

数 字 集 成 电 子 学

〔美〕H. 塔伯 D. 希林 著

周 旋 谢福增
童其美 尹元茂 译
李锦林 校

科 学 出 版 社

1981

内 容 简 介

本书论述和分析了构成数字电路和系统的全部基本集成电路单元。全书共分十五章,前三章介绍了半导体器件和数字电路的基础知识,阐明了为理解全书内容所必须的各种逻辑电路的分析和设计原理;第四章至第八章为各种逻辑电路的详细分析,内容包括 RTL, IIL, DTL, HTL, TTL, ECL, MOS 门及 CMOS 逻辑;第九章至第十五章讨论了由这些逻辑门电路构成的基本数字结构单元,包括各种触发器、寄存器、计数器、半导体存储器,并介绍了如何用逻辑电路完成算术运算,讨论了数字和模拟信号之间的接口问题及单稳态和多稳态多谐振荡器的等效集成电路。书中给出的电路都是在数字电路领域里经常遇到的典型电路,书后附有四百多道习题。

本书可供从事计算技术、集成电路及电子电路等工作的科技人员参考,也可作为大学有关专业高年级学生及研究生的教材。

H. Taub, D. Schilling

DIGITAL INTEGRATED ELECTRONICS

McGraw-Hill Book Company, 1977

数 字 集 成 电 子 学

[美] H. 塔伯 D. 希林 著

周 旋 谢福增 译

童其美 尹元茂 译

李锦林 校

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1981 年 7 月第一次印刷 印张: 28 3/4
印数: 0001—9,260 字数: 664,000

统一书号: 15031·344

本社书号: 2166·15-7

定 价: 4.40 元

序 言

1956年麦格劳-希尔 (McGraw-Hill) 图书公司出版了 J. 密尔曼 (Millman) 和 H. 塔伯 (Taub) 合著的《脉冲与数字电路》一书。该书所描述的几乎完全是真空管电路,它十分详尽地反映了数字电子学的发展现状。当时,采用半导体器件和电路的时间不长,所以直至该书付印的最后时刻,作为最后一章才增添了这方面的内容。在以后的十年中,半导体器件完全取代了数字电路中的真空管。为了迅速反映这种进展,上述作者又写成《脉冲数字和开关波形》一书代替旧作,于1965年出版。在这部新著中强调了半导体的绝对重要性,而对真空管电路只是附带提及。至今大约又过去十年了,集成电路的进展促进我们写出现在这部书。不过,本书是作为1965年旧作的续篇,而不是代替旧著。在本书中,作者论述和分析了构成数字电路和系统的全部基本的集成电路单元。本书可作为教科书使用,引用的都是最新材料。同旧著一样,作者力图符合教学的需要,力求做到讲解清晰、明瞭易懂,又不影响阐述的深度和广度。因此,我们期望本书不仅在大学教室中起作用,而且对那些想掌握这一领域发展现状的读者也可作为自学用书。

纽约市立学院 (The City College of New York) 在为电气工程三、四年级学生安排的两学期课程中,以及两门研究生的基础课程中都利用了本书的材料。此外,在为贝尔实验室的技术人员、国家航空和航天局以及洛克希德飞机公司的工程技术人员安排的两学期课程中和为乔治·华盛顿大学的继续进修计划提供的短期课程中,均利用了本书中的材料。

作者假定读者已具有半导体器件和电路的基础知识,不过,觉得在第一章中再复习一下与半导体器件开关方式运用有关的某些重要内容仍有裨益。半导体器件具有颇为复杂的并且是高度非线性的伏安特性曲线。精确分析半导体电路会导致相当复杂的数学分析。在第一章中,我们提出某些方便的简化,由此可获得良好的而且是有用的近似结果。

第二章的第一部分讨论运算放大器。这类主要是线性运用而非开关方式运用的放大器不是我们特意关心的器件。不过,我们发现在许多场合下,运算放大器正是作为数字电路元件出现的。而且,顺理成章地从运算放大器引导到本章第二部分的比较器的讨论,比较器确实是很重要的开关器件。

第三章引入逻辑变量的概念、布尔代数以及分析由逻辑门组成的电路的方法,阐述卡诺图和它的各种应用。前提是假定读者并不熟悉这方面的内容,本章还阐明了为理解全书内容所必须的各种逻辑电路的分析和设计原理,在这个意义上可以认为本章内容是很完备的。另一方面,在逻辑设计课程中必然包括本章的内容,因此凡已熟悉这些材料的读者可以略去本章。

第四章开始研究逻辑门的电子学原理。第一部分是电阻-晶体管逻辑 (RTL), 第二部分是集成注入逻辑 (IIL)。现在新的设计已不采用 RTL, 然而有许多理由表明讨论一下这族逻辑电路是值得的。作为最早广泛采用的一族集成逻辑电路,含有这种电路的许多设备仍在运行中。此外,由于这种电路十分简单,以此作为媒介,通过它们来阐明逻辑

门电子学中许多带普遍性的重要基本概念和原理是很理想的。同时,这族电路为集成注入逻辑提供了有意义的布局关系,集成注入逻辑是最近研制成的许多族逻辑的一种。第五章讨论二极管-晶体管逻辑(DTL)。在这族电路中有一种广泛应用于高噪声环境条件下的高阈值逻辑(HTL)。

第六章和第七章分别讨论晶体管-晶体管逻辑(TTL)和射极耦合逻辑(ECL),它们是现在应用最广的饱和及非饱和逻辑电路族。因此,对这些电路进行了颇为广泛的讨论。特别是对于ECL,要求读者对信号沿传输线的传输特点有一定的了解,不熟悉传输线传输的读者可在附录A中找到适当的介绍。在上面提及的《脉冲数字和开关波形》一书的第三章中,对此有更详尽的讨论。第八章介绍金属-氧化物-半导体(MOS)逻辑和互补对称(CMOS)逻辑。

在讨论(第四章至第八章)各族逻辑电路之后,从第九章开始考虑由这些门电路构成的基本数字结构单元。第九章相当详细地探讨了各种类型触发器的工作原理,并分析了许多有代表性的商品部件的电路。我们力图阐明怎样使用触发器来避免在同步系统中一定会产生的定时问题。第十章讨论寄存器和计数器,阐述任意模数的同步计数器和脉动计数器的设计步骤,还给出用寄存器产生伪随机时序和其它特定时序的方法。

第十一章考虑如何用逻辑电路完成算术运算。通常由于乘法和除法都可通过加法(或减法)运算的算法来实现,所以重点放在加法(和减法)运算上。我们非常仔细和清晰地阐明了如何表示负数,以及如何通过采用实际执行加法运算的逻辑电路有效地用1的补数和2的补数表示法去进行减法。提出了用饱和逻辑进行加法的溢出校正,实际上作为任何一种微处理器中心的运算逻辑单元正是这样运用的。第十二章讨论半导体存储器。显然,磁心存储器正处于为半导体系统所取代的时期,所以我们略去了磁心存储器的讨论。本章包括时序存储器、只读存储器以及随机动态和静态存储器。此外,还讨论了包括场效应晶体管、电荷耦合器件(CCD)和双极结型晶体管等存储器的电子学原理。

在第十三章和第十四章中,我们讨论数字和模拟信号之间的接口问题。第十三章介绍模拟门、模拟多路传输器、取样和保持电路以及积分和清除电路等;第十四章介绍数字-模拟和模拟-数字变换系统。所考虑的各种模拟-数字变换系统都是相当有代表性的并被广泛采用的系统。最后,在第十五章中讨论定时电路——单稳和非稳多谐振荡器的等效集成电路。

本书给出的电路都是在数字领域里遇到的一些典型电路。书中给出四百多个作业习题,范围既涉及一般练习也包括比较复杂的设计问题。

我们衷心感谢同事们和学生们给予的鼓励。我们特别要感谢J. 加洛尼克博士对本书的评论以及对许多材料提出的批评意见,由于爱德华等先生的好意,我们才能得到大量莫托罗拉公司出版的很有用的技术文献。我们特别希望表示对J. 鲁宾女士的谢意,因为她出色地打印了本书手稿。

H. 塔伯 (Taub)

D. 希林 (Schilling)

目 录

序言

第一章 电子器件	1
1.1 理想半导体二极管	1
1.2 二极管特性随温度的变化	3
1.3 二极管的过渡电容	4
1.4 齐纳二极管	4
1.5 集成电路中的二极管	6
1.6 作为开关应用的晶体管	6
1.7 晶体管特性的解析表达式	8
1.8 截止时的晶体管	10
1.9 饱和时的晶体管开关	11
1.10 埃伯斯-莫尔方程应用于饱和区	12
1.11 场效应晶体管	17
1.12 金属-氧化物-半导体场效应晶体管	20
1.13 MOS 开关	22
1.14 MOSFET 开关的输入-输出特性	24
1.15 互补对称 MOSFET	25
1.16 输入保护电路	27
1.17 二极管的开关速度	27
1.18 贮存时间和过渡时间	29
1.19 肖特基二极管	30
1.20 双极型晶体管的开关速度	30
1.21 FET 器件的开关速度	33
1.22 上升、下降时间和延迟时间	33
第二章 运算放大器和比较器	36
2.1 运算放大器	36
2.2 虚地	37
2.3 运算	37
2.4 输出阻抗	39
2.5 运算放大器的电子学	40
2.6 放大器总体	42
2.7 采用运算放大器作同相放大	42
2.8 同相放大器的阻抗	43
2.9 实际考虑	44
2.10 补偿	44
2.11 共模抑制比	45
2.12 运算放大器的性能	45

2.13	比较器	46
2.14	集成电路放大器比较器	47
2.15	集成电路放大器比较器的计算	48
2.16	实际比较器的特性	52
2.17	施密特触发电路	53
2.18	施密特触发器实例	55
第三章	逻辑电路	58
3.1	引言	58
3.2	一个二进制变量的函数	58
3.3	两个二进制变量的函数	59
3.4	或函数	60
3.5	与非操作和或非操作	61
3.6	异或操作	63
3.7	其他函数	64
3.8	逻辑变量	64
3.9	0,1 表示法	66
3.10	必要和充分的运算	67
3.11	布尔代数公式	68
3.12	实例	70
3.13	二进制数制	71
3.14	格雷 (GREY) 反射二进制码	73
3.15	逻辑函数的标准形式: 积的标准和	74
3.16	和的标准积	75
3.17	逻辑函数的最小项和最大项标志法	77
3.18	逻辑函数的卡诺图表示	78
3.19	用于二,三和四个变量的卡诺图表示	80
3.20	用卡诺图化简逻辑函数	81
3.21	卡诺图上更大的合并	83
3.22	用于五个和六个变量的卡诺图	84
3.23	卡诺图的使用	85
3.24	未用最小项表达的函数的卡诺图画法	88
3.25	用与非门或者或非门综合	90
3.26	不完全指定的函数	91
第四章	电阻-晶体管逻辑 (RTL) 和集成注入逻辑 (IIL)	93
4.1	电阻-晶体管逻辑门	93
4.2	直接耦合晶体管逻辑 (DCTL) 门电路	94
4.3	DCTL 门的抢电流效应	96
4.4	电阻-晶体管逻辑 (RTL)	96
4.5	扇出	98
4.6	级联 RTL 门的输入-输出电压特性	101
4.7	RTL 缓冲器	104
4.8	RTL 异或门	106
4.9	产品规格	107

4.10	RTL 门的并联	109
4.11	工作电压规定	110
4.12	传输延迟时间	111
4.13	集成注入逻辑 (IIL)	113
4.14	IIL 的实际结构	116
4.15	一个 IIL 译码器	118
4.16	电流和电压电平	119
第五章	二极管-晶体管逻辑	121
5.1	二极管-晶体管逻辑门	121
5.2	扇出	123
5.3	集成电路 DTL 门	124
5.4	输入-输出特性	126
5.5	DTL 门的产品规格	128
5.6	固线与连接	130
5.7	高阈值逻辑	132
5.8	HTL 门的输入-输出特性	133
5.9	产品规格	133
第六章	晶体管-晶体管逻辑	135
6.1	晶体管-晶体管逻辑(简称 TTL)	135
6.2	TTL 门和 DTL 门的比较	136
6.3	输入晶体管	136
6.4	有源提升负载	137
6.5	忽略输入晶体管的 TTL 门的输入-输出特性	138
6.6	输入晶体管的输入-输出特性曲线	142
6.7	多发射极晶体管	144
6.8	TTL 门的输入伏安特性曲线	145
6.9	TTL 门的输出伏安特性曲线	146
6.10	生产厂家的数据及规范;温度依赖关系及噪声容限	148
6.11	电源电流的消耗	151
6.12	TTL 门的类型	152
6.13	肖特基 TTL	155
6.14	其他 TTL 逻辑门	156
第七章	发射极耦合逻辑	157
7.1	引言	157
7.2	ECL 门	158
7.3	ECL 晶体管结电压	158
7.4	或输出的转移特性	159
7.5	或非输出	161
7.6	产品规格: 转移特性	162
7.7	扇出	162
7.8	工作速度	164
7.9	具有温度补偿的偏置电源	165

7.10	ECL 门的多种逻辑功能	166
7.11	负电源电压	167
7.12	电平转换	168
7.13	ECL 门的互连	170
第八章	MOS 门	176
8.1	MOS 场效应晶体管的解析式	176
8.2	温度效应	178
8.3	MOS 倒相器	178
8.4	CMOS 倒相器	180
8.5	CMOS 倒相器转移特性的计算	180
8.6	MOS 门	182
8.7	MOS 门的上升时间	183
8.8	下降时间	184
8.9	CMOS 门	185
8.10	CMOS 门的上升和下降时间	186
8.11	产品规格	187
8.12	BJT 门和 CMOS 门的接口	188
第九章	触发器	191
9.1	引言	191
9.2	术语	191
9.3	作为记忆元件的触发器	192
9.4	采用与非门的触发器	193
9.5	没有抖动的开关	193
9.6	时钟触发器	195
9.7	触发器的内部连接: 主从触发器	197
9.8	AC 耦合边沿触发的触发器	200
9.9	时钟 AC 耦合触发器	202
9.10	电容储存触发器	204
9.11	传输延时触发器	205
9.12	JK 触发器	206
9.13	D 型触发器	207
9.14	RTL SR 触发器	209
9.15	DTL 触发器	209
9.16	RTL 传输延时触发器	212
9.17	ECL 触发器	214
9.18	JK AC 耦合 ECL 触发器	215
9.19	产品性能指标	218
9.20	TTL JK 触发器	218
9.21	MOS 触发器	220
第十章	寄存器和计数器	224
10.1	移位寄存器	224
10.2	时钟控制	226

10.3	串行-并行数据变换	226
10.4	循环进位	226
10.5	右移、左移寄存器	226
10.6	脉动计数器	227
10.7	改善计数器速度的方法	230
10.8	非二进制计数器	232
10.9	模数 3 计数器	232
10.10	模数 5 计数器	234
10.11	封锁	236
10.12	不同模数的计数器的组合	238
10.13	其他计数器的设计	239
10.14	升-降脉动计数器	240
10.15	升-降同步计数器	241
10.16	环行计数器	242
10.17	时序发生器	244
第十一章	算术运算	249
11.1	两个二进制数的加法	249
11.2	全加器	250
11.3	串行加法器	251
11.4	并行加法	252
11.5	多于两个数的加法	254
11.6	快速加法器;超前进位	256
11.7	减法	258
11.8	补数	259
11.9	用寄存器表示带符号的数字	261
11.10	用补数和加法实现减法	263
11.11	2 的补数的加法和减法	263
11.12	1 的补数的加法和减法	264
11.13	具有符号的数字序列的加法和减法	266
11.14	饱和加法器	266
11.15	定标	268
11.16	乘法	270
11.17	除法	271
11.18	运算逻辑单元(简称 ALU)	272
第十二章	半导体存储器	274
12.1	存储器的种类	274
12.2	移位寄存器式的时序存储器	275
12.3	MOS 寄存器单元	277
12.4	双相无比移位寄存器	280
12.5	四相无比寄存单元	281
12.6	CMOS 寄存单元	282
12.7	静态移位寄存单元	284
12.8	三相静态寄存单元	285

12.9	只读存储器	286
12.10	ROM 的实施	288
12.11	可编程序和可擦 ROM	289
12.12	ROM 的应用	290
12.13	双极晶体管随机存取存储单元	291
12.14	其他双极晶体管存储单元	293
12.15	MOS 随机存取存储器	294
12.16	RAM 的结构	298
12.17	多片半导体存储器集成电路的并联	300
12.18	电荷耦合器件 (CCD)	302
12.19	电荷的存储	303
12.20	电荷的转移	304
12.21	输入和输出电路	307
第十三章	模拟开关	309
13.1	模拟门的基本工作原理	309
13.2	开关电路的应用	310
13.3	二极管传输门	316
13.4	双极晶体管门	324
13.5	场效应晶体管门	327
13.6	运算放大器	327
13.7	以运算放大器为负载的 FET 门	328
13.8	取样和保持电路	330
13.9	FET 门驱动器	334
13.10	CMOS 门电路	336
13.11	模拟开关的应用	338
13.12	取样-保持放大器的产品指标	341
第十四章	模拟-数字变换	342
14.1	引言	342
14.2	取样原理	342
14.3	时间分割多路传输	344
14.4	量化	345
14.5	权电阻 D/A 变换器	347
14.6	R-2R 梯形 D/A 变换器	349
14.7	用于 D/A 变换器的开关	352
14.8	电流驱动的 D/A 变换器	354
14.9	倒梯形 D/A 变换器	356
14.10	D/A 变换器的输入与输出的格式	358
14.11	D/A 变换器的指标	361
14.12	A/D 变换器: 并联比较型	363
14.13	逐次逼近型变换器	367
14.14	计数式变换器	371
14.15	双斜率变换器	373
14.16	各种变换器的比较	374

14.17	采用电压-频率转换的变换器	375
14.18	采用电压-时间转换的变换器	377
14.19	A/D 变换器的指标	378
14.20	S/H 和 A/D 变换器的互连	378
14.21	δ 调制	379
14.22	自适应 δ 调制	382
第十五章	定时电路	384
15.1	CMOS 多谐振荡器	384
15.2	CMOS 无稳态多谐振荡器	388
15.3	采用 ECL 门的单稳态多谐振荡器	389
15.4	具有短定时间隔的多谐振荡器	392
15.5	集成电路 TTL 单稳态多谐振荡器	394
15.6	集成电路定时器	396
附录	传输线	398
A.1	引言	398
A.2	特性阻抗	399
A.3	反射	400
A.4	多次反射	400
A.5	波形上升时间的影响	401
习题		403

第一章 电子器件

正如模拟电路一样,用于数字处理电路的电子器件包括二极管、双极型晶体管和场效应晶体管。假定读者是熟悉这些器件的,但是主要熟悉它们作为线性元件在模拟电路中的应用。这些器件在数字电路中主要以非线性方式即开关方式应用,它们在导通和非导通两种极端状态之间迅速地转换。在本章中我们着重复习这些器件作为开关应用时的性能。

1.1 理想半导体二极管

对于一个理想的 pn 结二极管,其电流 I 和电压 V 的关系由下式表示:

$$I = I_0(e^{V/V_T} - 1) \quad (1.1-1)$$

如图 1.1-1(a) 所示,当电流从二极管的 P 端流向 n 端时,电流 I 为正。电压 V 是从 P 端到 n 端的电压降。当 V 为正时,二极管处于正向偏置。符号 V_T 表示温度的电子伏当量,并由下式给出:

$$V_T \equiv \frac{kT}{e} \quad (1.1-2)$$

式中 k = 玻耳兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

e = 电子电荷 $= 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$

T = 绝对温度 K

代入上式求得 $V_T = T/11600 \text{V}$, 在室温下 ($T \approx 300 \text{K}$) $V_T \approx 25 \text{mV}$ 。

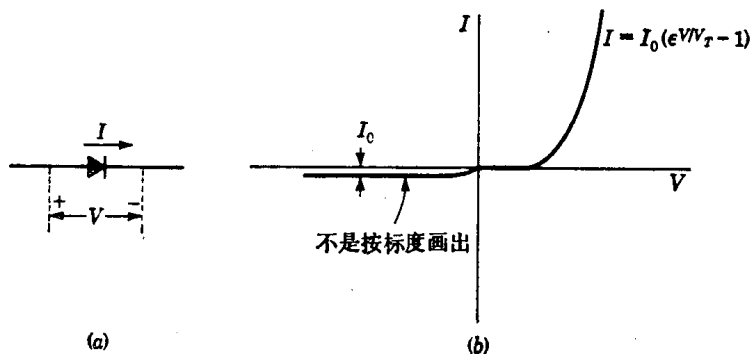


图 1.1-1 (a) 二极管方程(1.1-1)中所用符号 I 和 V 的定义; (b) 理想二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线的形状大体上如图 1.1-1(b) 所示。当电压 V 为正并且几倍于 V_T 时,式 (1.1-1) 中的指数项远大于 1, 括号内的 -1 项可以忽略。因此,除了在原点附近的小范围外,电流随电压按指数增加。当二极管反向偏置, $|V|$ 比 V_T 大几倍时 $|I| \approx I_0$ 。所以,反向电流是与所加反向偏压无关的常数,因而, I_0 叫做反向饱和电流。因为 I_0 的

数值比 I 的典型值小好几个数量级,所以图 1.1-1(b) 中所示的电流 I_0 使用大大放大的标度。

前面提到,我们关心的是作为开关运用的二极管(和其他元件)。反向偏置时,二极管是一个断开的开关;正向偏置时,二极管是一个闭合的开关。通常,在我们感兴趣的电路中,二极管作为闭合开关出现在电路时,通过的典型电流为毫安数量级,也即 $0.1 \sim 10\text{mA}$ 的范围。在二极管上加多大的电压才能产生这个正向额定电流,当然与二极管的截面积有关。如果在外加电压 V 的作用下,一个二极管产生 $1\mu\text{A}$ 的正向电流,另一个截面积大一千倍的二极管则产生 1mA 的电流。

在制造二极管时,不论作为分立元件还是集成电路中的元件,从经济上考虑,总是根据需要采用最小的截面积。特别在集成电路(简称 IC)的情况下,由于一个芯片包含有许多电路元件,所以一个元件截面积的少量增加,其影响会扩大许多倍,以致硅片尺寸显著增加。换句话说,同样尺寸的芯片只能容纳较少的二极管。截面积的选择还要考虑到给二极管一个合理的安全容限,从而使得二极管内部产生的热量可以逸散,而不致引起所不允许的温升。此外,为把二极管的欧姆电阻减小到允许数值,截面积必须足够大。

二极管模型 我们发现,在检验用于小功率电路的商品硅二极管的伏安特性时,毫安数量级的电流对应于大约 0.75V 的正向电压。集成电路中的二极管具有类似的特性,要产生毫安范围的正向电流也需要大约 0.75V 。以后要经常引用这个电压,我们给它指定一个符号 $V_o = 0.75\text{V}$ 。这样,当正向二极管电压为 V_o 时,开关二极管处于闭合位置。

如果要使二极管开关处在断开位置上,事实上也并不一定要反向偏置,只要求加在二极管上的电压所对应的正向电流比 V_o 所对应的电流小到可以忽略。我们认为,二极管的电流减小到 V_o 所对应电流的 1% 时便可忽略。与这个减小了的电流相对应的二极管电压称为 V_r 。

如果对应于电压 V_o 和 V_r 的电流是 I_o 和 I_r , 那么从式(1.1-1)得到

$$I_o = I_0(e^{V_o/V_T} - 1) \quad (1.1-3a)$$

$$I_r = I_0(e^{V_r/V_T} - 1) \quad (1.1-3b)$$

由于 e^{V_o/V_T} 和 e^{V_r/V_T} 都远大于 1, 就有

$$\frac{I_o}{I_r} = 100 = e^{(V_o - V_r)/V_T} \quad (1.1-4)$$

由此

$$V_o - V_r = V_T \ln 100 \approx 120\text{mV} \quad (1.1-5)$$

因为 $V_o \approx 0.75\text{V}$, 所以 $V_r \approx 0.63\text{V}$ 。

我们发现, V_r 的数值采用 0.65V 比 0.63V 方便, 这样 V_o 和 V_r 之差恰好是整数。 $V_r = 0.65\text{V}$ 时 $V_o - V_r = 0.1\text{V}$, 很容易证明, 与 0.1V 电压变化对应的电流比 $I_o/I_r = 55$ 。然而我们假定, 二极管电压 $V < V_r$ 时没有电流流通, 所以准确的 I_r 值就无关紧要了。如果用电压 V_r 时电流为“零”这样的电流标度画出二极管特性曲线, 则曲线如图 1.1-2 所示。 V_r 称为开启电压。

不能想象二极管能够精心制作到正向压降恰好等于 0.75V 。另一方面, 必须注意由

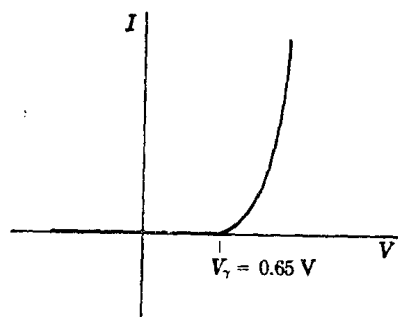


图 1.1-2 实际硅二极管在 $V_r = 0.65\text{V}$ 时开启

于二极管特性的指数性质,较大的电流变化对应于电压的较小变化.例如,假定某个二极管在 $V_o = 0.75\text{V}$ 时产生电流 I_o ,再假定在某种应用中,要求同一个二极管载运 $2I_o$ 的电流,那么很容易证明(习题 1.1-2), V_o 只变化 17mV ,即 V_o 值的 2%.

现将有关二极管电压的全部讨论归纳如下.因为硅二极管开启电压 $V_r = 0.65\text{V}$,因此可以认为,当二极管电压 V 小于 0.65V 时二极管电流小到足可忽略;当 V 增加到 0.65V 以上时才开始明显增长.此外,只要发现二极管在电路中载运了预定的工作电流,我们就认为二极管电压为 0.75V .有时,可能出现二极管在某个中间区域工作的情况,这时我们取二极管电压为 0.7V .

给上述各电压指定的绝对数值是考察无数集成的、分立的电路以及大量普通二极管的产品说明书的综合经验而取得的.对二极管的这种处理方法完全可以得到足够精确的结果,而又避免了在电子电路分析中试图考虑二极管真正伏安特性曲线所造成的繁杂.

1.2 二极管特性随温度的变化

二极管特性依赖于温度.在式(1.1-1)中,这种依从性明显地表现在参数 V_r 上,同时也表现在反向饱和电流 I_o 与温度有关这一事实上.可以发现, I_o 是温度的指数函数,在室温附近,温度每增加 10°C 左右 I_o 增加一倍.图 1.2-1 表示一个典型的分立硅二极管在几种温度下的反向饱和电流.这组曲线表明,许多二极管的反向电流不是常数,而是随着反向电压的增加而增加的. I_o 的这种增加是由于二极管的表面漏电,以及在二极管结的过渡区内因碰撞产生的新的载流子造成的.实际上在反向测得的 I_o 比在正向符合式(1.1-1)所需的数值大几个数量级,注意到这一点是很有意义的.

图 1.2-2 是代表性曲线,它表示温度对二极管正向特性曲线的总的影晌.可以看到温度改变的主要影响是使曲线沿着横座标移动,而保持二极管特性曲线的一般形式不变.因此对于固定的电流来说,温度增加 ΔT 引起电压减少 ΔV .由理论估算和实验验证可

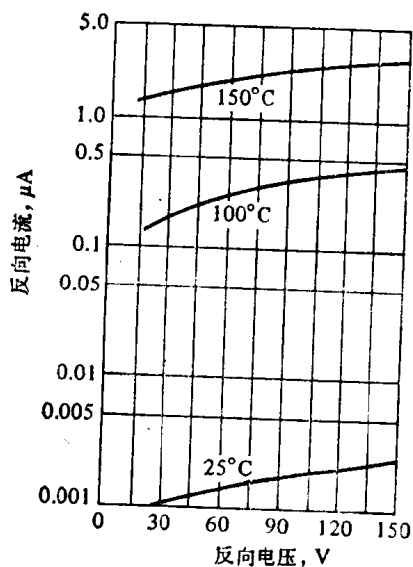


图 1.2-1 1N461 型硅二极管反向饱和电流随温度及反向电压的变化

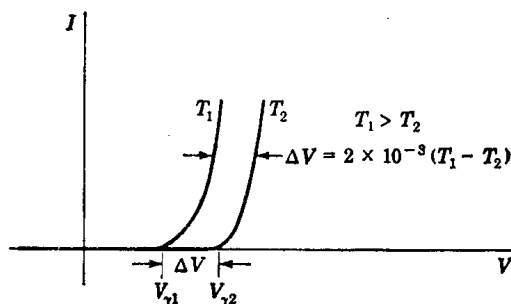


图 1.2-2 温度对二极管正向伏安特性的影响

以得到

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} \approx -2\text{mV}/^{\circ}\text{C} \quad (1.2-1)$$

严格地讲,温度灵敏度 $\Delta V/\Delta T$ 依赖于温度也依赖于工作电流。一般说来 $\Delta V/\Delta T$ 的大小随着温度及电流的增加而减小。式(1.2-1)给出的数值适于室温(25°C)的情况。为了简单起见,通常可采用式(1.2-1)的数值,因为误差是很小的。

1.3 二极管的过渡电容

驱动二极管到反向偏置状态可用来关断电流或者阻止信号传输。当二极管用于处理快速波形或高频信号的电路中时,我们必须考虑跨接在反向偏置结上的电容,这个电容叫做势垒电容或过渡电容 C_T 。如果这个电容足够大,那么由反向偏置二极管的低电导所限制的电流将通过这个电容流过。

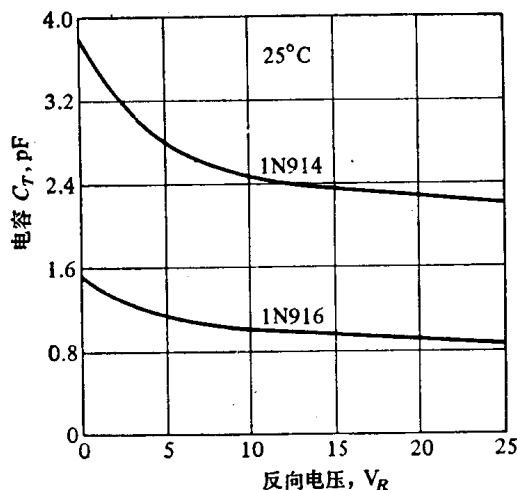


图 1.3-1 硅二极管 1N914 和 1N916 的典型势垒电容随反向电压的变化

用于高速电路的二极管具有约 1 到 10pF 的过渡电容。这个电容随着反向电压的增加而减小,图 1.3-1 表示两个典型二极管的情况。过渡电容的简单近似表达式为

$$C_T = \frac{C_0}{(1 + V_R)^n} \quad (1.3-1)$$

式中 V_R 为反向偏置电压, C_0 为 $V_R = 0$ 时的电容,与突变结或缓变结相对应, n 分别为 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ 。

1.4 齐纳二极管

二极管两端反向电压的不断增加终将达到二极管的击穿点,亦即二极管开始突然允

许流过大量的电流。图 1.4-1(a) 表示包括击穿区在内的二极管反向电压特性。设计一种在击穿区工作而又具有适当功耗的二极管，可用做参考电压源或恒压源。这样的二极管叫做雪崩二极管、击穿二极管或齐纳二极管。图 1.4-1(b) 所示方法表示这种特性的应用。选择输入电源 V_i 和电阻 R ，使二极管起初工作在击穿区。这时二极管上的电压也就是负载电阻 R_L 上的电压为 V_Z ，二极管电流为 I_Z ，见图 1.4-1(a)。因为在击穿区二极管电流较大的变化只引起二极管电压较小的变化，因此二极管就调整负载电压使其不随负载电流以及输入电源电压 V_i 而变化。另外当负载电流或电源电压变化时，二极管电流将适应这种变化，以保持一个接近恒定的负载电压。在电路工作情况使二极管电流下降到二极管伏安特性曲线拐点 I_{ZK} 附近以前，二极管继续起着调整作用。二极管电流的上限取决于二极管的额定功耗值。

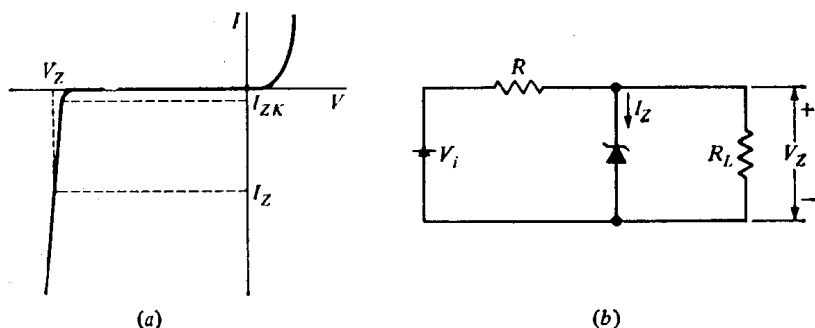


图 1.4-1 (a) 雪崩二极管或齐纳二极管的伏安特性曲线；(b) 使用齐纳二极管调整由于负载电流和电源电压的变动引起的 R_L 上电压变动的电路

因反向电压增加导致二极管击穿有两种机理。其一，热激发电子和空穴从外加电场获得足够的能量，使价电子脱离其化学键产生新的载流子，新的载流子通过破坏化学键的过程又产生附加载流子。这种积累过程叫做雪崩倍增，它引起大量反向电流，二极管则处于雪崩击穿区。即使开始时载流子没有获得足以破坏化学键的能量，由于存在强电场，通

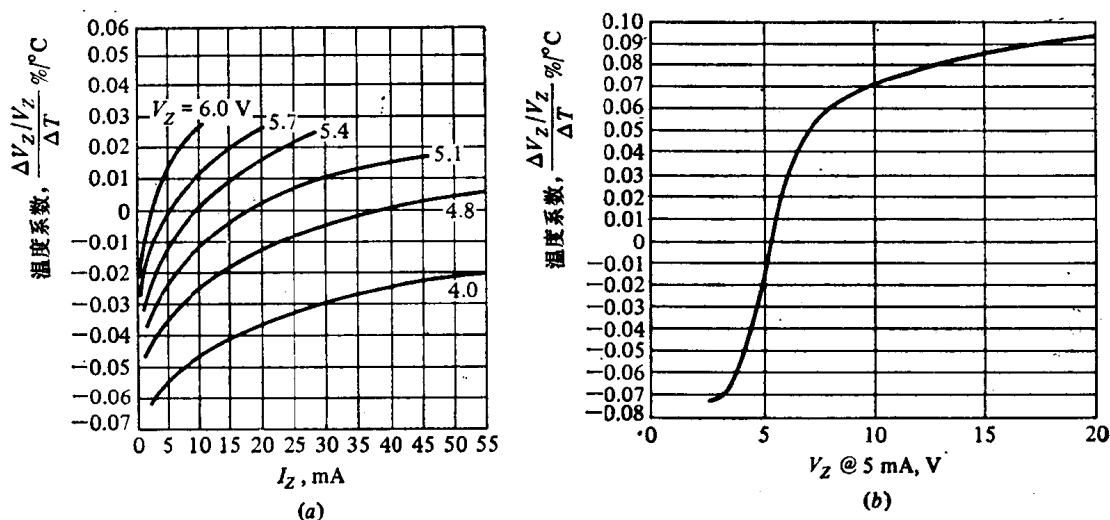


图 1.4-2 一些工作电压不同的齐纳二极管的温度系数。(a) 温度系数作为工作电流的函数；(b) 温度系数作为工作电压的函数。电压 V_Z 在 $I_Z = 5\text{mA}$ 时测得(从 25°C 到 100°C)

过化学键的直接破裂也可能引起击穿。这种情况下的击穿叫做齐纳击穿。现在我们知道,在击穿电压约低于 6V 的二极管中齐纳效应起重要作用。虽然如此,齐纳这一术语通常也用于在高电压下发生的雪崩击穿。以雪崩击穿方式工作的硅二极管可提供从几伏到几百伏的保持电压和高达 50W 的额定功耗。

同半导体器件一样,齐纳二极管的温度灵敏度同样使人感兴趣。图 1.4-2 所示的参考电压的温度依赖性是一种可以预期的典型情况。在图 1.4-2(a) 中,画出几种二极管的参考电压的温度系数随通过二极管的工作电流而变化的曲线,规定它们在 5mA 时的电压为参考电压。温度系数是温度改变摄氏 1 度时二极管参考电压变化的百分数。图 1.4-2(b) 画出二极管电流固定在 5mA 时温度系数随齐纳电压变化的曲线,绘成这条曲线的数据取自一系列齐纳电压不同而额定功耗固定的二极管。从图 1.4-2 的曲线可以看到,温度系数可正可负,一般在 $\pm 0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 的范围内。同时看到,参考电压高于 6V 时,涉及的物理机理为雪崩倍增,温度系数为正;而参考电压低于 6V 时,涉及真正齐纳击穿的情况,温度系数为负。

1.5 集成电路中的二极管

在集成电路制造中,必须适当选择各层的几何尺寸和掺杂使最重要的元件晶体管的特性为最佳。使用额外的掩模和扩散来制造二极管通常不是经济可行的。结果,二极管往往就是适于二极管运用的晶体管。图 1.5-1 示出适于晶体管用作二极管的五种方法。在图 1.5-1(a) 中,二极管两端为晶体管的基极和发射极,集电极悬空;在图 1.5-1(b) 中,除了集电极和基极相连外,二极管两端与图 1.5-1(a) 相同;等等。

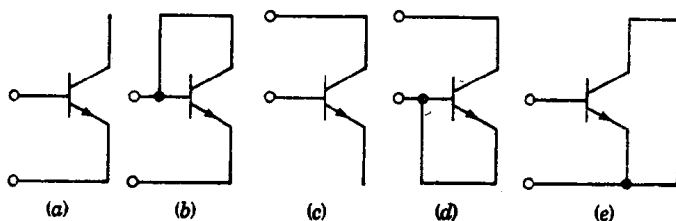


图 1.5-1 适于晶体管用作二极管的五种方法

在集成电路中可取的二极管形式通常是图 1.5-1(b) 所示的形式。一般说来,在给定的正向电流下它具有最小的正向压降、最小的贮存时间(见 1.18 节)和最小的反向偏置结电容;另一方面,它的击穿电压偏低,约为 7 V 左右。但由于在数字集成电路中遇到的电源电压难得超过 5 或 6 V,这种限制并不是严重的缺点。

1.6 作为开关应用的晶体管

图 1.6-1(a) 中的晶体管用作将负载 R_L 和电源 V_{cc} 接通或断开的开关,除了晶体管可以电气方式工作并且其响应更迅速外,它起着与图 1.6-1(b) 中的机械开关同样的作用。机械开关装置在开关断开时不允许电流流通,而当开关闭合时整个电压 V_{cc} 加在负载 R_L