

INTUITIVE IC ELECTRONICS

集成电路电子学浅说

为工程师

和技术人员精心编写的入门读物

[美] T·M·弗雷德里克斯 著

廖复疆 译

张建人 郭懋沁 校

电子工业出版社

内 容 简 介

《集成电路电子学浅说》是由美国国家半导体公司线性集成电路设计工程师T·弗雷德里克斯为该公司半导体产品应用开发工程师小组讲课的讲稿整理而成的一本书。它用通俗易懂的直观的方法解释了集成电路中发生的基本半导体物理过程，并系统地介绍了各种二极管、双极型晶体管、金属氧化物半导体场效应晶体管以及集成电路的基本原理和制造方法。由于避免了繁杂的数学处理，用日常生活中常见的事例直观地、浅显地讲解，这使不同的读者（包括各种电路设计工程师、半导体专业和非半导体专业的学生，以及任何想知道半导体器件是如何工作的读者）都能接受。

本书是学习半导体器件的入门读物，可作为各类工程技术人员、管理人员学习半导体器件的速成读本，也可供非半导体专业的学生参考。

Thomas M·Frederiksen
INTUITIVE IC ELECTRONICS

集成电路电子学浅说

T·M·弗雷德里克斯 著

廖复疆 译

张建人 郭懋沁 校

责任编辑：吴金生

电子工业出版社（北京市万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
昌平县印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32毫米 印张：6.75 字数150千字

1986年3月第1版

1986年4月第1次印刷

印数：0—10000册

定价：1.40元

统一书号：15290·221

前 言

本书的中心思想是用通俗易懂的、直观的方法来解释固体集成电路中发生的基本半导体作用机理，使读者能够透过各种半导体器件和各种制造微处理器、半导体存储器新工艺抓住主要的概念。这些应用于最新半导体产品中的器件包括各种类型的二极管、双极型晶体管、结型场效应晶体管(JFET)和金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)。半导体技术一直在高速地发展，因此本书也概括了许多新的概念和器件，给读者提供最新的进展情况。

本书介绍的内容对学生和不同专业的读者都是有帮助的。它可以作为学生教科书的补充材料。不同专业的读者将会发现，本书有助于达到他们所希望的对半导体了解的程度。本书的主要部分是作者对半导体产品应用开发工程师小组讲课的讲稿。这些工程师曾从事集成电路的应用开发工作，并对了解半导体内部更详细的工作过程感兴趣。他们意外地发现，从这本篇幅不长的书中，完全可以获得对晶体管基本工作原理的有用的、直观的了解。更多的读者，无论是在电子工业界内部的和外部的，都发现虽然他们在日常生活中使用着半导体产品，但对这些产品是如何工作的却缺乏基本的了解。本书将使这些产品成为可以被认识和掌握的，因而也会变得更加“亲近”。

为了获得对半导体直观的了解，第一章首先介绍了固体材料的基本知识。对化学和固体物理有些了解的读者，这将

是对已知概念的复习。这一章的材料也扩大到包括电场和电流的概念，也介绍了晶体和硅材料掺杂。

在第一章的物理基础上，第二章介绍了PN二极管，包括二极管工作的各个方面。并解释了许多市场上出售的重要的二极管的工作机理。

第三章剖析了双极型晶体管的工作过程，并讨论了小信号特性和大信号限制。发展了一些新的方法，以便于形象化地了解共发射极连接(包括电压和电流驱动两种情况)和共基极连接。使这两种连接的输出阻抗更容易理解。介绍了一个简单的晶体管模型，并举例说明如何计算一个单级放大器的电压增益。

第四章简短地介绍了晶体管制造技术的发展过程。

第五章描述了如何制造集成电路，介绍了线性集成电路的一些工艺，以及NPN和特殊的PNP器件。着重介绍了数字集成逻辑电路的发展，也解释了常用的逻辑电路系列。

第六章分析了结型场效应晶体管。JFET的基本工作原理和双极型-场效应晶体管(Bi-FET)*一起作了介绍。Bi-FET是新型单片运算放大器。这一章对高频金属-半导体场效应晶体管(MESFET)也作了描述。

第七章是包含内容最多的一章，主要讨论了半导体工业中数量最多的产品，金属-氧化物-半导体，即MOSFET。可以看到半导体存储器和微处理器芯片所取得的进展是从早期的PMOS(P沟道金属-氧化物场效应晶体管)产品进化而来的。给出了MOS场效应晶体管的一种新的、直观的分析，使这一复杂的器件变得易于了解。也讨论了CMOS(互补金属-氧化物-半导体场效应晶体管)，DMOS(双扩散金属-

* Bi-FET是国家半导体有限公司的注册商标。

氧化物-半导体场效应晶体管), VMOS (纵向金属-氧化物-半导体场效应晶体管)和新的N沟工艺。也讨论了逻辑电路。

对电荷转移器件, 包括庠链器件、电荷耦合器件和电荷耦合象传感器的本质也作了讨论。

着重讨论了半导体存储器和作为动态随机存取存储器 (RAM)变革基础的简单电路, 也描述了非易失性半导体存储器。

序

当代的设计工程师正面对着无数复杂的和不断发展着的集成电路技术，商业杂志充满了许多新的器件和制造技术。要真正弄懂这些技术，通常总是和严格的数学分析以及一般说来有点难以理解的半导体物理联系在一起的。许多作者都尝试过对这些器件为什么能够或如何执行它们的功能提供形象的说明。

本书达到了上述目的。它用非常形象和直观的方法解释了常用的术语和定义。这种新方法导出的物理模型很容易和各自的电路元件相对应。通过演绎推理过程，这些模型再组合成一些结构单元，用这些结构单元可组合成更复杂的结构和最终组成我们已熟悉的各种技术。

作者对半导体现象的洞察力已经被他的许多专利发明和他对各种运算放大器的开发工作所证实了，这类放大器已被工业部门标准化了。作者把他的全部热忱和清晰的思路倾注入这些书，这样说是不过份的。

国家半导体有限公司

应用开发工程部经理

R·S·比罗斯(Biros)

目 录

序

前 言

第一章 物理基础知识.....	(1)
1.1 电的基本概念.....	(1)
电流.....	(1)
电场.....	(2)
电功率.....	(4)
电能.....	(5)
电阻.....	(5)
金属中的电流.....	(6)
詹森 (Johnson) 噪声.....	(8)
电迁移.....	(8)
绝缘体和半导体.....	(9)
能带理论.....	(9)
1.2 物质的固态.....	(13)
原子论的观点.....	(14)
热传导.....	(18)
硅材料.....	(18)
1.3 掺杂.....	(19)
杂质类型.....	(20)
1.4 材料的扩散.....	(22)
气相扩散.....	(23)
固相扩散.....	(23)
1.5 掺杂效应.....	(24)

N型掺杂和电子	(24)
P型掺杂和空穴	(27)
多数和少数载流子	(28)
第二章 半导体二极管：双极型晶体管的基础	(30)
2.1 为什么变容二极管比电容器更复杂	(34)
变容二极管的应用	(36)
2.2 漏电流和反向偏压二极管	(37)
漏电流和温度的关系	(39)
非理想漏电流	(39)
2.3 反向电压极限	(40)
击穿状态的二极管	(41)
雪崩击穿	(42)
齐纳击穿	(46)
厚度限制的击穿	(48)
2.4 了解二极管	(49)
正向偏置	(49)
耗尽和扩散电容	(52)
高电导二极管	(52)
反向二极管	(53)
量子力学隧道效应和隧道二极管	(54)
P-I-N 和阶跃-恢复二极管	(57)
肖特基二极管	(58)
理想的二极管方程	(60)
二极管导通电阻	(62)
2.5 光电二极管	(64)
用作光检测器的光二极管	(64)
光发射二极管	(66)
第三章 双极型晶体管工作的直观描述	(68)
3.1 晶体管基础	(68)

晶体管的跨导	(69)
晶体管内部的作用过程	(72)
产生不希望的基极电流的因素	(74)
存在有限输出阻抗的原因,厄尔利 (Early) 效应 和其他概念	(76)
晶体管的简单电路模型	(79)
偏压条件对输出阻抗的影响	(82)
级联连接	(85)
3.2 超 β 晶体管	(86)
3.3 大信号效应	(87)
柯克 (Kirk) 效应或基区延伸	(87)
发射极效率	(88)
饱和	(89)
金掺杂和复合	(90)
贝克 (Baker) 箝位电路	(92)
肖特基 (Schottky) 二极管箝位电路	(92)
第四章 如何制造晶体管: 制造技术的简短历史	
回顾	(94)
4.1 锗合金晶体管	(94)
基区宽度的控制	(95)
4.2 分立平面, 外延, 钝化的硅晶体管	(96)
硅氧化物的好处	(96)
外延层	(97)
氧化硅掩蔽	(98)
不希望的发射区管道	(100)
晶体管的引线	(101)
一个完整的晶体管	(102)
第五章 双极型集成电路: 在一块芯片上制造个整电 路	(104)

5.1 某些基本的因素	(104)
线性与数字电路	(104)
晶体管隔离	(105)
制造NPN晶体管	(106)
电流镜和 ΔV_{BE} 对 ΔI_o 的关系	(108)
发射区面积的按比例性	(110)
线性集成电路中可利用的兼容NPN晶体管	(111)
多收集极PNP晶体管中电流的按比例分配	(112)
带有再注入极PNP晶体管中电流的降低	(114)
纵向PNP晶体管	(116)
5.2 T^2L , 通用的双极型逻辑系列	(117)
5.3 I^2L , 一种新的双极型逻辑技术	(120)
5.4 寄生二极管和晶体管在集成电路产品中的有害 效应	(123)
外延盆区引起的问题	(123)
第六章 结型场效应晶体管	(126)
6.1 电流 I_{DSS}	(129)
6.2 沟道的夹断	(130)
6.3 V_{GS} 控制和夹断电压	(131)
6.4 双极型-场效应晶体管 (Bi-FETS)	(132)
6.5 金属-半导体场效应晶体管 (MESFETs) 和砷化镓 场效应晶体管 (GASFETs)	(133)
第七章 金属-氧化物-半导体 场效应晶体管(MOSFET)	(135)
7.1 P沟道MOS场效应晶体管 (PMOS)	(135)
沟道区的反型	(137)
MOS场效应晶体管的直观描述	(138)
源极端的状况	(142)
漏极端的状况	(144)

氧化硅中的固定电荷, 快表面态和离子玷污	(144)
栅极材料对阈值电压 V_{TH} 的影响	(146)
通过源区-本体加反向偏压提高 V_{TH}	(146)
增加 V_{DS} 的影响	(148)
饱和区	(149)
MOS 场效应晶体管的工作状态	(150)
PMOS 反相器	(152)
耗尽负载	(153)
采用硅栅极改进性能	(154)
7.2 互补 MOS 场效应晶体管 (CMOS)	(156)
CMOS 中存在纵向 NPN 双极型晶体管	(158)
CMOS 中的半导体可控整流器(SCR)效应	(158)
传输门	(159)
CMOS 用于线性函数	(160)
高性能 CMOS (HCMOS)	(163)
双层多晶硅硅-栅 CMOS (P²CMOS)	(165)
蓝宝石上的硅	(165)
7.3 双扩散金属-氧化物-半导体 (PMOS) 晶体管	(166)
7.4 纵向金属-氧化物-半导体 (VMOS) 场效应晶体 管	(168)
7.5 N 沟道硅-栅 MOS 场效应晶体管	(169)
多晶硅层和金属硅化物的新应用	(170)
NMOS 晶体管的制造	(170)
7.6 NMOS 改进了微处理器	(173)
NMOS 逻辑电路	(174)
7.7 电荷转移器件 (CTD)	(178)
庠链器件 (BBD)	(179)
电荷耦合器件 (CCD)	(180)
▼.8 MOS 场效应晶体管动态随机存取存储器(RAM)	(182)

简化 RAM 单元	(182)
16kb动态 RAM	(185)
读出已存储的位信号	(189)
α 粒子和软差错	(191)
256kb动态 RAM	(192)
7.9 静态 NMOSRAM	(193)
7.10 非易失性半导体存储器	(194)
UV 可擦、可编程 ROM (EPROM)	(195)
电可擦 PROM (E²PROM)	(197)
7.11 展望未来	(201)

第一章 物理基础知识

本章对于电的本质及固态物质的物理现象提供一个基本概要。大多数的讨论是围绕硅进行的，因为它是最普通的半导体材料。

1.1 电的基本概念

大多数人在日常生活中都要涉及到电和电器设备，并且实践经验比认识能得到更多的基本知识。我们将尽可能采用日常生活中的事例来研究本书必须的基本素材，期望通过讲解，使读者能熟悉电的现象。

电流是半导体器件的基础，因此我们将从复习这一重要概念开始。

电流

电流是一个电路的动态成分。电压源产生“压力”引起

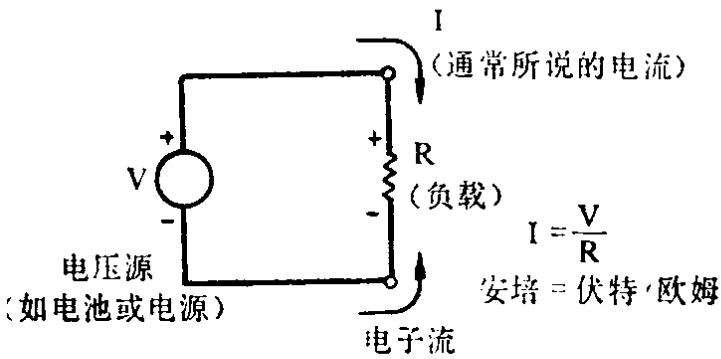


图1-1 通常所说的电流

电流流动。电子是一个能沿着有源电路运动，且小到几乎可以被忽略的带电粒子。虽然电流是电子的流动，但习惯上把电流看成是正的，即其方向与电子流的方向相反（图1-1）。

一切物质都包含有电子。在电视机上“画”出图画 of 阴极射线，就是存在于真空管中的电子流。

电 场

当开关闭合时，加在电路上的电压就在导电材料内部建立起电场。例如，在烤面包器中，电场加速了加热器中所有可用的电子，引起这些电子运动，这种荷负电的电子的运动就构成了电流。由于这些高能量电子彼此之间或与加热器材料之间的碰撞，失去部分从电场获得的能量（动能）它把这部分能量转给了加热器，因此加热器成为炽热状态（ 600°C ）。

在白炽灯的情况下，灯丝变为白热状态（ 2000°C ）于是强烈地发光，或产生光辐射，使得我们可以借助于产生的光线来阅读。灯泡内部的惰性气体对灯丝起保护作用，否则在极高的温度下灯丝要被烧掉（氧化）（在玻壳破裂的灯泡里，如果加电压，灯丝很快就被烧掉）。有时候很难相信，灯泡发出的光是由于灯丝内部传导电子的碰撞所产生的。

电场可能是一个新的概念，但在暴风雨中闪电的时候，你已经看到它的影响。当云和地球之间的电场变得过强的时候，隔在它们之间的正常的绝缘空气将被击穿（电离），使得电流流动，这就产生了称之为闪电的大的火花放电。同样的例子，当你在干燥的气候条件下在地毯上行走时，你会积累电荷（就像用梳子摩擦猫的软毛一样），使你和一个金属门把手之间建立电场。当你的手靠近把手时，电场会引起突然的小电火花，使你产生放电，或者说移走了你走过地毯时积累

的电荷。

电场来自分开的两组电荷之间所存在的电作用力。最小的电荷是一个电子所携带的电量 即 $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ (C, 库仑, 是电荷的单位)。电路中的电流是用单位时间内流过的库仑数即电量来量度的。

如果把电子从材料中拉出来, 在材料中就建立起一个称之为库仑力的恢复力, 这种力的作用是使得所失去的电子还原(换言之, 材料由于失去某些电子而荷正电)。库仑力的大小和电子离带正电荷材料之间的距离的平方成反比。

当电荷存在一个给定的区域时, 就说有一个静电场存在于这一区域。物理学家们已利用这一概念来简化他们的工作。通过计算给定范围内静电场的强度和方向, 物理学家便能计算出该范围内所有固定电荷的总效应。这样引出的静电场代表该范围内所有单个电荷作用在引入此区域的单位电荷上的总作用力。可以用图表示整个区域的电场强度和方向, 就象地形图上的等高线一样。任何引入这一区域的新电荷都受到已有电场力的作用。

电场的概念类似于物理学家为计算地球吸引力而用到的重力场, 这种吸引力使地球上所有其他物体具有重量(重力吸引力)。我们比较两种力的大小: (1)两个分开的电子之间的重力吸引(由于它们的质量所引起), (2)它们之间的库仑电斥力(由于电子的相同电荷所引起), 发现库仑力比重力强 4.18×10^{42} 倍。这一比值和两个电子之间的距离无关, 因为两个力都和距离的平方成反比。所以对电子来说, 由于库仑力强得多, 我们经常可以忽略重力的影响。

从1909年到1913年, R.A.密立根(Millikan)(1868~1953)利用库仑力和重力来测量电子的电荷。他把一个电子

(或几个电子) 加到一个比电子质量大得多的小油滴中 (图 1-2)。调节如图所示的两个平板之间的电压 V ，直到重力被库仑力所平衡，用水平显微镜观察油滴不动地悬挂着为止，记下电压 V 的数值。当电压突然移去，油滴将因重力而落下。油滴的质量可以测量，油滴带的电荷是根据所需要的电场强度来计算的，该电场产生向上的库仑力以抵消向下的重力。在一系列实验中，密立根找到了电荷值之间的数量关系。他断定他所处理的是基本电荷单位，即一个电子的电量的整数倍。用这种方法，密立根不仅显示了电子的分立特性 (只能存在 $1e$ ， $2e$ ， $4e$ 等的电荷)，而且非常精确地测量了单个电子的电量。

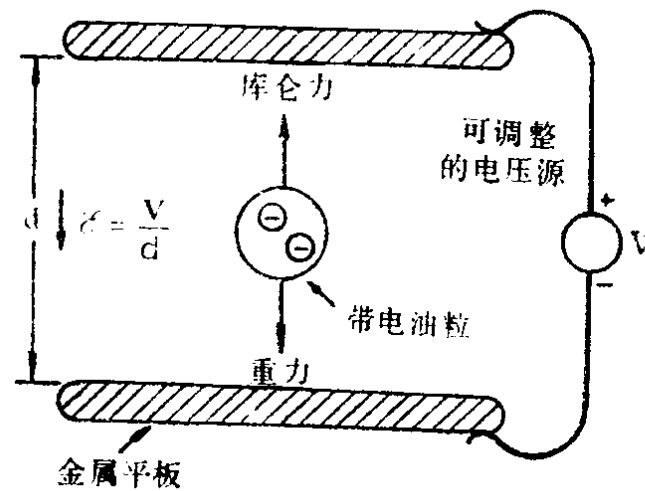


图1-2 密立根的油粒实验

电功率

供给一个电阻的电功率取决于电阻两端的电压和流过电阻的电流。只有当电压引起电流流动时，才消耗电功率。

必须设法将能量变换成电压源，以供给电流。电池是利用化学能在电极上产生电压的。因此电压是一种电势能，并

需要其他形式的能源来产生它。当这一电压用来产生流动的电流时(如在一个闪光灯中)，电功率得到利用。如想保持初始电压的大小，必须消耗另外的能量。

电能

电能是电功率和时间的乘积，因此测量它的方法就是测量电功率和消耗电功率的时间间隔。电能的商用单位是 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，并用此单位计算各种设备用电的收费。在科学上，电能的单位是 J 或 $\text{W}\cdot\text{s}$ 。 $1\text{ kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6\text{ J}$ 。

电能的单位是以英国的物理学家(也是一个酿酒商)焦耳(1818~1899)的名字命名的。焦耳用业余时间通过实验证实，利用下落重物的势能推动盛水容器中的叶轮，将使水加热，从而证明热是能量的一种形式，而决不是象当时人们普遍认为的那样，是从一种物体流入另一物体的“魔液”。

电阻

当把烤面包器和白炽灯插入同样的110V墙上插座时，显然两者消耗的功率是不同的。消耗功率的差别起因于每一种设备阻止电流流动能力的差异。这种能力称之为电阻，以 Ω 为量度单位。低电阻的烤面包器引起大的电流值 I 流动，电流用 A 量度。

类似地，如果有谁坐在澡盆内时接触了收音机或灯泡，则湿皮肤的低电阻可以允许足够大的电流流过人体，而终止心脏的正常功能，引起触电死亡。电流的流动是因为从110V电源导线，通过湿的人体到水管接地，这条通路有低的电阻。干燥的皮肤提高了人体的电阻，从而降低了电流。但110V电源仍然是致命的，不应当去摸它。出事时，在水管