

〔民主德国〕R·恩德莱 原著

微电子学

科学普及出版社

微 电 子 学

〔民主德国〕 R·恩德莱 原著

何 希 哲 译

科 学 普 及 出 版 社

内 容 提 要

微电子学的创立是本世纪最重大的科技成就之一，它导致了一场工业革命。本书对微电子学的社会意义，对有关的半导体器件、电子电路和制造工艺以及集成电路的应用和微电子学的发展前景都作了深入浅出的论述，内容包括了基本原理和有关最新进展的介绍。本书以叙述和图解为主，它不仅对于初学者，而且对微电子学工作者以及高等院校的学生也都有一定的参考价值。

Mikroelektronik

Rolf Enderlein

VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften

Berlin 1986.

• • •
微 电 子 学

民主德国 R·恩德莱 原著

何 希 哲 译

责任编辑：金维克 李 东

封面设计：孙联生 周秀璋

•
科学普及出版社出版(北京海淀区魏公村白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京燕山印刷厂印刷

•
开本：850×1168毫米 1/32 印张：6.375 字数：143千字

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数：1—1690册(平) 1—400册(精)

ISBN 7-110-01010-4/TN·23(平)定价：2.50 元

ISBN 7-110-01011-2/TN·24(精)定价：4.50 元

前 言

微电子学是我们时代最有意义的科学技术成就之一——很多人甚至认为它是最重要的成就。只有前几个世纪的那些重大的技术革命，例如16世纪印刷术的发明，18世纪蒸汽机的应用以及19世纪电工技术的开拓可以与之相比拟。在当代的科学技术革命中占首要地位的就是微电子学。今天，没有任何技术革新能象它那样渗透到人们生活的各个领域。目前制造的微电子产品是过去无法想象的，诸如袖珍计算器、微型收音机、家用电器中的电子控制系统、石英钟表、电子游艺机、微型计算机以及其它高效程控电子计算机等，当然还远不止这些。微电子学的重大意义在于它是信息资源的基础。在人们的生活中，信息资源与能源、物质资源具有同样的重要性。这里所指的信息的概念是广义的。信息过程普遍存在——在工业、管理、科学实验以及一切有目的的物质和精神活动中都在不断地进行。其间，信息被获取、处理、传输和存储。在人们的实践中非常需要有效而迅速可靠地完成信息过程。微电子学正是满足这种需要的关键，其重要的实际意义也就在这里。选择“关键技术”一词表征微电子学是十分贴切的。以这样的或类似的语言评价微电子学的作用已不是首次，并且其含义只有对本专业了解比较多的人才能完全理解。然而这确实是大家公认的。事实证明这种评价是正确的。但是，不是每个人都仅满足于了解一下微电子学的意义，这毕竟是有目共睹的。人们更想了解为什么微电子学有这样大的作用。1930年在柏林举行的第七届无线电博览会上，鉴于当时已经生产出了比较先进的收音机，爱因斯坦（A·Einstein）在开幕词中说：“有些人对如何利用这些科技成就无动于衷，有些人对这些科技成就的了解甚至还不如坦然吃草的牛对植物学了解的多，他们应该感到惭愧。”尽管采

用了诙谐的语言和比喻，然而他讲的是非常正确的，也适合于今天我们对微电子学这门知识应持的态度。

微电子学是一个综合的领域。人们可以从不同的侧面加以探讨。前面已经概述了它的社会意义。然而，究竟是哪些实际需要有待微电子学加以满足从而导致了微电子学领域的形成呢？目前已经研制出了哪些微电子产品？它们是怎样应用在工业、管理、通讯系统、科学研究乃至人们的业余生活中呢？微电子学提供的各种可能性今天是否已经充分利用了呢？预计今后它将会如何发展呢？这里也包括微电子学社会作用的发展，就象任何一个能够渗透到社会生活和个人生活的重大技术革命一样，其作用是多方面的，而且是非常深远的。当然，人们在探讨微电子学社会意义的同时，对其工作原理等问题一定会产生浓厚的兴趣。诸如：微电子学的工作原理是怎样的？半导体器件是如何工作的？由这些器件构成的电路又是如何工作的？工作原理包含着两方面的含义：其一，在这些器件、电路、仪器和设备中发生了哪些物理过程；其二，在这些系统中，具有什么样的逻辑过程以及根据使用情况应采用什么样的程序或规则控制这些逻辑过程。通常将电子电路和电子仪器、设备的物质形态统称为硬件，而将其工作所需要的智能条件统称为软件，如自动控制和程序系统等。每一个微电子系统都包括软件和硬件两部分，就是说要想了解这个系统就必须同时了解它的软件和硬件。如果想利用微电子系统进行信息传输，一定会对微电子电路是如何制造的问题产生兴趣。这个问题在微电子学中是特别重要的。微电子学曾经是而且今天仍然主要是如何制造包含大量元器件的集成电路的艺术。目前，微电子学完全具有将10万支晶体管集成在一块电路上的能力。这个问题很久以前在原理上就已经解决了。那么，为什么在相当一段时间内未能实现呢？其原因不是有什么物理过程还有待于发现，而纯属还没有掌握制造艺术，即工艺过程。1960年，采用硅平面工艺研制出了第一块集成电路，这一突破性的进展导致了微电子学的诞生。毫无疑问，微电子学的未来仍然主要是取决于工艺技术的

进一步发展。

微电子学领域的研究与探讨可以从不同的侧面入手，近年来发表和出版的大量有关微电子学的论文和书籍说明了这一点。但是供非专业人员阅读的书刊其内容往往局限在某一个方面，例如微电子产品的应用或制造。这样选材当然也不是没有理由的，我们想向读者介绍一些对普遍了解微电子学领域所必需的最重要的知识，有意识地不将本书内容局限在某一方面。据我们所知，就以通俗易懂的形式介绍整个微电子学领域而言，本书还是首次的尝试，它是为不具有专业知识而又渴望了解微电子学的读者而写的。正因为本书的对象不是专业人员，所以勿需将它写成一本教科书。这类教科书已经比较多了，其中大部分均适用于从事微电子学工作的工程技术人员和自然科学工作者的学习和参考。本书的目的是使未受过特殊专业教育的读者能够对微电子学领域有一个概括的认识。这一点是专业教科书难以做到的。本书的选材和表达方式都是以这个目的为出发点的。

本书的中心内容是介绍微电子学的现状。虽然也谈到了曾经促使微电子学领域形成的各种因素，然而只是以总结的形式概述的，并不是再度展现其技术发展的全过程。我们着重讲的是目前工业上普遍采用的微电子学的工作原理、工艺方法及其应用，并力求使读者能够了解到这个领域的最新进展，而不只是报导一下当前所能达到的水平。不言而喻，按照当今的发展速度，任何所谓的最新进展都将很快过时，而永远具有实际意义的则是那些基础知识。掌握了基础知识就不难了解新生事物，因此本书特别侧重于基础知识的介绍。第一章概述了什么是电子学以及它与信息和信息处理的关系；第二章将阐述微电子学的社会意义；在第三章中将探讨半导体中的各种物理效应，它们是微电子电路功能的基础；如何利用电子电路进行信息处理将是第四章的内容；在第五章中将介绍微电子工艺技术；关于目前工业上制造的微电子电路如何分类的问题将在第六章中首先作一个概括的介绍，然后选择若干电路为例详细讲解它们的功能和用途；对微电子学发展前

景的展望将是最后一章的内容。总之，本书将要讨论的问题相当广泛。由于篇幅所限，我们只能遵循如下原则，即对于了解微电子学领域十分关键的问题将尽量全面地详细加以讲解，而其它的内容仅作简要的介绍甚至就不在本书中选用了。我们的目的是概括了解微电子学，所以不能将一切与微电子学有关的知识都总结在本书之内。在教科书中，数学公式是表达思想的重要方法，如果读者掌握相应水平的数学语言，那么它将促进读者与作者之间思想的沟通。在表达时我们将不采用数学形式而以叙述形式为主，必要时用图表加以说明。尽管我们力求作到通俗易懂，可能有些读者还是感到内容相当复杂，对于某些章节的理解也会遇到较大的困难，这些问题来源于事物本身，有待读者认真地钻研和探讨。

本书取材于作者近年来在柏林洪堡大学讲授微电子学和光电子学基础的教材。在撰写时曾得到了很多同事的支持。我要特别感谢的是H·佛尔兹 (Völz) 教授、J·萨列巴 (Zaremba) 教授、E·柯勒 (Köhler) 教授、R·斯特鲁布 (Strub) 博士、J·齐加蒂 (Dziesiaty) 博士和H·柯罗兹 (Klose) 教授，他们阅读了本书的全部或部分手稿并且提出了许多宝贵的意见。我还要特别感谢J·奥特 (Autb) 教授、H·莱默 (Reimer) 教授、A·鲁多夫 (Rudolph) 博士、R·白恩特 (Behrendt) 博士、K·H·赫尔曼 (Herrmann) 教授和H·G·史耐德 (Schneider) 博士在一些问题上所给予的有益指导。

我还要感谢民主德国科学出版社的领导和同事们在出版本书时对我的想法的充分理解。对于G·齐拉斯 (Zielas) 夫人和G·德意志 (Deutsch) 夫人所给予的建设性的合作以及W·史瓦兹柯夫 (Schwarzkopf) 先生和H·文德里希 (Wunderlich) 先生精心的绘制图表，我在此谨表示深切地谢意。如果我在许多方面没有得到H·恩德莱 (Enderlein)、即我夫人的支持，则本书是难于问世的，所以我要向她表示特别的感谢。

R·恩德莱

目 录

第一章 电子学	F
1. 1电子.....	1
1. 2电的能量转换.....	3
1. 3电力电子学和信息电子学.....	4
第二章 微电子学、信息和社会	6
2. 1社会中的信息过程.....	6
2. 2信息获取.....	7
2. 3信息存储.....	7
2. 4信息处理.....	8
2. 5信息传输.....	9
2. 6信息的概念.....	13
2. 7信息与生物学.....	15
2. 8用微电子技术进行信息处理.....	16
2. 9比以前的解决方法好.....	20
2. 10在技术上解决了以往无法解决的问题, 自动化.....	21
2. 11对其它信息过程的影响, 新的通信技术.....	25
2. 12统一的信息系统.....	28
2. 13微电子学与科学技术革命.....	28
第三章 半导体器件	30
3. 1半导体.....	30
3. 2能带.....	31
3. 3作为自由运动载流子的导带中的电子和价带中的 空穴.....	32
3. 4掺杂.....	34
3. 5杂质和结构缺陷.....	35

3. 6浅能级和深能级	36
3. 7过剩载流子的产生	37
3. 8复合	38
3. 9 pn 结 , 半导体二极管	39
3.10注入	40
3.11双极型晶体管	42
3.12场效应晶体管, MOS-FET	46
3.13电阻、电容	51
3.14光学显示器件, 半导体传感器	52
3.15太阳能电池	53
第四章 采用电子电路进行信息处理	54
4. 1模拟与数字信息处理	54
4. 2二进制数	56
4. 3基本逻辑运算	61
4. 4基本逻辑运算电路	64
4. 5逻辑门电路	67
4. 6电路簇	68
4. 7存储器电路	71
4. 8触发电路	72
4. 9电容器电路	73
4.10存储单元的编址	74
4.11计数电路	76
4.12只读存储器	79
4.13编码和译码电路	80
4.14多路转换器	81
4.15加法电路	82
4.16模拟电路	84
4.17模数转换器	84
第五章 微电子学的制造工艺	89
5. 1集成电路	89

5.2平面技术	93
5.3工艺流程1:氧化	94
5.4光刻图形	94
5.5腐蚀	95
5.6掺杂	95
5.7外延	96
5.8金属化	96
5.9举例	97
5.10集成度	99
5.11实施技术	102
5.12清洁度与精度	105
5.13工艺流程0:集成电路设计	107
5.14光刻掩模	111
5.15衬底硅片	112
5.16工艺流程2:划片	115
5.17键合	115
5.18封装	118
5.19制造成本	119
第六章 集成电路及其应用	122
6.1是否对每一个问题都有适宜的电路	122
6.2问题的复杂性和集成度	123
6.3问题的多样性和程序化	123
6.4问题的重复性和件数	126
6.5用户需求的电路和标准电路	127
6.6钟表电路	131
6.7袖珍计算器电路	133
6.8照相机电路	133
6.9模拟电路	135
6.10逻辑门电路	136
6.11MSI——标准电路	137

6.12 存储器电路	138
6.13 微处理机	141
6.14 微型计算机	144
6.15 微型计算机——部件系统	151
6.16 家用计算机, 办公计算机和工作计算机	152
6.17 应用举例: 自动排字机	153
第七章 微电子学的发展前景	155
7.1 智能程度更高的信息处理系统	157
7.2 以最低的价格达到最大可能的机器智能	158
7.3 更高的集成度和更快的工作速度	160
7.4 亚微米工艺	163
7.5 亚微米器件	166
7.6 砷化镓电子学	170
7.7 集成微光电子学	171
7.8 人造半导体微结构	172
7.9 超晶格, 量子阱	174
7.10 功能电子学	176
7.11 三维集成	177
7.12 低温微电子学	177
7.13 约瑟夫逊 (Josephson) 电子学	178
7.14 光的双稳态特性	181
7.15 集成光学	185
7.16 分子电子学	186
7.17 社会政治因素	193

第一章 电 子 学

我们在讲微电子学之前，首先讲一讲电子学，即先不谈前面那个“微”字。什么是电子学呢？

1.1 电 子

电子学主要是研究电子运动的规律。电子是很小、很轻的带电基本粒子。它的直径小于 10^{-13} 厘米，质量为 9×10^{-28} 克，电荷为 1.6×10^{-19} 安培·秒。电子是自然界中存在的最小电荷，即电荷的基本量。电子存在于原子之中，除了质子和中子外，电子是原子的最重要的组成部分。正因为如此，电子又包含在由原子构成的较大的系统之中，如固体、液体或气体。但是电子也可以以自由粒子的形式存在。和其它的一些基本粒子一样，电子也可以穿越宇宙空间。在所谓 β 裂变中，电子可以由放射性的原子核中分离出来。固体吸收能量后——例如吸收热能、光能或通过离子轰击——可以释放出电子。电真空器件就是利用了这个效应。电子管的阴极是可以加热的，阴极加热后释放出电子。只有在真空中才有自由状态的电子，就是说在电子附近没有其它的粒子存在，否则电子有可能附着在粒子上。物理学工作者可以利用真空中的电子作各种实验，例如可以利用电场给电子加速（图1-1 a），可以通过另外一个电场使已经加速了的电子束偏转方向（图1-1 b），可以给运动着的电子加上一个磁场迫使电子沿圆周轨道运动（图1-1 c）等等。然而，不仅是真空中的电子才具有上述现象。在某些固体中，除了紧紧地束缚在原子上的电子之外，还存在着

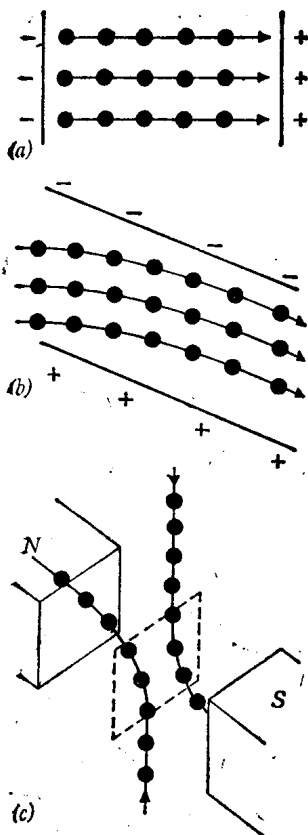


图 1-1 (a) (b) (c)

通过电场迫使电子运动(a)和偏转(b),
 磁场同样可以改变电子运动的方向(c)

可以比较自由运动的电子。同样现象也可以出现在离子化的气体、即所谓等离子体中。固体或气体等离子体中出现的这些自由运动电子，就象真空中的电子那样，很容易受到电场和磁场的影响。影响固体中的电子的可能性甚至就更多些。固体中的电子对于光的照射，压力的作用以及加热，就是说对于光、力和热的作用都会作出反应。固体受到光或热的作用后甚至可以产生新的自由运动电子。这样，关于什么是电子学的问题我们就有了一个一般的概念，即电子学主要是研究真空、固体以及气体等离子体中电子运动的规律和外部作用对电子运动及自由运动电子数量的影响。

当然，对电子施加影响总是与想要达到一定的实用目的联系在一起的。电子以什么方式发挥它们的实用价值呢？首先需要指出，只有在有电的地方电子才能发挥作用。电子是电的最重要的载体。尽管还存在着带正电的稳定基本粒子，特别是质子和正电子，然而正电子是非常稀少的，质子虽然象电子那样多，而且对于电工技术也不是没有意义的，例如在铅蓄电池中质子是离子的组成部分，然而缺点是其质量至少是电子的2000倍，因此其迟钝程度也约为电子的2000倍。所以电子要比正电子更适宜于绝大多

数的应用。如果打开电灯，电子就会通过灯丝运动，与原子碰撞从而导致光的辐照。在电动机中，由于力作用在运动的电子上才使电枢转动。

1.2 电的能量转换

电子的上述功能可以归纳为“能量产生”或“能量转换”。电子能够携带能量和转换能量——电能可以转换为光能、热能、机械能或化学能。在由热能、化学能、核能、太阳能等产生电能的过程中以及在电能由产生地点传输给用户的过程中，电子均扮演着主要的角色。就电子学而言，在一定程度上人们往往只注意到如何利用电子最基本的一些性质而恰恰忽视了电子在能量转换中的作用。就是说，利用电子的方式还比较简单和粗略，只是利用了电子能够运动，即一方面如何使电子运动起来，另一方面如何由电子导致新的运动的产生。实际上电子学最有兴趣的却是那些比较细致的效应，即各种外部因素的作用对运动着的电子具有什么影响以及利用这些现象能够达到什么效果。研究的目标并不在于电子运动本身，而更重要的是如何通过外部因素的作用有目的的实现电子运动的变化。我们已经讲了，所谓外部因素作用主要是指电的、磁的、机械的或者是热的作用。在电路中，由于电阻发热而引起电流的变化就是电子运动受到热作用的结果(图1-2 a)。在电子管中，改变栅压而引起阳极电流的变化就是电子受到电作用的一个实例(图1-2 d)。虽然电子学也研究如何利用其它类型外部因素的作用，然而电的作用却是最重要的。在本书中我们所讲的微电子学主要也是利用电的作用。现在我们可以精确地说明电子学的特征了：电子学是研究在外部电的作用下电子运动状态的改变并以此来达到特定实用目的的一门科学。

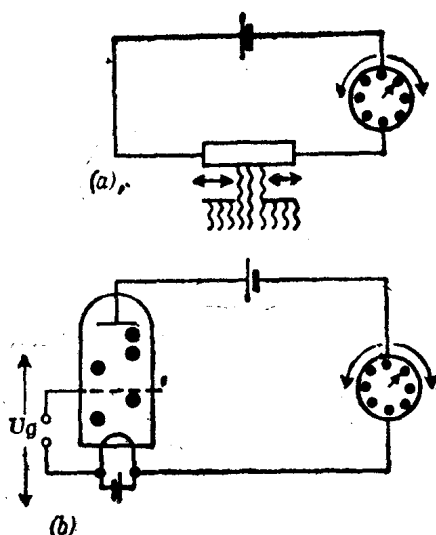


图 1-2 (a) (b)

(a)通过热的途径，即通过给电阻加上不同的热量；(b)通过电的途径，即通过改变电子管的栅压 U_g 而导致电子流的变化

1.3 电力电子学和信息电子学

如上所述，电子在能量转换和能量传输中起着重要的作用。如果那些用于在运动中转换成传输较大能量的电子是在电作用控制下，我们称之为电力电子学。换句话说，电力电子学主要是指强电流和高电压的电动控制。除了传输能量之外，电子还可以传输信息。某一电流是可大可小的。“这个电流是大的”则意味着一个信息。同样，外部因素对电子的作用也可以用强度加以区别。例如，电子管的栅压可大可小，因此也就可以在这一外部因素上加进信息。现在的关键是电子本身就可以承担这种外部因素的作用，从而有可能达到用某一电子流影响另外一电子流的目的。如果这两个电子流都携带着信息，则其中一个信息流也必定会影响另一个信息流(见图1-3)。这正是关于信息处理问题我们所要讲

的主要内容。就是说，我们得出了可以用电子进行信息处理的重要结论。如果电子学应用于这个目的，我们就称之为信息电子学。

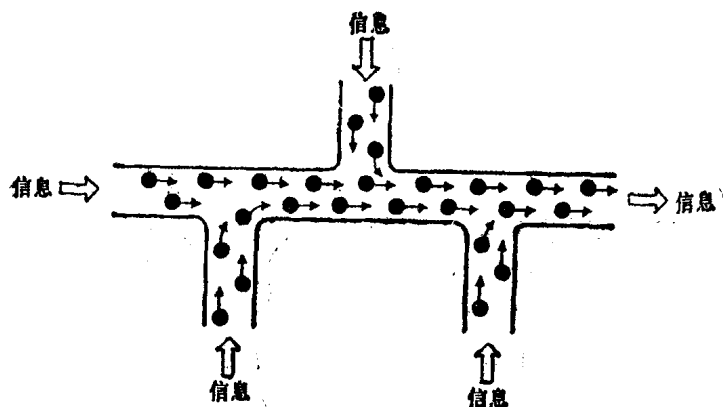


图 1-3 利用电子进行信息处理的原理

为了实现电子流之间有效的相互作用，我们就需要所谓电子器件（包括电子元件在内）。在图 1-3 中我们可以设想，在两电子流交叉的地方均有这种电子器件存在。电子流本身则通过导线传导，从而我们清楚地看到这些电子学辅助手段在原理上是如何用于信息处理的，这与电子器件以及将它们用导线相连而形成的电路有关。采用电子电路进行信息处理的有关具体问题将在下面几章中详细加以探讨。在下一章中我们首先向读者概括的介绍一下信息和信息处理在社会实践中的作用以及微电子学的意义。

第二章 微电子学、信息和社会

微电子学就是信息电子学。哪里需要交换信息，那里就有微电子学。这里所说的“信息”的概念是广义的。它概括了以各种方式对事物和现象所作的说明或报导。信息通过广播和电视传播，人们可以从报纸上得到信息或者用电话交换信息。邮局是信息交换的重要机构。计算机用信息进行工作。钟表不断地产生信息。测量意味着获取信息。自动控制设备需要信息。没有信息载体，就是说没有某种能表达信息的物质，就谈不上信息。如果不是将文字印刷在纸上或者通过电磁波的振荡进行通信，或者应用其它类型的物质，信息就无法存在。在相同的信息载体上，也可以采用不同的方式表达信息。文件可以用德文、俄文或英文书写，甚至根本不用文字而采用写在纸上的密码，尽管表达方式不同，但是所含的信息是相同的。上面举出的例子已经能够表明信息概念的特征。这一点以后还要讲到，并且还将给出一个比较确切的定义。

2.1 社会中的信息过程

信息不是静止的。通常，伴随着信息总要发生一些什么事情，这就是信息过程。与能量过程和物质过程一样，在社会生活和个人生活中信息过程同样起着巨大的作用。从生物学的角度来看，信息对于人们的生存具有决定性的意义。下面所要讨论的仅仅是与社会和人们的社会活动有着紧密联系的信息过程，因为它们与微电子学密切相关。这些信息过程可分为四大类：(1) 信息