
集成电子学

模拟、数字电路和系统

上册

[美] J·密尔曼 C·C·霍尔凯斯 著
杨自辰 杨大成 译 涂象初 校

人民邮电出版社

J I C H E N G D I A N Z I X U E

译者的话

集成电子学是美国哥伦比亚大学 J. 密尔曼的较大型著作之一。他在 1956 年写了“Pulse and Digital Circuits”，该书有中译本“脉冲与数字电路”(杨龙生等译，顾德仁等校)，1958 年写了“Vacuum Tube and Semiconductor Electronics”(电子管和半导体电子学)。1965 年写了“Pulse, Digital and Switching Waveforms”(脉冲式数字式与开关式波形)，1967 年写了“Electronic Devices and Circuits”(电子器件和电路)。这些书都是内容较全面而又重视基础知识的教学用书。这本书虽名为集成电子学，但其内容仍有上述书籍的基本特点。

这本书共分十九章，中译本分上下册出版，上册内容请参阅目录，下册内容有：高频晶体管，多级放大器，反馈放大器，稳定和振荡器，运算放大器，作为模拟系统结构单元的集成电路，作为数字系统结构单元的集成电路，电源电路和电源系统，半导体器件物理学。书中差不多对每一种重要的半导体器件都作了介绍，不过，仍以晶体管在模拟和数字系统中应用的电路为主，有些电路则以单片集成电路的形式出现。

这本书的基本特点是：概念清楚，重视基本功的训练，对于该弄清楚的问题就严格推导，然后再结合工程应用加以简化，此外，还给出一些能说明问题的数据的数据级。

例如用 n 参数分析放大器的内容，从严格推导出发，得出一套计算公式，但在一定条件下可以只用两个参数计算。其它，如怎样判别一个晶体管是处于放大状态还是开关状态，也是个概念性强而又有实用意义的问题，书中对电路的分析，总是从基本定理（如克希荷夫定理，戴维宁定理等）出发进行分析，这样做不仅概念明确，

而且也有助于基本功的训练。

这本书的不足之处是有些地方叙述过细，还有些小错误（在译校过程中发现的已经作了改正）。

阅读这本书时，可以根据自己情况或通读或选读有关部分，但无论如何，都应注意学习作者对问题的分析方法，并注意训练自己的基本功。在有条件时，也可以选做一部分习题。此外，读者还应具备基本的电工和脉冲电路的知识。

限于译者的水平，译文中难免有错误和不当之处，敬请指正。

译者

作者前言

本书首先是作为电气工程系学生学习电子学的初级教科书，对于希望跟上现代半导体电子学、特别是集成电路知识的物理专业的学生和从事实际工作的工程师与科学家们，本书也是有益的。

本书采用了下列基本分析方法：在介绍一种器件时，总是给出该器件内部情况的简单物理图样。这种讨论使我们能够用合适的外部变量来表征该器件的特性，并给出小信号和大信号等效电路，然后，将该器件作为用在模拟和数字电路中的元件进行分析。对于组合器件、特别是集成电路形式的组合器件，均作为基本的系统结构单元付诸应用。总之，本书引导读者按部就班地从半导体物理到器件、模型、电路以及系统。70年代的电子电路设计主要是以采用集成电路为基础。因此，作者认为，器件、电路或系统的集成电路应尽可能早些介绍到电气工程的课程中来。

几乎每一种重要的半导体器件（从直流到视频范围），本书都一一研究。这类器件有：感温电阻，PN结二极管，齐纳二极管，隧道二极管，肖特基二极管，光电二极管、变容二极管，发光二极管，结型双极晶体管，光电晶体管，结型场效应晶体管，金属-氧化物-半导体型场效应晶体管，可控硅整流器，以及集成电阻和集成电容。本书的重点为模拟态以及数字态的结型双极晶体管。

书中主要讨论电子电路和分系统的分析和设计，所用的方法是对每一种电路都首先描述一番，以便透彻了解和直观认识该电路的情况。只有在对这些电路的工作原理有了定性的认识以后，才用数学（利用简单的微分方程）来表达定量关系。

书中分析了各种类型的电路，其中有：整流器（包括电容滤波器），削波器，取样门，逻辑门（与门，或门，非门，与非门，二极

管-晶体管门, 晶体管-晶体管门等), 低频结型双极晶体管共发射极放大器, 射极跟随器, 达林顿复合电路, 级联双极晶体管放大器(有适当的偏置), 低频共源极和共漏极场效应晶体管放大器, 数字式金属-氧化物-半导体场效应晶体管电路, 高频场效应晶体管和高频双极晶体管电路(共发射极和共集电极结构), 多级RC耦合式双极晶体管和场效应晶体管放大器的频率特性, 低频和高频反馈放大器, 补偿式反馈放大器, 振荡器, 反相和同相运算放大器, 差动放大器, 补偿式运算放大器, 模拟计算机电路, 有源滤波器, 调谐放大器, 对数放大器, 取样-保持电路, 比较器, 方波发生器, 三角波发生器, 双稳态触发器, 移位寄存器, 存储器(只读存储器ROM和随机存储器RAM), 数模转换器, 模数转换器, 功率放大器, 稳压器, 可控硅功率控制电路等。

书中着重阐述了一些分析方法以及为各种器件和电路所共有的一些要点。例如: 克希荷夫定律, 戴维宁定理, 诺顿定理, 密勒定理等, 在本书中经常使用。像负载线(负载曲线)、大范围分段线性近似、小范围线性模型之类的概念也反复使用。零点函数、波特曲线和主极点等概念, 也结合对频率特性的分析和多级放大器的补偿等加以使用。必要时, 复杂的电路也采用计算机辅助分析。对于很多种放大器的输入阻抗、输出阻抗、以及电流增益和电压增益, 书中都一一加以计算。

本书大多采用实际器件(商品器件)的特性曲线。因之读者能熟悉下列内容: 器件的一些参数的数量级, 对于一给定的产品类型而言这些参数的变化情况及其随温度的变化, 电路中不可避免的旁路电容的影响, 输入阻抗、输出阻抗和负载对电路运行情况的影响等。这些内容对学生或从事实际工作的工程师来说, 都是十分重要的, 因为待设计的电路必须在实际环境, 而不是在设想的或理想的环境中正常而又可靠地工作。

书中有720多道家庭作业题, 用以检验学生对本书提出的一些基本概念的掌握程度, 也可以使学生获得分析和设计电子电路的经

验。几乎所有的数字题都选用实际的参数和规格。学生可以参考习题答案集，采用本教科书的教师还可以从出版社得到题解手册。本书在每章的最后列出很多复习题(测试题)。

在编写本书时充分考虑了下列方面：表达方式的教学法，电路性能的阐述，采用前后一致的符号系统，绘图认真，所选用的许多例题在书中都详细算出，每章末有复习题。作者希望，上述措施将有助于利用本书进行自学，而且，能让从事实际工作的工程师觉得本书有助于在迅速发展的领域中跟上时代。

作者采用并改写了其“电子器件和电路(1967年版)”一书的很多材料，新版书和旧版书相比，有下列许多方面的不同：1967年版约有25%的内容为电子管，而本书则不再提电子管了，因为对电子设计师来说，电子管已不再重要了(但在极高压和大功率的应用方面，还可能是重要的)。物理简介这部分已被简化和压缩，而对电路的讨论，在深度和广度上都进了一步。想要更深入探讨物理学的读者，可以参阅本书最后一章，这一章全面论述了半导体器件的物理学。本书对集成电路给予进一步的重视，不仅讨论了集成电路的制造和特性，也举例列出了集成电路形式的分系统(如逻辑族，逻辑功能件和运算放大器)。低频反馈放大器这一章已全部改写，用一种前后协调而又简单的方式分析四种反馈网络。有关级联放大器和反馈放大器的高频频率特性的论述篇幅也很可观(1967年版忽视了这方面的内容)，其中包括对稳定性和补偿方法的讨论。有一章讲逻辑电路，另有一章把集成电路作为数字系统的结构单元加以论述。有一整章专讲运算放大器，而另一章则把集成电路作为模拟电路的结构单元加以论述。

出版社曾对一百多位采用过“电子器件和电路”这本书的教授征询有关的删减、增添和修改等方面的意见。作者感谢对此给予答覆的许多人，而本书也充分体现了他们的建议。特别感谢R. S. 巴耐特，W. L. 布朗和D. E. 富兰克林三位教授提出的详尽的建设性批评。作者也感谢M. G. 戴及E. S. 杨两位博士，他们阅读了本书的部分

手稿并提出了一些有益的改进意见，还要感谢 H. 塔普教授，因为本书的某些材料与密尔曼和塔普合著的“脉冲，数字和开关波形”这本书（麦克格劳-赫尔图书公司，1965 年版）有关。还要感谢给予我们巨大帮助的 J. 德拜、G. A. 卡托皮斯和 J. J. 维纳，他们完成了下列工作：得出计算机解，实验验证某些电路的特性，解算家庭作业题，最后，我们还要感谢 S. 西尔伏斯坦小姐，她以熟练的打字技术完成了本书手稿的打字任务。

J. 密尔曼
G. G. 霍尔凯斯

目 录

译者的话

作者前言

第一章 固体中的能带	1
1-1 带电粒子	1
1-2 场强、电位、能量.....	2
1-3 能量的电子伏特 (eV) 单位.....	5
1-4 原子的性质	6
1-5 原子的能级	8
1-6 元素的电子结构	12
1-7 晶体的能带理论	15
1-8 绝缘体、半导体和金属	17
复习题.....	19
参考书刊.....	20
习题.....	20
第二章 半导体中的迁移现象	25
2-1 迁移率和导电率	25
2-2 本征半导体中的电子和空穴	28
2-3 施主杂质和受主杂质	31
2-4 半导体中的电荷密度	33
2-5 锗和硅的电性质	34
2-6 霍耳效应	37
2-7 导电率的调制	39
2-8 电荷的生成和复合	42
2-9 扩散	45
2-10 连续性方程.....	47

2-11	注入的少数载流子	48
2-12	渐变掺杂的半导体内的电位变化	51
2-13	小结	54
	复习题	55
	参考书刊	56
	习题	57
第三章	结型二极管的特性	60
3-1	开路的 pn 结	60
3-2	作为整流器的 pn 结	63
3-3	pn 结二极管的各个电流分量	66
3-4	伏安特性曲线	69
3-5	伏安特性与温度的关系	73
3-6	二极管的电阻	74
3-7	空间电荷层电容(或过渡层电容) C_T	75
3-8	二极管的电荷控制描述式	80
3-9	扩散电容	82
3-10	结型二极管的开关时间	84
3-11	击穿二极管	87
3-12	隧道二极管	90
3-13	半导体光电二极管	93
3-14	光伏特效应	95
3-15	发光二极管	97
	复习题	98
	参考书刊	100
	习题	101
第四章	二极管电路	107
4-1	作为电路元件的二极管	107
4-2	负载线的概念	109
4-3	二极管的分段线性化模型	110

4-4	削波(限幅)电路	114
4-5	两个不同电平处的削波作用	117
4-6	比较器	120
4-7	取样门	121
4-8	整流器	124
4-9	其它的全波整流电路	130
4-10	电容滤波器.....	131
4-11	其它的二极管电路.....	136
	复习题.....	138
	参考书刊.....	140
	习题.....	140
第五章	晶体管的特性曲线.....	149
5-1	结型晶体管	149
5-2	晶体管的各个电流分量	152
5-3	作为放大器的晶体管	155
5-4	晶体管的构造	156
5-5	共基极电路	158
5-6	共发射极电路	163
5-7	共发射极的截止区	167
5-8	共发射极的饱和区	169
5-9	晶体管结电压的典型数值	172
5-10	共发射极电流增益.....	177
5-11	共集电极电路.....	178
5-12	晶体管特性曲线的解析表示式.....	179
5-13	最高额定电压.....	183
5-14	光电晶体管.....	186
	复习题.....	187
	参考书刊.....	189
	习题.....	190

第六章 数字电路	198
6-1 数字(二进制)系统的运用	198
6-2 “或”门	201
6-3 “与”门	204
6-4 “非”电路或“反相器”电路	206
6-5 晶体管的开关时间	210
6-6 “禁止”(选通)运算	213
6-7 异或电路	214
6-8 狄·莫根定律	216
6-9 “与非”及“或非”二极管——晶体管逻辑(DTL)门	219
6-10 改进型(集成电路型) DTL门.....	224
6-11 高阈逻辑(HTL)门	230
6-12 晶体管-晶体管逻辑(TTL)门	231
6-13 输出级.....	233
6-14 电阻-晶体管逻辑(RTL)和直接耦合晶体管逻辑 (DCTL)	236
6-15 各种逻辑族的比较.....	240
复习题.....	242
参考书刊.....	244
习题.....	244
第七章 集成电路的制造和特性	257
7-1 集成电路的工艺	257
7-2 基本的单片集成电路	258
7-3 外延生长	263
7-4 掩模和刻蚀	264
7-5 杂质的扩散	265
7-6 单片电路中的晶体管	270
7-7 单片二极管	276

7-8	集成电阻	278
7-9	集成电容和电感	281
7-10	集成电路的布局	283
7-11	其它的隔离方法	287
7-12	大规模集成(LSI)和中规模集成(MSI)	290
7-13	金属-半导体接触	291
	复习题	293
	参考书刊	295
	习题	296
第八章	晶体管的低频运用	301
8-1	共发射极接法的图解分析	301
8-2	二端口器件及 h 参数模型	305
8-3	晶体管的 h 参数模型	307
8-4	h 参数	309
8-5	晶体管三种接法的 h 参数变换公式	312
8-6	用 h 参数分析晶体管放大电路	314
8-7	戴维宁定理和诺顿定理及其推论	319
8-8	射极跟随器	321
8-9	晶体管放大器三种接法的比较	322
8-10	晶体管电路的线性分析	325
8-11	密勒定理及其对偶定理	325
8-12	晶体管级联放大器	329
8-13	简化的共发射极 h 参数模型	334
8-14	共集电极接法的简化计算	336
8-15	有发射极电阻的共发射极放大器	340
8-16	高输入电阻的晶体管电路	345
	复习题	351
	参考书刊	353
	习题	354

第九章 晶体管的偏置和热稳定性	368
9-1 工作点	368
9-2 偏置的稳定性	371
9-3 自偏置或发射极偏置	373
9-4 对 I_{CO} 、 V_{BE} 和 β 变化采取的的稳定措施.....	376
9-5 关于集电极电流稳定的一般说明	382
9-6 偏置的补偿	388
9-7 线性集成电路的偏置技术	390
9-8 热敏电阻型和感温电阻型补偿	392
9-9 热失控	393
9-10 热稳定.....	395
复习题.....	398
参考书刊.....	399
习题.....	399
第十章 场效应晶体管	405
10-1 结型场效应晶体管.....	406
10-2 夹断电压 V_P	410
10-3 结型场效应晶体管的伏安特性.....	411
10-4 场效应晶体管的小信号模型.....	414
10-5 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)	418
10-6 MOSFET 数字电路	425
10-7 低频共源和共漏放大器.....	430
10-8 场效应晶体管的偏置.....	433
10-9 场效应晶体管作为压变电阻(VVR).....	438
10-10 高频共源放大器	440
10-11 高频共漏极放大器	444
复习题.....	445
参考书刊.....	446

习题.....	447
附录 A.....	458
附录 B.....	459

第一章 固体中的能带

在这一章，我们先复习物质原子的一些有关基本特性——与原子内出现分立的电子能级有关的那些特性。我们发现，在晶体中，这类能级扩展成能带，利用这种能带结构，我们得以区别绝缘体、半导体和金属。

1-1 带电粒子

已知电子所带负电的电荷（或电量）和电子的质量分别为 1.60×10^{-19} C (Coulomb- 库伦) 和 9.11×10^{-31} kg。附录 A 给出了许多重要物理常数的数值，附录 B 列出一些换算系数和词头。于是，即可用每秒的电子数这类概念来表示普通数量级的电流了。例如，因为每个电子的电荷为 1.60×10^{-19} C。因此，每 1 库伦的电子数即为其倒数，或 6×10^{18} 左右。又因为 1 A (ampere- 安培) 的电流为 1 C/s 的电流量。因此，仅等于 1 pA (即 1 微微安或 10^{-12} A) 的电流则表示大约每秒 6 百万个电子在运动。而 1 pA 的电流实在太小了，要想测出它是相当困难的。

正离子的电荷为电子电荷的整倍数，而符号相反。单电离粒子的电荷与电子电荷相等，而双电离粒子的离子电荷则为电子电荷的二倍*。

用来表示原子质量的数是以氧的原子量等于 16 为依据的。根据这个定义，原子量为 1 的假想原子的质量为单原子氧的质量的 $\frac{1}{16}$ ，已算得为 1.66×10^{-27} kg。因此，要以千克为单位计算任何原

* [校注]这儿是指单价离子以及双价离子的电荷。

子的质量，只要将其原子量乘以 $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 就行了。表 1-1 为原子量（见13页）。

电子的半径估计为 10^{-15} m ，而原子的半径为 10^{-10} m 。这两个数值都极小，因此在以下各节中，将所有电荷都看成质点。

在硅这类半导体晶体中，每一对相邻的离子都公有两个电子，这种结构称为共价键。在某种情况下，这结构中可能会失去一个电子，键上乃留出一个“空穴”。共价键上的这类空位置可以从晶体中的上一个离子移向下一个离子，从而形成等效于自由正电荷运动那样的电流。空穴所带电荷的多少和电子电荷的多少一样。上述关于把空穴看成有效电荷之类的概念的极简单的介绍，我们在第二章中要作进一步探讨。

1-2 场强、电位、能量

按定义，作用在位于电场中的单位正电荷上的力 f （牛顿）就是该点的电场强度 ϵ 。根据牛顿第二定律，电荷为 q ，质量为 m （千克）、以速度 V （米/秒）在电场 ϵ （伏特/米）中运动的粒子，其运动规律为：

$$f = q\epsilon = m \frac{dV}{dt} \quad (1-1)$$

mks（米——千克——秒）有理化单位制对随后的研究最为方便。除非特别声明，本书始终采用这个单位制。

电位 按定义， B 点对 A 点的电位 V （伏特）是将单位正电荷从 A 点移至 B 点时克服电场所做的功。这个定义对三维电场也适用。对于一维电场，当 A 点为 X_0 、 B 点为 X 时，我们得到*

$$V = - \int_{X_0}^X \epsilon dx \quad (1-2)$$

* [原注]符号 \equiv 表示“按定义应等于”

式中, ε 表示电场的 X 分量。对上式微分即得

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx} \quad (1-3)$$

式中负号表示, 电场是由高电位区指向低电位区。在三维的情况下, 电场等于负的电位梯度。

按定义, 位能 U (焦耳) 等于电位乘以所研究的电荷 q , 即

$$U = qV \quad (1-4)$$

如果所研究的对象为一个电子, 则 q 用 $-q$ 代换 (这里 q 为电子电荷的绝对值) 而 U 和 V 的形状一样, 但正负号相反。

能量守恒定律指出: 等于位能 U 与动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 之和的总能量 W 恒为常量。因此, 在空间任一点处我们有

$$W = U + \frac{1}{2}mv^2 = \text{常量} \quad (1-5)$$

作为说明这个定律的例子, 我们研究两个相距为 d 的电极 (图 1-1 a 中的 A 和 B), 令电极 B 相对于电极 A 为负电位 V_d 。设有一个电子以速度 v_0 从电极 A 的表面走向电极 B , 试求该电子到达电

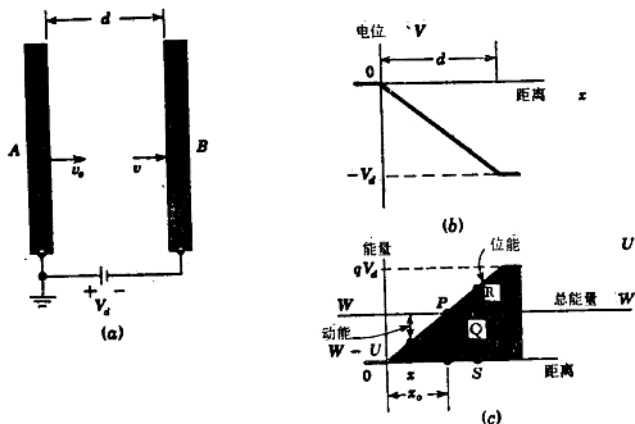


图 1-1 (a) 电子以初速 v_0 离开电极 A , 并在减速场中走向板 B ; (b) 电位; (c) 电极间的位能垒。