一个电子填充一个空穴，电荷就会相互抵消。

这种情况仅发生在一个电子（或空穴）能够游移到的短距离范围内，相应的区域被称为空间电荷层或耗尽区（depletion region），如图 1-1 所示。

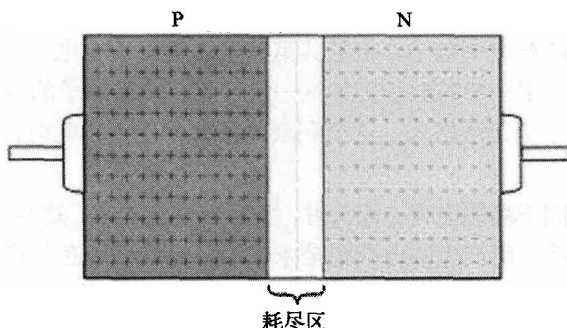


图 1-1 P 掺杂半导体区域与 N 掺杂半导体区域之间形成的耗尽区

下面假定在两端加一个电压，如果 P 型区连接电源的负极，N 型区连接电源的正极，就会推动电荷相互远离，从而扩大了耗尽区。

但是，如果 P 型区连接电源的正极，N 型区连接电源的负极，电荷就会随着电压的升高而逐渐聚集在一起。距离越近就会迫使更多的电子和空穴通过耗尽区。这一效应呈指数规律变化：电压为 0.3 V（室温）时，仅产生很小的电流；电压为 0.6 V 时，电流就相当大了；而电压为 0.9 V 时，电流就更大了。

二极管电压的公式如下：

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_s} \quad \text{或} \quad I_1 = I_s \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{kT}} - 1 \right)$$

其中， V_d = 二极管两端的电压

k = 玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

T = 单位为开尔文的绝对温度

q = 电荷大小 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)

I_1 = 流过二极管的实际电流

I_s = 扩散电流

扩散电流 I_s 取决于 N 型区和 P 型区杂质的掺杂程度、二极管的截面积以及（在很大程度上取决于）温度。一个几何尺寸较小的集成电路二极管的适当初始电流为 $I_s = 1 \times 10^{-16}$ 。

公式中忽略了一些情况，可以施加的反向电压是有限制的。与任何绝缘体的击穿电压相似，存在一个临界点，当电场变得过大时，带有相反极性的电荷就会冲向对方。这个击穿电压（breakdown voltage）取决于掺入杂质的浓度：掺杂浓度越高，击穿电压就越低。

击穿电压高是有代价的。随着杂质浓度的降低，耗尽层变大，更高的电压还会使其变得更深。在设计中必须考虑这一距离的影响。

半导体结中带有相反极性的电荷与电容器极板上的电荷没有任何区别。因此每个结都有一个电容，但由于电子与空穴之间的距离随着施加电压的大小而变化，使得该电容成为压控电容。电压越低，电容值越高，并且一直向上增加。

最后, 在半导体材料中存在未被耗尽区吸纳的电阻。对于典型的掺杂浓度 5×10^{15} (每立方厘米内的原子数, 此时集成电路中实际的击穿电压大约为 25 V), 磷的电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ (N 型), 硼的电阻率为 $3 \Omega \cdot \text{cm}$ (P 型)。为便于比较, 这里给出铝的电阻率为 $2.8 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 铜的电阻率为 $1.7 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。电阻率 (ρ 或 ρ) 是以边长 (长、宽、高) 为 1 cm (10 mm) 的立方体材料的两个相对面来测量的:

$$\rho = \frac{R \cdot w \cdot h}{l} = \frac{\Omega \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}}{\text{cm}} = \Omega \cdot \text{cm} (\text{或 } \Omega\text{-cm})$$

1.3 (双极型) 晶体管

在首次对半导体二极管开展正式研究的时候, 位于美国新泽西州的贝尔实验室就已经世界闻名了。吸引了最知名的科学家, 而在这些科学家中, 比尔·肖克莱 (Bill Shockley) 就是十分出众的一位。1938 年, 肖克莱与沃特·布拉顿 (Walter Brattain) 联手共同研究半导体。

耗尽层激起了肖克莱的兴趣, 它与真空二极管有些许的相似性。肖克莱发现, 如果能在这一区域中加入栅极, 就有可能控制铜氧化物整流器中的电流大小, 从而创造真空三极管的固态等价电路。肖克莱将其想法与布拉顿交流, 布拉顿感到很高兴, 他也曾经有过同样的想法, 甚至还计算出了这种栅极的尺寸, 得到的结果是栅极太小, 不切实际。肖克莱以各种方式进行了试验, 但仍未将其实现。由此证明布拉顿是对的。

然而, 肖克莱不是一个容易被击败的人。他调整了自己的想法, 并提出了另一种不同的操作方法。他提出, 既然数量相对少的电子或空穴是导致半导体导电的原因, 并且它们都带有一个电荷, 这样就可以在表面附近设置一个金属电极, 对其施加电压, 从而就可以使电荷向表面运动或背离表面运动。因此, 他认为表面附近区域的导电性可以随意改变。他试验了这个想法, 但仍然行不通。这个想法与现在的 MOS 晶体管相同。

工作暂时停止了, 肖克莱和布拉顿两个人都在战争中被分配了其他项目。但是, 到了 1945 年, 肖克莱被选为一个固态物理学课题团队的副主管, 布拉顿也是该团队中的一员, 当时肖克莱 35 岁, 布拉顿 43 岁。肖克莱并没有放弃对硅、锗提纯工作进展的关注, 他决定在放大器件中再次试验他的想法, 该元件有一个硅薄膜衬底, 顶部为一个绝缘控制电极。无论在控制电极上施加什么样的电压, 这个元件仍然不工作, 通过硅薄膜上的电流并没有可识别的变化。肖克莱感到很困惑, 因为根据他的计算, 应该出现很大的电流变化。但即使有变化, 结果也仅是理论预测值的至少 1/1500。

这时, 37 岁的约翰·巴丁 (John Bardeen) 加入了肖克莱的课题团队。他仔细研究了肖克莱失败的实验, 并用心琢磨了几个月。1946 年 3 月, 他给出了实验失败的解释: 正是硅的表面掩盖了实验效果。硅停止运转时, 4 个价电子不再由相邻的原子有序地连起来。巴丁正确地预测到它们中有一些被悬置起来, 从而形成表面电荷 (即电压), 阻碍了任何施加在外部控制电极上的电压。

根据这一理论上的突破, 课题团队立即决定改变主攻方向: 他们决定研究半导体表面的基本特性, 并暂时放弃制造新器件。这是一项漫长而艰苦的研究工作, 花费了一年多的时间。1947 年 11 月 17 日, 团队的另一位成员物理化学家罗伯特·B.基尼 (Robert B. Gibney) 建议采用电

解液抵消表面电荷。11 月 20 日，他与布拉顿共同撰写了一份关于放大器件的专利申请书，该放大器件正是肖克莱曾经试验过的，但他们在表面使用了电解液。之后他们回到实验室做了一个这样的放大器件，所采用的电解液是用锤子和钉子从电解电容器中提取出来的。该器件工作了，电解液完全按照基尼预想的那样起作用了。

但是，虽然这个“场效应”器件可以放大，可速度却非常慢，只能放大频率不超过 8 Hz 的信号。布拉顿和巴丁怀疑是电解液降低了器件的速度，于是在 1947 年 12 月 16 日，他们试验了另一种不同的方法：在绝缘氧化物的顶端，将中间带有小孔的金斑点蒸发到锗上。这种想法就是在中间位置放置一个锐利的触点，但不接触金环，从而使该触点与锗相接触，而绝缘金环就是为了保护表面。这是他们第一次制造出具有放大功能的器件。

该器件只有一件事情不对：放大器并不能按预想的那样工作，控制端的正电压增加了流过该器件的电流，但根据他们的理论这个电流应该减小。巴丁和布拉顿研究发现在蒸发金之前，意外地将氧化物洗掉了，从而使得金与锗接触。因此，他们观察到的完全是不同的效果，即通过点接触进行载流子注射。他们意识到，为了使这样的器件能有效工作，位于表面的两个接触点之间的距离必须非常小。于是，他们又蒸发了一个新的金斑点，用刀片将其分为两部分，并在顶端放置了两个点接触。这样，该器件就能更好地工作了，1947 年 12 月 23 日，他们向贝尔实验室的管理层演示了这一结果。

贝尔实验室将这一突破保密了半年。1948 年 7 月 25 日，巴丁和巴拉顿发表了一篇论文，并于 7 月 30 日在纽约举行了一个新闻发布会。这一发布并没有引起重视，《纽约时报》仅在第 46 页用几行字进行了报道。

肖克莱对这件事的转变感到非常失望，他并没有成为最终突破者之一。但他意识到，虽然已经有了能够工作的器件，但这场竞争仍未结束。课题团队中还没有一个人真正精确地理解晶体管是如何工作的。因此，1948 年 1 月上旬，肖克莱静下心来试图弄明白在这两个点接触之间究竟发生了什么。在这个过程中，他提出了一种更好的结构：结型晶体管。

直至今日，这依然是一个天才的分析。在双极型晶体管中，基极与发射极之间存在电流，这正是一个二极管。电子从发射极流向基极（之所以这样命名，是因为在最初的点接触晶体管中，基极占据了大部分体积）。由于基极是 P 型掺杂的，因此这些电子是基极中的少数载流子（所以被称为双极性晶体管——需要两极的载流子才能产生这样的效果），其中有一些能够到达基极。但是，如果基极是轻掺杂的并且非常薄，它们中的大多数在与基极中的空穴重新组合之前，就被集电极的正电压吸引走了，如图 1-2 所示。对于一个性能良好的晶体管，会有 100 甚至 500 个电子偏向集电极而只有一个会到达基极。因此电流增益能达到 100 甚至 500。

双极型晶体管是一种奇特的放大器，非线性很强并且使用起来有点困难。如果只考虑输入端与基极的话，它是一个二极管（相对于发射极而言），为了使电流通过，至少需要将其电压提高到 0.6 V（室温下）。从这点来看，基极和集电极中的电流都是以指数形式增加的。这不是一线性电压放大器，只是电流（或多或少地）存在线性关系，如图 1-3 所示。

同时也要注意，发射极电流总比集电极电流大，因为发射极电流包括了集电极电流和基极电流。

我们已经介绍了 NPN 型晶体管。如果颠倒掺杂方式和电压极性，就会得到 PNP 型晶体管。与 NPN 型晶体管相比，它们的工作方式基本上相同，但有一些小的缺陷：速度慢，增益小；空

穴，也就是现在基极中的少数载流子与电子一样均不运动。

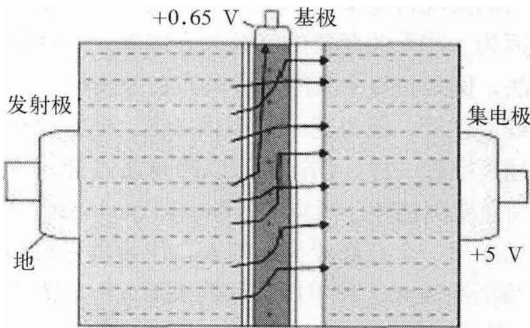


图 1-2 流向 NPN 型晶体管基极的电子在基极非常薄时，绝大多数被集电极的正电压所吸引

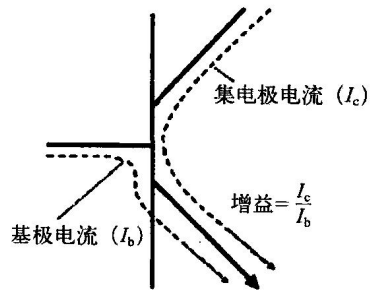


图 1-3 NPN 型晶体管的电流与增益

点接触晶体管对于制造商来说是场噩梦，其可靠性非常差。并且，制造这些器件的材料是锗，其可用温度带范围非常有限。这种结型晶体管是通过在锗或硅片两侧用掺杂物材料铸接而成的。将基极做得薄而均匀是非常困难的，并且这个过程会产生相当大的漏电流。

下一步的重大发明仍然是由贝尔实验室完成的：扩散。在室温下，虽然空气静止不动，但依然会混合。这是由于各原子或分子在吸收温度带来的能量后，会产生随机游移。温度越高，这种随机运动就越显著，混合或者扩散也越显著。如果温度足够高（例如，超过 1000 摄氏度），空气甚至会扩散到固体材料中，虽然扩散速度会大大地降低。例如，在高温炉中，接触 N 型杂质（气体）原子的硅的表面就会形成 N 型杂质层，其厚度即杂质渗透的深度。这一过程所要求的温度可能接近于硅的熔点温度，并且渗透几微米就要花费几个小时的时间，但这样也比合金更可控。

而且，可以重复进行掺杂。假定有一块掺入 N 型杂质的硅片，如果在其表面扩散入 P 型杂质，当 P 型杂质多于 N 型杂质时，就会将该 N 型层转换为 P 型层。在两种杂质浓度相等的位置处，就形成了结。更高浓度的第二次扩散能够将材料再次转换为 N 型材料。然而，必须注意这样一个事实：接下来的高温暴露会导致之前形成的层进一步扩散。

还有一些材料也可以作为杂质掺入使用：P 型的镓（很少使用），N 型的砷和锑。后两者具有如下优点：它们比磷和硼扩散的速度更慢。由于这个原因，砷和锑成为这一工艺前期使用的主要杂质，因此受后续扩散的影响较小。

1956 年，晶体管的三位发明人被授予诺贝尔物理学奖时，只有沃特·布拉顿仍在贝尔实验室工作。约翰·巴丁 (John Bardeen) 已于 1951 年离开贝尔实验室，成为伊利诺伊大学 (University of Illinois) 的教授，并在那里开展了有关超导的研究工作，于 1972 年再次获得诺贝尔奖。

比尔·肖克莱于 1954 年离开贝尔实验室。正如日益被人们接受的晶体管一样，肖克莱凭借其日益提高的声誉，与贝克曼仪器公司 (Beckman Instruments Company) 达成协议，肖克莱半导体实验室 (Shockley Semiconductor Laboratories) 作为该公司附属机构在加利福尼亚的帕洛阿托市成立。肖克莱如日中天的声誉帮助他吸引了一批最优秀的研究人员。在短短一年时间里，他招募了大约 20 名研究员在其实验室工作，其中大多是博士，包括 28 岁的罗伯特·诺斯 (Robert Noyce)，27 岁的高登·穆尔 (Gordon Moore) 以及 32 岁的吉恩·霍尔尼 (Jean Hoerni)。

对于所有的这些研究员而言，他们加入后经历了一段令人着迷的短暂的时光。可后来，真正的比尔·肖克莱从名誉的光环后显现出来，人们发现肖克莱实际上是个相当怪癖和令人不愉快的人。他会因为一些琐碎的错误解雇员工，因为一些无关紧要的问题大发雷霆，并且会不明不白地改变研究方向。他还不断地改变管理方法，例如将每个人的工资公布在公告板上。

诺斯和穆尔想促使肖克莱采用扩散法制造硅晶体管，但肖克莱却不感兴趣。他希望在他的实验室里提出一个全新的器件，就像晶体管跨越真空管一样，该器件可以跨越晶体管。

当时整个团队感到完全失望，他们与母公司总裁阿诺德·贝克曼（Arnold Beckman）约谈，并且告诉他这个不可能出现的情况。贝克曼承诺雇用有一个商业头脑的人，作为肖克莱和他的团队之间的缓冲。但这个方法并不奏效，肖克莱拒绝放弃这种不切实际的决策。8名团队成员都失去了耐心，他们与仙童摄像机和仪器公司（Fairchild Camera and Instrument Company）达成协议，并于1957年10月离开了肖克莱半导体实验室。

新成立的公司名叫仙童半导体（Fairchild Semiconductor）公司，最初是一个独立的运营体，仙童摄像机和仪器公司拥有对其全面收购的特权。公司成立之初开发的产品就是他们向肖克莱提议的产品，这种被称为台面晶体管（Mesa transistor）具体的结构曾利用锗做过试验，但没有利用硅试验过。需要在硅晶片的同一面进行两次扩散，第一次扩散为P型扩散，第二次扩散为N型扩散，两层之间深度的不同产生了基区，这是首次高精度地实现基区。之后在晶体管的上表面覆蜡，并对暴露的硅进行腐蚀，从而使剩下的部分呈平台状。

由于其优越的性能，台面晶体管的销量立刻突飞猛进，1959年就达到七百万美元。但是仍然存在问题，其中最严重的是台面晶体管的可靠性。腐蚀的硅片被焊到了一个小的金属容器底部，铅放在顶部区域，之后将容器焊接上。在焊接过程中喷出的微小金属颗粒就会悬浮在容器内部，并不断地使暴露的PN结短路。

当硅暴露到空气中时，很快就会形成一层氧化物薄膜。这正是人们熟知的玻璃（二氧化硅），高温潮湿的环境可以加快其生成过程。在扩散中使用的一些杂质气体（如镓）能够穿透该氧化层，而另一些则被该氧化层阻挡。因此，该氧化层有可能被用作掩盖膜。如果某些位置的氧化层被腐蚀掉，而其他位置的氧化层未被腐蚀，使用适当的掺杂气体，扩散就会仅在没有氧化层的区域发生。但贝尔实验室的一项研究表明：暴露在扩散气体中的氧化层会被污染，应该用新生成的氧化层取代被污染的氧化层。

令霍尼苦恼的是，他找不出为什么氧化层不能在两次扩散中都作为扩散掩盖膜的任何理由，如果使用可以被氧化膜阻挡的掺杂气体，为什么后来的氧化膜会是污染的呢。因此他做了个试验——作为非正式的项目——试验获得了一项在晶体管中占据非常重要的地位的技术：平面处理。

在准备第一次扩散时，霍尼在氧化层表面涂上了感光且防腐蚀的涂料（感光保护膜），利用已经发展成熟的印刷电路感光技术，将其通过带有基极区域样本的感光板（模板）曝光。随后的腐蚀仅仅是将要扩散P型杂质的区域的氧化物去掉。扩散完成后，在高温潮湿环境中，放置一个晶片，将这些氧化物“窗口”重新关闭。之后重复上述步骤，进行第二次（发射极）扩散。第三步掩盖时，氧化物中的“窗口”可以被腐蚀掉，从而与这两个扩散层相连接。然后他在晶片的表面汽镀一层铝，并利用同样的感光技术模仿这一过程。之后就可以用刻线器在晶片上刻划（像划玻璃一样），分割成独立的晶体管芯片。

平面处理技术具有一系列的优点。其中最为重要的是，结自动被氧化物保护起来了，这种氧化物是当时最好的隔离剂之一。焊接容器时喷出的金属微粒不会再造成短路。第二，利用感光方法刻划的不是一个，而是同时刻划出数百个晶体管。因此，晶体管不再需要单独的、精密的掩膜技术，平面晶体管在降低成本上具有巨大的潜力。当时已是总经理的诺斯看到了平面工艺的优势，悄悄地将其应用到了生产中。

平面晶体管还有一个优点：一旦杂质进入硅中，就会向各个方向扩散，包括旁路。因此，P-N 结被掩盖在氧化物下面，既没有暴露给人进行人工处理，也没有受到空气的污染。因此，平面结是可以生产出来的最干净（最稳定）的结。1959 年年初，那些还不知道他们使用的晶体管是利用一套全新工艺生产的仙童公司客户非常惊奇地发现，漏电流比以前产品的漏电流小了一千倍。

随着仙童公司的兴旺发达，肖克莱晶体管却走向下坡。肖克莱实验室被转卖两次，并于 1969 年宣布关闭。肖克莱迷上了社会学，并发表了一种称为“劣生学”（dysgenics）的理论，提出穷人天生 IQ 就低。到他 1989 年去世的时候，他的名声也被自己毁灭。

1.4 集成电路

1958 年 7 月，德州仪器（Texas Instruments）公司的杰克·基尔比（Jack Kilby）想到锗片或硅片不仅可以用作晶体管和二极管的宿主，还可以作为电阻器和（结）电容器的宿主。这个想法足以制造一个小电路，其所有的元件都在同一块硅片上。

这个想法非常好，但所采用的方法却比较复杂。为了使各种元件彼此隔离开，基尔比对硅进行了蚀刻，某些区域进行了穿透蚀刻。并用金线将这些元件连接起来。这个电路的确非常小，但对于生产制造而言却是个噩梦。每一块微小的硅片都得单独制作，包括制模板、蚀刻和连线。当德州仪器的代理人准备撰写专利申请时，他们惊恐地看到胡斯·戈登堡（Rube Goldberg）图，此时基尔比说，设置一层金层也可以实现互连，但他并没有说明在三维空间中如何实现。

当基尔比在得克萨斯致力于他的电路研究时，加利福尼亚的罗伯特·诺斯也有了类似的但是更加简洁的想法。诺斯的研究动机主要是成本，而不是尺寸。他认识到在晶片上制造精确布局的晶体管，将他们切割开，放到一个外壳中，在电路板上重新布局，这并没有任何意义；如果可以将电路板上的其他元件也放置在晶片上，就可以省去大量的生产步骤。在硅片上制造电容器和电阻器对于诺斯而言不存在任何问题，因为他经常会处理这些（有害的）影响。但是，所需要的是找到一种便宜的方法将晶片上的元件连接起来。诺斯立刻否决了使用线的想法，因为这种方法过于昂贵。但是他看到，在平面工艺中，这个问题已经得到解决：用于连接晶体管和线的铝层也可以用在这些元件之间。

1959 年，诺斯将他的想法写入笔记中，并开始申请专利。基尔比和诺斯的专利申请无疑是相互冲突的，两家公司之间也开始了一场激烈的斗争，并诉诸法院。德州仪器胜诉了，因为基尔比的专利申请中提到了薄金膜，因此他的想法似乎要比诺斯的早，仙童公司提出上诉。

这两项专利陷入法院的争斗以后，德州仪器公司和仙童公司都没有在集成电路中获得任何专利费，此时集成电路的发展已呈爆发式的增长。于是，两家公司达成协议，宣布基尔比和诺斯为集成电路的共同发明人。这一申诉提出后不久，法院就下达了判决：诺斯被宣布为集成电