

数字电子技术 自学释疑

张圣训 郑元耀 吴建华 编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书以阐述基本原理与列举大量题例相结合的形式，系统地阐明了数字电子技术基础的主要问题，书中还充实了目前教材中讲得比较少而实际工作中又常碰到的内容。本书可作为本科、电大、函大、职大等各类高等学校有关专业学生的自学用书或参考书，也可供有关的工程技术人员及广大的自学者参考。

数字电子技术自学释疑

张圣训 郑元耀 吴燮华 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷



开本850×1168 1/32 印张13.875 字数360 000

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数0 001— 4 650

ISBN 7-04-001621-4/TN·96

定价4.35元

前 言

本书是编者根据“数字电子技术基础”课程教学的需要，以阐述基本原理与列举大量题例相结合的形式系统地进行编写，编写时更着重于重点和难点。现有教材中讲得比较少而实际工作中又常涉及的某些内容也得到了比较多的充实，如第四、六部分中所介绍的利用中规模集成电路进行数字电路的设计；第六部分中有输入的时序电路（非计数型时序电路）的设计；第八部分中各种A/D转换器的评价及误差分析，第九部分中以简单计算机为典型例子的数字系统的设计，以及第十部分中数字电路的故障分析等。第七部分所介绍的以TTL与非门等效电路为基础的单稳触发器与多谐振荡器的计算。第五部分所介绍的各种触发器的特点及使用中的问题等都有各自的特色。第一、二、三部分所介绍的基本概念与分析方法贯穿于数字电路的所有部分，而且是根据学习中容易发生的问题进行讨论，内容比较丰富。现有教材中讲得比较透彻的某些问题，如各种功能触发器的相互转换等，本书不作过多重复。本书既可作为各类高等学校学生学习用的教学参考书，也可供有关的工程技术人员及广大自学者分析、设计、调试数字电路的参考。

本书第一、二、三部分由郑元耀编写，第四、七部分及附录由吴燮华编写，第五、六、八、九、十部分由张圣训编写，全书由张圣训统稿。

本书承北京工业学院王远、刘炳尧、李庆常、刘素贞四位老师审阅，写出了详细的修改意见，纠正了某些欠妥和错误之处，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

1987年9月

目 录

第一部分 数字电路中半导体器件基本知识	1
1.1 PN 结以及半导体二极管的单向导电原理	1
1. PN 结的形成过程——扩散与漂移的动态平衡概念	1
2. 半导体二极管的单向导电特性	3
1.2 二极管在数字电路中的三种近似等效法	10
1. 理想二极管等效法	10
2. 恒定管压降等效法	10
3. 平均正向内阻等效法	10
1.3 三极管共射接法的工作状态及近似等效电路	14
1. 放大状态及其近似等效电路	14
2. 截止状态及其近似等效电路	16
3. 饱和状态及其近似等效电路	17
4. 三极管倒置工作状态	19
第二部分 基本逻辑门电路	22
2.1 分立元件与非门的工作原理	22
1. 电路结构	22
2. 工作原理	23
2.2 有源泄放 TTL 与非门的电压传输特性与输入负载特性	33
1. 电压传输特性	33
2. 输入负载特性	36
2.3 有源泄放 TTL 与非门的等效电路	40
1. 与非门输出端的等效电路	40
2. 与非门输入端的等效电路	41
2.4 ECL 门电路	55
1. 典型的 ECL 电路结构	55
2. 工作原理	56

3. ECL的电压传输特性	58
2.5 CMOS 传输门 (TG 门) 及其应用举例	64
1. CMOS 传输门结构及工作原理	64
2. TG 门组成的模拟开关及三态门	66
第三部分 逻辑代数及逻辑函数的简化法	77
3.1 三种基本逻辑运算	78
1. 逻辑加 (或运算)	78
2. 逻辑乘 (与运算)	78
3. 逻辑非 (非运算)	79
3.2 布尔代数的基本定律、等式与定理	80
1. 五个基本定律	80
2. 六个变量与常量关系等式	80
3. 摩根定理 (反演定律)	80
3.3 布尔代数的三大规则	81
1. 代入规则	81
2. 反演规则	82
3. 对偶规则	82
3.4 化简逻辑函数的常用公式	83
3.5 逻辑函数的卡诺图简化法	94
1. 函数的最小项 “与-或” 表达式及其与真值表的关系	94
2. 卡诺图画法及其与真值表、最小项的关系	98
3. 逻辑函数的卡诺图表示及化简	99
3.6 含有无关最小项及随意最小项的函数化简	107
1. 无关最小项和随意最小项的含义	107
2. 含有随意项或无关项函数的化简	108
第四部分 组合逻辑电路的分析与设计	112
4.1 设计组合逻辑电路的技巧	112
1. 什么叫组合逻辑电路	112
2. 设计组合逻辑电路的步骤	113
3. 简化逻辑表达式的原则	114
4. 组合逻辑电路设计举例	114

4.2	组合逻辑电路的设计方法	123
1.	常用的组合逻辑电路有哪些	123
2.	怎样判断组合逻辑电路的功能	124
3.	怎样直接从逻辑图列出真值表	126
4.	有无关项的组合逻辑电路的分析有何特点	127
4.3	用中、大规模集成块设计组合电路的特点	128
4.4	并行加法器的设计方法	128
1.	二进制并行加法器的设计方法	128
2.	怎样用四位全加器实现 BCD 码至余 3 码的转换	135
3.	怎样设计十进制加法器	136
4.5	幅值比较器的设计思想	140
4.6	译码器的工作原理和用途	142
1.	译码器的工作原理	142
2.	为什么可以用译码器来实现逻辑函数	144
3.	怎样用集成译码器构成数据分配器	147
4.	如何扩充译码器	149
5.	二-十进制译码器的设计思想	150
4.7	怎样用数据选择器实现逻辑函数	153
1.	数据选择器的工作原理	153
2.	怎样用数据选择器实现逻辑函数	156
3.	用数据选择器实现逻辑函数举例	160
4.	用译码器和数据选择器实现逻辑函数的异同	164
4.8	用只读存储器 (ROM) 设计组合电路	164
1.	ROM 的原理	164
2.	如何用 ROM 实现逻辑函数	166
3.	用 ROM 设计组合电路举例	169
4.	ROM 的类型	171
4.9	可编程逻辑阵列 (PLA) 的编程方法	171
1.	PLA 的工作原理	171
2.	怎样列出 PLA 的编程表	173
3.	PLA 编程方法举例	176

第五部分 触发器	178
5.1 如何理解基本 RS 触发器的锁存作用	178
5.2 什么是基本 RS 触发器的开关动态特性	185
5.3 与同步 RS 触发器比较同步 JK 触发器在功能上有何改善	188
5.4 为什么同步 JK 触发器不能接成 T' 触发器使用	193
5.5 主从结构的触发器为什么不存在空翻问题; 为什么仍存在不定态问题; 主、从触发器是否可能出现同时工作的不正常情况	196
5.6 主从结构触发器的输入信号是否允许随时变化	200
5.7 为什么说维持阻塞 D 触发器是正沿触发的触发器	202
5.8 如何构成负沿触发的 JK 触发器	204
5.9 各种带时钟触发器的输出变化与输入的关系有何区别	206
5.10 触发器的开关动态特性	210
5.11 如何得出触发器激励表	212
5.12 触发器的简单应用	214
第六部分 时序逻辑电路	218
6.1 如何分析时序逻辑电路	218
1. 时序电路分析的目的	218
2. 如何列出状态转换表	218
3. 如何画状态图	220
4. 如何得出状态方程和输出方程	222
6.2 时序电路驱动方程的写法及其意义	223
6.3 如何进行时序逻辑电路的状态简化	224
1. 状态简化的步骤	224
2. 状态的分配	229
6.4 怎样应用时序电路的激励表设计时序电路	230
6.5 如何应用状态方程和特性方程的匹配设计时序电路	247

1. 具有 D 触发器的时序电路设计	248
2. 使用 JK 触发器的时序电路设计	249
6.6 同步计数器的分析方法	252
1. 二进制加法计数器分析	253
2. 二进制可逆计数器分析	254
3. 扭环形计数器	254
6.7 如何进行同步计数器设计	257
1. n 位二进制计数器设计	257
2. 模 N 二进制计数器设计	260
3. 用中规模集成并行置数计数器组成任意模 N 计数器	267
6.8 几种异步计数器的分析	271
1. n 位二进制异步计数器 (纹波计数器)	271
2. 异步 BCD 码计数器	275
6.9 寄存器、计数器和存储器的基本概念及其区别是 什么	277
6.10 何谓并行置数寄存器	278
6.11 如何用中规模集成寄存器实现一个时序逻辑电路	282
6.12 移位寄存器的工作原理及数据的串行传送	285
6.13 中规模集成并行置数双向移位寄存器的结构分析	288
6.14 如何进行串行加法器的分析与设计	289
6.15 怎样用中规模集成计数器或移位寄存器产生时序	293
1. 取字时间的产生	293
2. 顺序脉冲信号的发生	295
3. 用扭环形计数器产生顺序脉冲信号	296
6.16 存储器是如何与外界通信的	297
6.17 存储器有哪些类型	300
6.18 集成电路随机存取存储器是如何工作的	301
第七部分 脉冲波形的产生和整形	305
7.1 分析脉冲电路的几个要点	305
1. 矩形脉冲波的主要参数	305
2. TTL 与非门的关门电阻 R_{OFF} 与开门电阻 R_{ON}	307

3. 计算一阶 RC 电路的重要公式	308
4. 近似计算的规定	308
7.2 单稳态触发器的工作原理	313
1. 怎样分析微分型单稳态触发器的工作原理	313
2. 微分型单稳态触发器电压波形分析举例	315
3. 积分型单稳态触发器分析举例	320
4. 由 CMOS 门电路构成的单稳态触发器的工作原理	325
7.3 单稳态触发器的应用	330
7.4 如何分析多谐振荡器的振荡过程	331
1. 多谐振荡器两个暂稳态的分析	331
2. 多谐振荡器各点电位的估算	333
3. 怎样改变多谐振荡器的频率	336
7.5 施密特触发器怎样工作	337
1. 带电平偏移二极管施密特触发器的工作原理	337
2. 回差可调的施密特触发器的工作原理	340
7.6 555 定时器	341
1. 555 定时器的用途和结构	341
2. 如何用 555 定时器组成单稳态触发器	343
3. 555 定时器组成多谐振荡器的方法	346
4. 如何用 555 定时器组成方波发生器	348
第八部分 数模 (D/A) 和模数 (A/D) 转换	350
8.1 如何理解数模和模数转换器是模拟信号和数字信号之间的接口	350
8.2 数模 (D/A) 转换器结构框图中各部分起什么作用	351
8.3 数模转换器中的加权电阻网络有什么缺点	352
8.4 $R-2R$ 梯形 (T 形) 网络如何应用于数模转换器中	354
8.5 数模转换器有哪些主要参数	358
8.6 如何构成模数 (A/D) 转换器	360
8.7 为何要进行幅值的量化	365

8.8	两种开环式模数转换器的特点是什么	367
8.9	跟踪式模数转换器有哪些优缺点	371
8.10	为什么逐步逼近型模数转换器是用得最广的模数转换器之一	373
8.11	如何提高积分型模数转换器的转换速度	379
8.12	产生模数转换器的误差的主要因素有哪些	381
8.13	如何减弱对模数转换器的干扰	385
8.14	噪声引起的误差	386
第九部分 数字系统		388
9.1	大的数字系统有何特点	388
9.2	数字系统中如何实现寄存器间的数据传送	390
1.	总线传送	391
2.	存储器传送	394
9.3	如何用基本逻辑部件构成典型的数字系统——计算机	396
1.	什么是指令码	396
2.	系统的实现	399
第十部分 数字电路的故障分析		406
10.1	什么叫做数字电路的故障	406
10.2	故障有哪些类型	406
10.3	如何检测和排除静态故障	409
1.	输入和输出状态的“粘附”	410
2.	搭接(短接)式故障	411
3.	断路	412
4.	没有电源	412
5.	元件插接的错误	412
6.	元件型号搞错	413
7.	电源电压不正确	413
10.4	如何检测和排除动态故障	413
1.	冒险现象	413
2.	竞争	414

3. 串扰	414
4. 经过电源耦合的纹波干扰	416
5. 反射	418
6. 暂时性的集成电路故障	419
7. 不相等的传输延迟	419
8. 建立时间和保持时间不满足	419
9. 开电源初始化出错	419
10.5 几个故障分析实例	420
附录1 原码、反码和补码的表示方法	427
附录2 常用二-十进制编码表	430
主要参考文献	431

第一部分 数字电路中半导体器件基本知识

1.1 PN结以及半导体二极管的单向导电原理

1. PN 结的形成过程——扩散与漂移的动态平衡概念

通过一定的工艺，使同一块半导体单晶的一侧均匀地掺杂三价元素的受主杂质，形成多数载流子（简称多子）为空穴的P型半导体。而另一侧均匀地掺入五价元素的施主杂质，形成多子为电子的N型半导体。那么在P型与N型半导体的交界处，由于P型中的空穴浓度大于N型，因此空穴将向浓度低的N区扩散，形成空穴扩散电流 i_{pp} 。同理，N区电子也向P区扩散，形成电子扩散电流 i_{nn} ，如图 1-1-1(a) 所示。当P区空穴穿越界面扩散到N区后，就成为N区的少数载流子（简称少子），它一方面继续向N区中扩散，另一方面在扩散过程中与N区中电子碰撞复合。同理，N区电子扩散到P区后，也会与P区中空穴复合。这样，界面左侧P区中的空穴，被N区过来的电子复合而消失，只剩下固定在晶格上的受主杂质负离子；界面右侧N区的电子，也与P区来的空穴复合而消失，剩下晶格上的施主杂质正离子，从而在靠近界面两侧出现了没有电子与空穴的空间离子电荷区，称“耗尽区”或“PN结”。这些固定在晶格上不能自由移动的正、负离子，形成由N区指向P区的自建内电场 E_{in} ，如图 1-1-1(b) 所示。这内电场有两个作用：首先，它阻碍扩散运动的进行，使扩散电流 $i = i_{pp} + i_{nn}$ 减少；其次，它的出现，引起P区中本征热激发的少子（电子）在这电场力作用下流向N区（称漂移运动），形成漂移电流 i_{pn} 。同理，N区少子（空穴）也向P区漂移，形成 i_{np} 。显然，在界面处漂移电流 $i' = i_{pn} + i_{np}$ 与扩散电流 $i =$

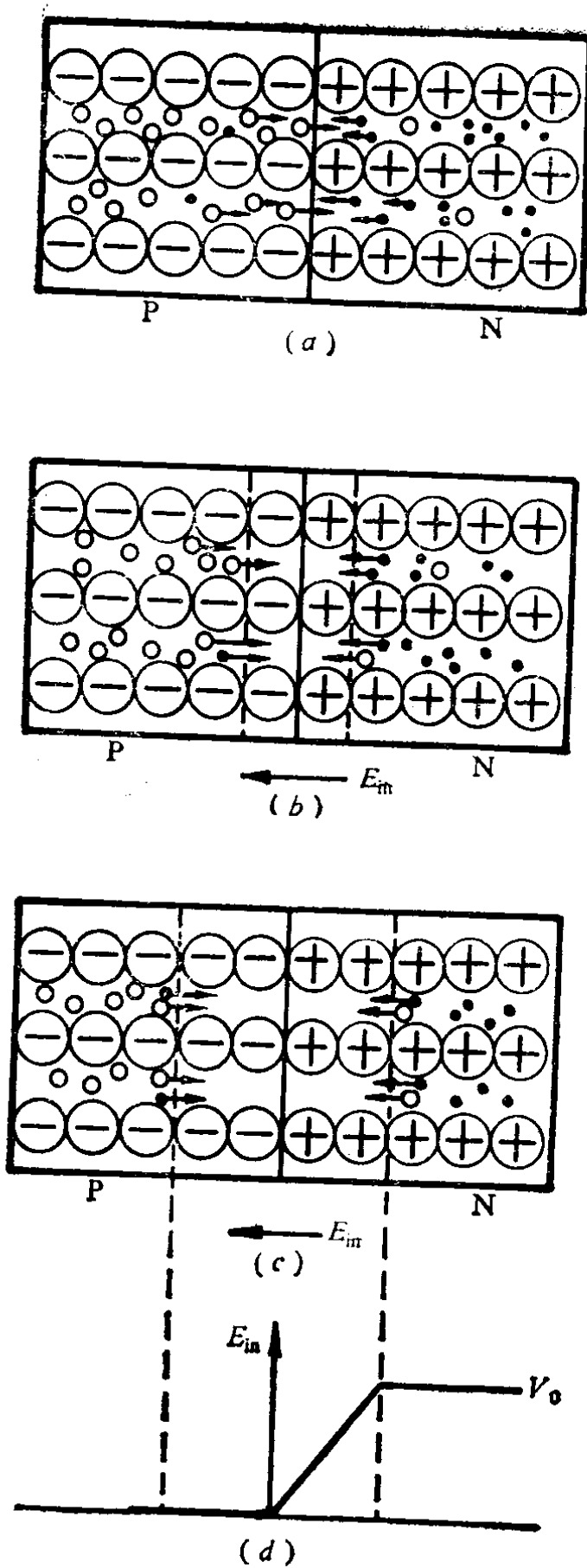


图1-1-1 PN结形成过程

$i_{TP} + i_{NN}$ 的方向是彼此相反的。在扩散运动初期，耗尽区较薄，自建内电场 E_{in} 所引起的漂移运动小于扩散运动，即 $i > i'$ ，因此界面两侧的耗尽区还在不断地扩大。这进一步使 E_{in} 增强， i 又下降， i' 继续上升，直至 $i - i' = 0$ 时，达到扩散与漂移运动的动态平衡。这时从 P 区扩散到 N 区去的空穴，刚好被 N 区中漂移到 P 区去的空穴所补偿，电子也是这样。因此动态平衡后，耗尽区的宽度（它与 P 区、N 区掺杂浓度有关，其典型值约 $0.5\mu\text{m}$ ）以及自建内电场 E_{in} 均相对稳定，如图 1-1-1(c) 所示，这就是 PN 结形成的过程。由此可知，动态平衡后，P 区的空穴和 N 区的电子要穿过耗尽区，必须克服自建内电场的阻力而做功。因此从位能的观点看，N 区的电位将高于 P 区，这就是 PN 结所形成的接触电位差 V_0 。如果近似地认为耗尽区中杂质离子是均匀分布的，那么 PN 结中电位分布可用图 1-1-1(d) 表示。所以耗尽区又称势垒区或阻挡层。

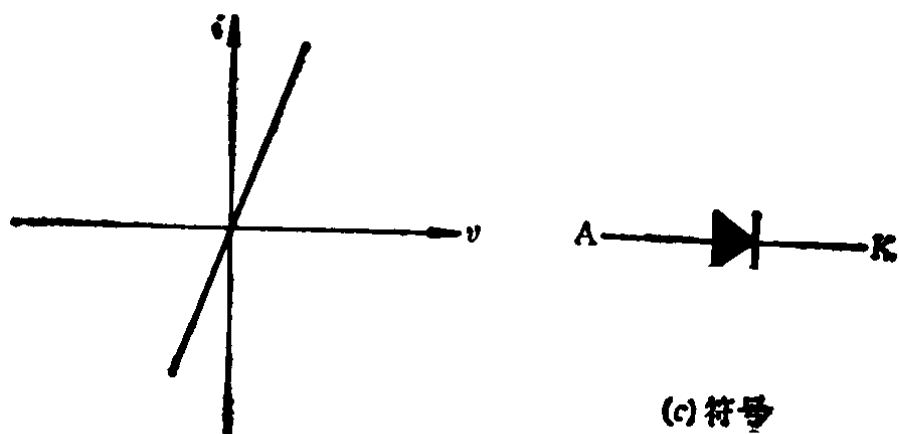
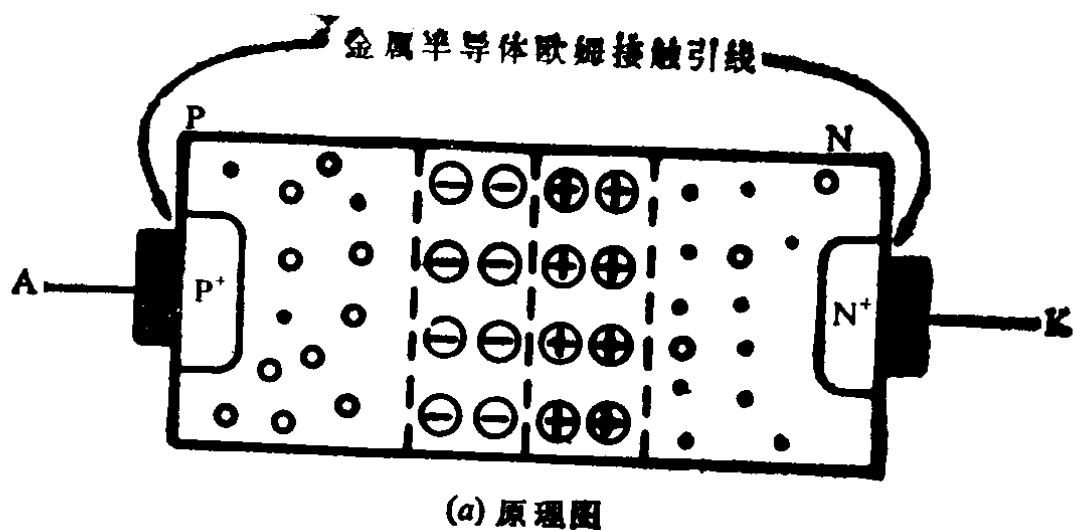
2. 半导体二极管的单向导电特性

(1) 半导体二极管结构

图 1-1-2(a) 为典型面接触型二极管示意图，两端金属引线与半导体连接处制成欧姆接触型，这种接触型要求接触处的半导体掺杂浓度高于 $10^{20}/\text{cm}^3$ 。图中以 P^+ 、 N^+ 表示高掺杂浓度的 P 型和 N 型半导体，这时接触处的伏安特性如图 1-1-2(b) 所示，相当于一个很小的线性电阻。如果接触处半导体掺杂浓度较低（如低于 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ ），金属与半导体之间将会产生单边突变结，也有单向导电性能。将图 1-1-2(a) 所示结构加上管壳封装就构成半导体二极管。

(2) 半导体二极管为什么具有单向导电性

这可从 PN 结外加正、反向电压时的物理过程得到解释。所谓外加正向电压，是指外电源正极接 P 侧，负极接 N 侧，这时管子两端电压 $v_D > 0$ （也称正向偏置），反之称为外加反向电压（也



(b) 金属半导体接触伏安特性

图1-1-2 平面型二极管

称反向偏置)。

当外接反向电压时，如图 1-1-3 所示，这时外电场方向与 PN 结开路时自建内电场的方向一致。显然外电场促使 N 区电子和 P 区空穴离开 PN 结界面，使耗尽区加宽。外加反偏导致总的内电场增强，从而破坏了 PN 结开路时扩散与漂移运动之间的动态平衡，使载流子运动朝不利于扩散有利于漂移的方向发展。结果使 i_D 下降， i' 增大，这时通过二极管的电流 $i_D = i - i' < 0$ 。当反偏足够大后，将使扩散无法进行， $i = i_{PP} + i_{NN} = 0$ ，而漂移电流 $i' = i_{PN} + i_{NP}$ 随总的内电场增强而增大。不过由本征热激发

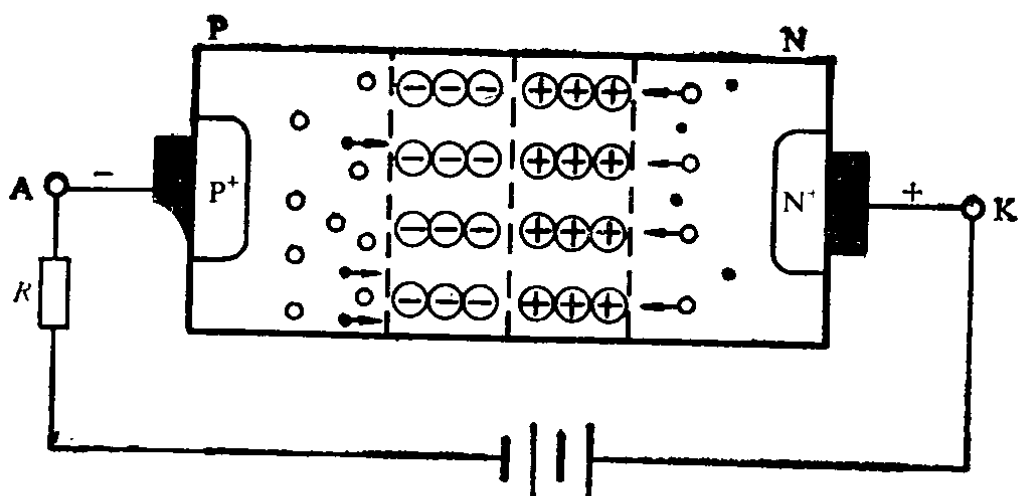


图1-1-3 外加反向电压

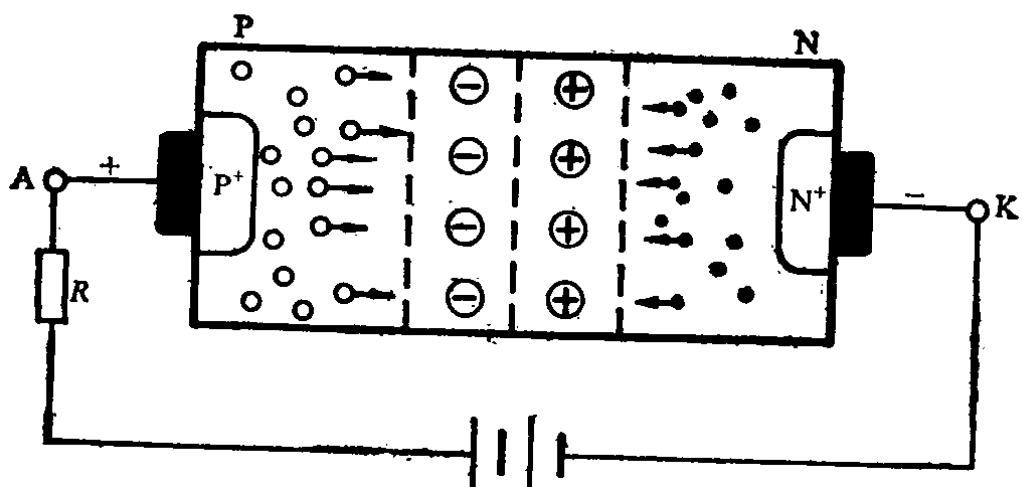


图1-1-4 外加正向电压

所产生的P区和N区的少子十分有限，因此在室温下，即使PN结附近单位时间内热激发净生的少子全部都参与漂移运动， i' 将趋向一个微小的恒定值。这个恒定漂移电流是从N区流向P区，称为反向饱和电流，用 I_0 表示。显然 I_0 与温度有密切关系，根据半导体理论推导：

$$\text{反向饱和电流: } I_0 = CT^m e^{-v_{G0}/\eta V_T} \quad (1-1-1)$$

$$\text{二极管电流: } i_D = I_0 (e^{v_D/V_T} - 1) \quad (1-1-2)$$

式中：常数 C 与结面积及半导体材料有关； T 为热力学温度； v_{G0} 为半导体禁带宽度 E_G 除以电子电荷量 q ，即 $v_{G0} = \frac{E_G}{q}$ ； $V_T =$

$\frac{kT}{q}$, k (玻耳兹曼常数) $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 电子电荷量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; v_D 为二极管两端电压 (V); η 与 m 两常数与半导体材料有关, 对于硅管: $\eta = 2$, $m = 1.5$, $v_{G0} = 1.205 \text{ V}$; 对于锗管: $\eta = 1$, $m = 2$, $v_{G0} = 0.785 \text{ V}$.

在结温 27°C ($T = 300\text{K}$) 时, $V_T = \frac{300}{11600} = 0.026 \text{ V}$. 这时若外加反向电压 $v_D < 0$, 则可按式 (1-1-2) 画出二极管电流 i_D 与 v_D 的关系曲线, 如图 1-1-5 中 OA 段所示. 显然这条曲线是过原点的, 当 $v_D/V_T = -3$ 以后, $e^{-8} \gg 1$, 所以 $i_D \approx -I_0$, 这也定量地反映了上述反向饱和电流的物理过程. 对硅管而言, I_0 约为 nA 数量级, 因此二极管外加反向电压时几乎呈阻断状态.

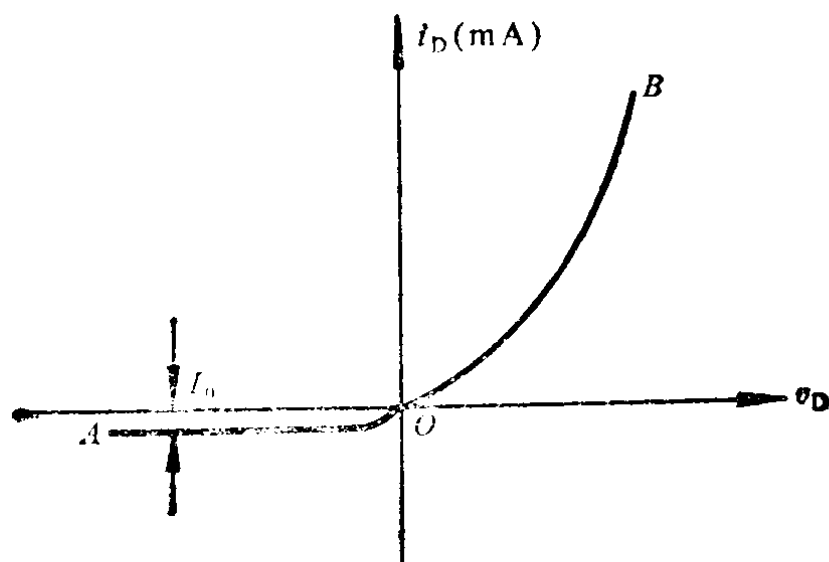


图1-1-5 二极管的电流电压关系曲线

当外加正向电压 ($v_D > 0$) 时, 也可由式 (1-1-2) 画出 i_D 与 v_D 的关系曲线 OB . 当 $v_D/V_T > 2$ 以后, 二极管正向伏安特性曲线基本上按指数急速上升. 从物理概念上看, 正向电压所产生的外电场使 P 区多子 (空穴) 与 N 区多子 (电子) 都向 PN 结靠拢, 中和了一部分耗尽区的杂质离子, 使耗尽区宽度变薄 (如图 1-1-4 所示). 即正向电压导致总的内电场减弱, 结果有利于扩散,