



普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

数字电路与 逻辑设计基础

项华珍 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

数字电路与逻辑设计基础

主 编 项华珍

参 编 徐秀平 张京玲 王玉青 何文丰 黄培先

机械工业出版社

“数字电路与逻辑设计”是电气、电子信息类专业本科学生的技术基础课程，是学习复杂数字系统的基础。本书以教育部《数字电路与逻辑设计课程教学基本要求》为依据，以工程应用为目标，突出基本概念和基本分析方法，强调理论联系实际，注重培养学生的创新意识及解决实际工程应用问题的能力。

全书共10章，主要内容有：半导体器件基础、数字逻辑基础、集成门电路、组合逻辑电路、双稳态触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、脉冲波形的产生和整形、D/A转换和A/D转换、实验。全书加强了应用电路的分析和举例，为便于自学，书后附录给出了部分习题参考答案。本书内容深入浅出、偏重实践，讲解简明扼要，便于自学。

本书配有免费的PPT电子教学课件，需要的人员可和作者联系。联系邮箱：xiangjane100@163.com。

本书可作为高等院校电子信息、电气、自动化类等相关专业的教材，也可作为电子技术工程人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

数字电路与逻辑设计基础/项华珍主编. —北京：机械工业出版社，2016.8

普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-54561-3

I. ①数… II. ①项… III. ①数字电路—逻辑设计—高等学校—教材
IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第211842号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：徐凡 责任编辑：徐凡

责任校对：刘志文 陈延翔 封面设计：张静

责任印制：李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22印张·538千字

标准书号：ISBN 978-7-111-54561-3

定价：43.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官网：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

前 言

本书依据教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会制定的《数字电路与逻辑设计课程教学基本要求》编写。适用对象为本科电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、自动化、测控技术与仪器以及计算机科学与技术等各专业。“数字电路与逻辑设计”是这些专业的一门重要的技术基础课，使学生建立对数字系统的基本概念，熟悉常用的基本器件，掌握基本的分析方法，从而解决实际数字系统的分析和设计问题。

当今，电子技术的应用越来越广泛，特别是单片机技术已经渗透到生产、生活的各个领域。很多学校为便于学生从入学开始进入自主研发训练，拟将单片机课程提前，这也需要将数字电子技术课程提前。所以，本书将本应在模拟电子技术中讲授的半导体器件放在本书的第1章。

为贯彻落实《教育部关于全面提高高等教育质量的若干意见》精神，必须全面加强技术型、应用型人才的培养，以服务为宗旨，以就业为导向，改革课程体系，改革学科型教学方式，重点突出教学要与实际工程应用相结合。为此，我们提出本书的编写计划。在目前教学学时少、新技术更新快的情况下，本书未编入那些非基础理论知识，以及和实际应用关系不密切的内容，并编入很多工程应用实例和一些常用芯片的介绍和应用讲解。在编写上采取了以下一些做法。

(1) 在讲授基础理论时，以“够用”和“必需”为尺度，删除了与器件应用无直接关系的内容，同时又保持了课程体系的完整性。

(2) 在讲授集成电路时，重点介绍外部特性和正确的使用方法，对电路内部仅做简单的定性分析。

(3) 在处理传统内容和新型技术关系时，削减了过时的内容，增加了新型器件及应用的内容。

(4) 在处理理论和实际的关系时，加强了工程实例的分析和设计，并增加了综合性设计实践的内容。

(5) 为加强工程实践，便于学生实验，将实验内容也作为本书的最后一章编入。

本书由五邑大学信息工程学院的多位老师合作完成。其中，项华珍任主编，负责全书的统稿和组织，并编写第1~3章；张京玲编写第4、7章；何文丰编写第5章；徐秀平编写第6章；王玉青编写第8、9章；黄培先编写第10章；相应章的编者编写附录部分的习题参考答案。



在本书的编写过程中，得到了五邑大学主管领导和信息工程学院领导的大力支持，周开利、曾军英、胡一丁等老师提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中存在的不妥之处，敬请广大读者批评指正，编者不胜感激。

编 者

目 录

前言

第1章 半导体器件基础	1
1.1 半导体	1
1.1.1 半导体及其特性	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN结及其单向导电性	4
1.2.1 PN结的形成	4
1.2.2 PN结的单向导电性	5
1.3 半导体二极管	6
1.3.1 二极管的表示符号、外形及结构	6
1.3.2 二极管的伏安特性	6
1.3.3 二极管的主要性能参数	8
1.3.4 二极管的等效模型	10
1.4 特殊二极管	12
1.4.1 稳压管	12
1.4.2 发光二极管	13
1.4.3 光敏二极管	14
1.5 二极管的应用示例	14
1.5.1 钳位电路	14
1.5.2 限幅电路	15
1.5.3 继电器驱动管保护电路	15
1.6 晶体管	16
1.6.1 晶体管的分类及结构	16
1.6.2 晶体管的工作原理	16
1.6.3 晶体管的特性曲线	18
1.6.4 晶体管的主要参数	21
1.7 场效应晶体管	22
1.7.1 结型场效应晶体管	23
1.7.2 绝缘栅场效应晶体管	26
1.8 场效应晶体管的主要参数及特点	30
1.8.1 场效应晶体管的主要参数	30
1.8.2 场效应晶体管的特点	31
判一判	32
选一选	32
做一做	33
第2章 数字逻辑基础	36
2.1 数制和码制	36



2.1.1	几种常见的数制	36
2.1.2	不同数制之间的转换	38
2.1.3	二进制算术运算	40
2.1.4	带符号位数的表示方法与减法运算	40
2.1.5	二进制编码	41
2.2	逻辑代数的基本运算	44
2.2.1	3种最基本的逻辑运算和门电路	44
2.2.2	复合逻辑运算(复合门)	45
2.3	逻辑函数的表示方法及其相互转换	46
2.3.1	由真值表求函数式和逻辑图	46
2.3.2	由函数表达式求真值表	47
2.3.3	已知逻辑图写逻辑表达式	48
2.3.4	由真值表画波形图	48
2.3.5	由波形图求函数的真值表	48
2.4	逻辑代数的公式和运算规则	49
2.4.1	基本公式	49
2.4.2	常用公式	50
2.4.3	逻辑代数的基本运算规则	50
2.5	逻辑函数的公式法化简	51
2.5.1	逻辑函数表达式标准形式和最简式含义	51
2.5.2	常用的公式法化简方法	52
2.6	逻辑函数的卡诺图化简	54
2.6.1	逻辑函数的最小项表达式	54
2.6.2	逻辑函数的卡诺图表示	55
2.6.3	用卡诺图化简逻辑函数	57
2.6.4	具有无关项的逻辑函数及其化简	59
	判一判	61
	选一选	62
	做一做	62
第3章	集成门电路	66
3.1	晶体管反相器	66
3.1.1	晶体管的开关特性	67
3.1.2	晶体管反相器的工作原理	67
3.1.3	晶体管的开关时间	68
3.1.4	晶体管反相器的带负载能力	69
3.2	TTL集成反相器	70
3.2.1	TTL反相器的工作原理	70
3.2.2	TTL反相器的外特性及主要电气参数	71
3.2.3	其他类型的TTL门	77
3.2.4	TTL数字集成电路的各种系列	81
3.2.5	其他双极性集成电路	84
3.3	CMOS集成门电路	84
3.3.1	MOS管的开关特性	84
3.3.2	CMOS反相器的结构及工作原理	85



3.3.3 CMOS反相器的外特性及主要电气参数	86
3.3.4 其他类型的CMOS集成门电路	89
3.4 TTL和CMOS集成电路的使用及接口	92
3.4.1 两类数字集成门电路的使用	92
3.4.2 两类数字集成门电路的接口	94
3.5 门电路应用实例	97
判一判	98
选一选	98
做一做	99
第4章 组合逻辑电路	104
4.1 组合逻辑电路的描述	104
4.2 组合逻辑电路的分析	105
4.3 组合逻辑电路的设计	107
4.4 常用中规模组合逻辑电路集成器件	111
4.4.1 加法器	111
4.4.2 数值比较器	113
4.4.3 编码器	116
4.4.4 译码器	119
4.4.5 数据选择器	126
4.5 常用中规模组合逻辑电路集成器件的应用	128
4.5.1 利用译码器实现逻辑函数	128
4.5.2 利用数据选择器实现逻辑函数	130
4.6 组合逻辑电路的竞争与冒险	133
判一判	135
选一选	135
做一做	136
第5章 双稳态触发器	140
5.1 基本RS触发器	140
5.1.1 电路结构	140
5.1.2 工作原理	141
5.1.3 特性表及动作特点	142
5.2 同步RS触发器	143
5.2.1 电路结构	143
5.2.2 工作原理	143
5.2.3 特性表、动作特点及特性方程	144
5.3 主从触发器	145
5.3.1 主从RS触发器	145
5.3.2 主从JK触发器	146
5.4 边沿触发器	149
5.4.1 边沿JK触发器	149
5.4.2 边沿D触发器	151
5.4.3 T触发器及T'触发器	154
5.5 触发器的应用	155
判一判	157



选—选	157
做—做	158
第 6 章 时序逻辑电路	161
6.1 时序逻辑电路的描述	161
6.2 时序逻辑电路的分析	163
6.2.1 同步时序逻辑电路的分析	163
6.2.2* 异步时序逻辑电路的分析	166
6.3 同步时序逻辑电路的设计	168
6.4 寄存器及计数器	173
6.4.1 寄存器	173
6.4.2 计数器	179
6.5 时序逻辑电路的应用	196
6.5.1 环形计数器	196
6.5.2 顺序脉冲发生器	197
6.5.3 序列信号发生器	198
判—判	199
选—选	199
做—做	200
第 7 章 半导体存储器	205
7.1 概述	205
7.2 存储器的分类	206
7.2.1 ROM 的分类	207
7.2.2 RAM 的分类	207
7.3 ROM 存储器的工作原理	208
7.3.1 电路结构	208
7.3.2 工作原理	208
7.4 存储器容量的扩展	210
7.4.1 位扩展	210
7.4.2 字扩展	211
7.4.3 字和位复合扩展	213
7.5 存储器的应用	214
7.5.1 存储芯片与单片机联合应用	214
7.5.2 存储芯片与 A/D 或 D/A 芯片配合应用	215
判—判	217
选—选	217
做—做	218
第 8 章 脉冲波形的产生和整形	220
8.1 概述	220
8.2 集成门电路组成的脉冲单元电路	221
8.2.1 由门电路组成的施密特触发器及集成的施密特触发器	221
8.2.2 由门电路组成的单稳态触发器及集成的单稳态触发器	226
8.2.3 由门电路组成的多谐振荡器	233
8.3 555 定时器及应用	239
8.3.1 555 定时器的电路结构与功能	239



8.3.2	由 555 定时器组成的施密特触发器	241
8.3.3	由 555 定时器组成的单稳态触发器	242
8.3.4	由 555 定时器组成的多谐振荡器	245
8.4	应用实例	248
	判一判	251
	选一选	251
	做一做	252
第 9 章	D/A 转换和 A/D 转换	257
9.1	概述	257
9.2	D/A 转换	258
9.2.1	权电阻网络 D/A 转换器的构成和基本原理	259
9.2.2	倒 T 形 D/A 转换器的构成和基本原理	261
9.2.3	权电流型 D/A 转换器的构成和基本原理	263
9.2.4	具有双极性输出的 D/A 转换器的构成和基本原理	265
9.2.5	集成 D/A 转换器芯片	266
9.2.6	D/A 转换器的主要技术指标	275
9.3	A/D 转换	276
9.3.1	A/D 转换的基本原理	276
9.3.2	几种不同的 A/D 转换器	278
9.3.3	不同类型 A/D 转换器的特点	283
9.3.4	集成 A/D 转换器芯片	284
9.3.5	A/D 转换器的主要技术指标	292
9.4	A/D 转换和 D/A 转换的典型应用——数字录音机	292
	判一判	294
	选一选	295
	做一做	296
第 10 章	实验	300
实验一	TTL 门电路参数测试及逻辑功能测试	300
实验二	组合逻辑电路设计与竞争冒险	304
实验三	二进制译码器及数据选择器的应用	306
实验四	触发器的功能测试及时序电路的分析	309
实验五	MSI 计数器及七段数码管的应用	313
实验六	A/D 转换器及 D/A 转换器的应用	315
实验七	存储器的应用	319
实验八	555 定时器的功能及应用	322
实验九	多路巡回显示数据采集系统的设计	325
	部分习题参考答案	329
	参考文献	340

第 1 章 半导体器件基础

本章要点：本章首先介绍了半导体中的载流子和导电机理，再讨论了 PN 结的原理和特性，然后介绍了半导体二极管、晶体管和场效应晶体管的结构、原理、伏安特性及主要参数，本章还介绍了二极管的应用电路，为合理选择和使用二极管打下基础。

你知道吗？

为什么现在电子技术发展得如此迅猛？为什么半导体器件是近代电子线路的重要组成部分？这是由于相比于早期的电子管，半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、反应迅速、灵敏度高、工作可靠、耗能低等优点。

由于半导体器件体积小、耗能低，使电子产品集成化和小型化成为可能，为便携式仪器仪表、移动通信技术、计算机的发展提供了物理基础。

电子技术的飞速发展依托于半导体制造技术。半导体器件是电子技术的基础，而所有的半导体器件的核心就是 PN 结。

1.1 半导体

1.1.1 半导体及其特性

自然界中的物质就其导电性能而言，可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ，导电能力介于导体和绝缘体之间。典型的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）、硒（Se）、砷化镓（GaAs）及许多金属氧化物和金属硫化物。半导体的导电性能会随着外界温度、光照、压力、电磁场或掺入一定量的杂质等显著改变。半导体具有以下特性：

（1）热敏特性

当半导体受热时，其电阻率会发生变化。利用这个特性，可将其制成热敏电阻。热敏电阻可分为正温度系数和负温度系数两种。例如，MF58 属于负温度系数的热敏电阻，其电阻率随着温度的升高而降低。

（2）光敏特性

当半导体受到光照时，其电阻率会发生改变。利用这个特性，可将其制成光敏器件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等。光敏电阻随着光照强度的增加而电阻值下降；光敏二极管和光敏晶体管在光照强度增加时，反向电流增加。

（3）杂敏特性

当在纯净的半导体中掺入微量的其他杂质元素时，其导电能力会显著增加。利用这个特性，可将其制成各种半导体器件，如二极管、晶体管、场效应晶体管、晶闸管等。

（4）磁敏特性



在外界磁场的作用下，半导体中的载流子在洛仑兹力的作用下发生运动偏转，载流子的复合率比没有磁场时大得多，从而使其导电特性发生较大的变化。利用该特性，可以将其制成霍尔传感器、磁敏二极管、磁敏晶体管等器件。

1.1.2 本征半导体

具有晶体结构的纯净半导体称为本征半导体。通常，晶体具有规则的几何形状，在空间中按晶格点阵排列。最常用的半导体材料为硅和锗。它们的每一个原子核外层都有4个价电子，其简化结构示意图如图1-1a所示。它们的原子在空间形成排列整齐的正四面体，如图1-1b所示。每个原子的4个价电子分别与相邻的4个原子的价电子组成共价键结构。

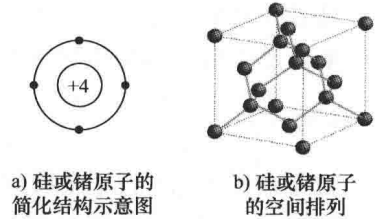


图1-1 硅或锗原子的结构示意图及空间排列

晶体中的共价键对价电子具有较强的约束力，只有当价电子获得足够大的能量时，才能挣脱共价键的约束成为自由电子。在热力学温度 $T = 0\text{K}$ （即 -273°C ）和未获得外界能量时，本征半导体内没有自由移动的电子，不具备导电能力。但在室温下，由于热激发，某些价电子可能获得足够的能量（一般只需要 1.1eV ）就能挣脱共价键的约束成为自由电子，同时在共价键中留下一个空位，称为“空穴”，如图1-2所示。空穴可以被看作带正电的粒子。由于热激发产生空穴和自由电子的现象称为本征激发。在本征半导体中，激发产生的空穴和自由电子成对出现，空穴和自由电子的数目相等。

当本征半导体中某原子的共价键出现空穴时，相邻共价键中的价电子有可能在外电场或其他能量的作用下获得能量，填补到这个空穴中，这种现象称为复合。而在这个价电子的位置上又出现了新的空穴，如此持续下去，就会在半导体内产生价电子填补空穴的移动，空穴的移动方向和电子移动的方向相反，如图1-3所示。在一定温度下，热激发和复合达到动态平衡，使得自由电子和空穴的浓度达到稳定。在外加电压的作用下，就会形成空穴电流和电子电流。空穴参与导电是半导体与导体在导电机理上的根本区别。

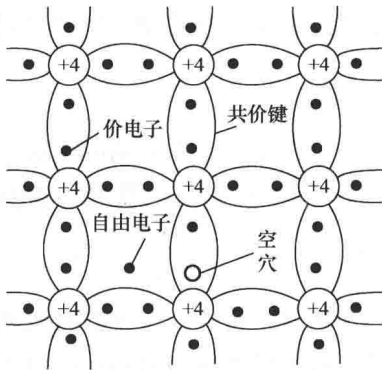


图1-2 本征激发产生自由电子和空穴

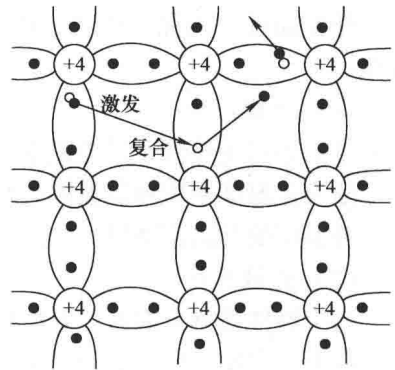


图1-3 空穴的移动与复合

想一想：本征半导体在常温下能导电吗？

1.1.3 杂质半导体

常温下,硅的原子密度为 $5.0 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,本征激发的载流子浓度 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$;锗的原子密度为 $4.4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,载流子浓度 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。所以,在 10^{12} 个硅原子中约有 1 个自由电子和 1 个空穴 (3 万亿分之一),在 10^9 个锗原子中约有 1 个自由电子和 1 个空穴 (二十亿分之一)。可见,常温时本征硅或锗中激发的载流子数目很少,导电能力很差。当温度变化时,本征半导体中的载流子浓度也随之变化。这就是半导体的温度敏感特性。

为了提高其导电能力,应增加载流子的数目,可以通过在本征半导体中掺入微量的其他元素,形成杂质半导体。根据掺入的微量元素不同,杂质半导体分为电子型 (N 型) 半导体和空穴型 (P 型) 半导体。

1. N 型半导体

在纯净的半导体硅 (或锗) 中掺入微量的五价元素 (如磷),则五价磷原子取代晶格中某个硅 (或锗) 原子的位置,并与周围 4 个硅 (或锗) 的原子通过共价键链接成相对稳定的结构,如图 1-4 所示。由于五价元素原子核最外层有 5 个价电子,其中 4 个价电子和相邻的 4 个硅 (或锗) 原子的价电子形成共价键结构后,剩下的一个未组成共价键的价电子,很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。在原子密度为 $5.0 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,载流子浓度 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 的硅中,若掺入 250 万分之一的磷,相当于磷原子的密度为 $n_n = 2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。假设磷原子全部电离,所产生的自由电子浓度也为 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$,可见 n_n 比 n_i 大 100 多万倍。所以,在掺入磷原子的本征半导体中,自由电子数目远远大于空穴数目,自由电子为多数载流子,简称多子;空穴为少数载流子,简称少子。因此,称这种半导体为电子型半导体。由于磷原子提供了自由电子,故称为施主原子。磷原子失去一个价电子后就成为带一个单位正电荷的正离子,用“ \oplus ”表示。

2. P 型半导体

在纯净的半导体硅 (或锗) 中掺入微量的三价硼 (B) 元素,则形成 P 型半导体,如图 1-5 所示。由于硼原子核最外层有 3 个价电子,故只能和相邻的硅 (或锗) 形成 3 个共价键,而第 4 个共价键中由于缺少一个电子而多出一个空位形成空穴。每掺入一个硼原子就会

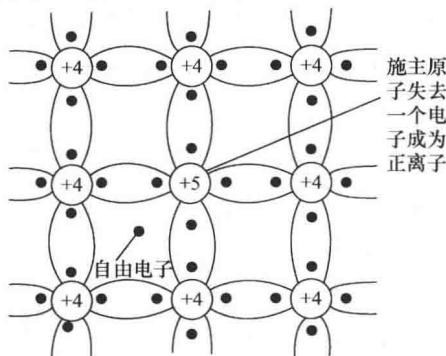


图 1-4 N 型半导体结构示意图

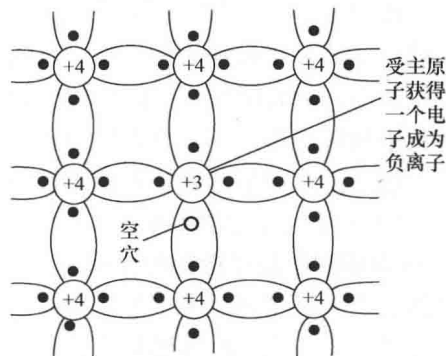


图 1-5 P 型半导体结构示意图

问一问: 杂质半导体中的载流子浓度相对较高, 能否作为导体使用?



出现一个空穴，而热激发产生的自由电子和空穴数总是成对出现，且数量很小。在 P 型半导体中，空穴的数量远远大于自由电子的数量，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子，故称为空穴型半导体。由于硼原子得到一个自由电子，故称为受主原子。硼原子获得一个价电子后成为带一个单位负电荷的负离子，用 \ominus 表示。

不管是 P 型还是 N 型半导体，尽管其各有一种载流子占多数，但整个半导体晶片仍然是电中性的。正、负离子不能移动，不能参与导电。由于掺杂后半导体的载流子的浓度大大增加，故导电能力明显增强。

在杂质半导体中，多数载流子的浓度取决于掺杂浓度，与温度无关；少数载流子的浓度由本征激发产生，取决于温度的高低。

1.2 PN 结及其单向导电性

1.2.1 PN 结的形成

利用特殊工艺，在一块本征半导体中，一边掺入五价元素，形成 N 型半导体，另一边掺入三价元素，形成 P 型半导体。这样，在两种半导体的交界处会发生什么现象？又将有何种特性呢？

1. 多子的扩散运动

P 型区和 N 型区结合后，由于两边载流子浓度的差异，P 型半导体中的多子——空穴向 N 型区运动，同时 N 型半导体中的多子——自由电子向 P 型区运动，如图 1-6a 所示。由于浓度的差异形成多数载流子的运动称为扩散运动。

2. 内电场的建立

在多子扩散到界面附近时，自由电子与空穴相遇而复合，只留下不能移动的正、负离子，形成一空间电荷区，如图 1-6b 所示。由于该区域没有载流子的存在又称为耗尽层。空间电荷区的电阻率很高，为高阻区。空间电荷区包括正电荷区和负电荷区，形成了一个方向由 N 区指向 P 区的内电场，由此产生的电位差称为接触电位差或势垒，用 U_0 表示，如图 1-6c 所示。

3. 内电场对载流子运动的作用

显然，内电场将阻碍多子的扩散运动，故也称其为阻挡层。随着扩散运动的进行，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐渐加强，多子的扩散运动逐渐减弱。

另一方面，内电场的建立，使 P 区的少子——自由电子在电场力的作用下向 N 区运动，N 区的少子——空穴向 P 区运动。少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。但少子

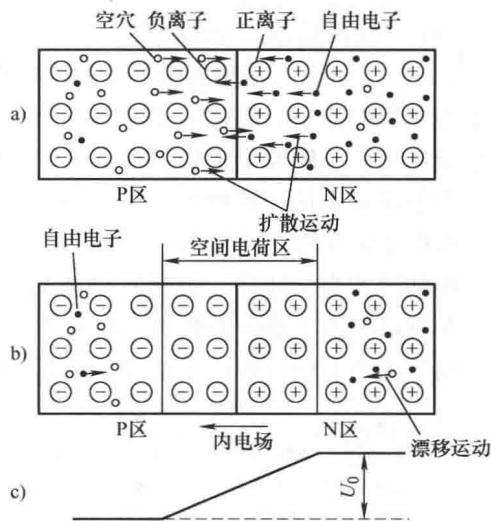


图 1-6 PN 结的形成

思一思：动态平衡时 PN 结的宽度与少子浓度有关吗？

的漂移运动较多子的扩散运动弱得多。随着扩散运动的增强，内电场逐渐加强，P区和N区的少数载流子的漂移运动也随之加强，最终扩散运动和漂移运动达到动态平衡。显然，扩散运动与漂移运动方向相反。

4. PN结的形成

载流子在P区与N区的交界处同时发生两种运动，即多子的扩散运动和少子的漂移运动。开始时，空间电荷区较薄，内电场较弱，多子的扩散运动占优势；尔后，随着空间电荷区的加宽，内电场的增强，多子的扩散运动减弱，少子的漂移运动加强；最后，扩散运动和漂移运动达到动态平衡，此时，空间电荷区的宽度不再变化，形成了稳定的空间电荷区，即PN结。

1.2.2 PN结的单向导电性

上面讨论的是PN结在没有外加电压时的情况，由于扩散运动和漂移运动达到动态平衡，PN结中的总电流为零。实际使用中，PN结上总是加有一定的外部电压。当所加的外部电压极性不同时，PN结表现为何种特性呢？

1. PN结外加正向电压（正偏）

PN结外加正向电压时，P区接电源的正极，N区接电源的负极，如图1-7a所示。由图中可以看出，外电场的方向和内电场的方向相反。外电场有利于多子扩散，打破扩散运动和漂移运动的平衡。当外电场足够大时，驱使P区的多子——空穴进入空间电荷区；而N区的多子——自由电子也会进入到空间电荷区，使整个空间电荷区变窄，削弱了内电场，势垒电压减小，如图1-7b所示。此时多数载流子的扩散运动增强，形成较大的正向扩散电流 I_F ，其方向是由P区流向N区。在一定范围内，随着外加电压的增大正向电流快速增大，PN结呈现低电阻导通状态。正向电流包括空穴电流和自由电子电流两部分。虽然两种不同极性的电荷运动方向相反，但所形成的电流方向是一致的，同时电源不断地向PN结提供电荷，维持正向电流。

2. PN结外加反向电压（反偏）

PN结外加反向电压时，P区接电源的负极，N区接电源的正极，如图1-8a所示。外电场和内电场的方向一致，空间电荷区变宽，内电场增强，势垒电压增大，如图1-8b所示。

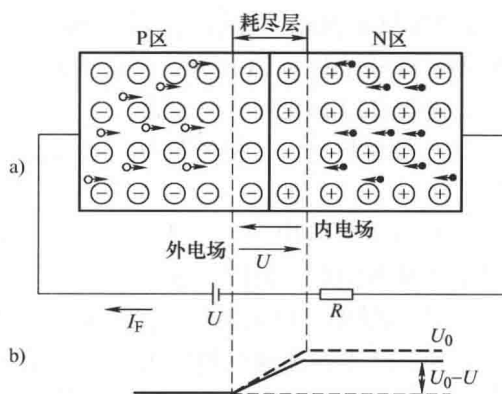


图 1-7 PN结外加正向电压

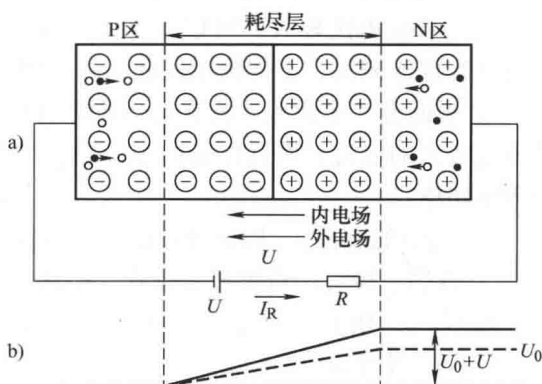


图 1-8 PN结外加反向电压

辨一辨：图1-7中电阻 R 的作用是什么？



此时,多子的扩散运动难以进行,而有利于少子的漂移运动,形成反向电流 I_R ,其方向是由 N 区流向 P 区。由于少子是由本征激发所产生的,数量极少,故形成的反向电流也很小,可近似地认为 $I_R \approx 0$,PN 结反向截止,呈高阻截止状态。

在一定温度下,少子的浓度不变,在一定电压范围内,几乎和外加反向电压无关。故反向电流也称为反向饱和电流,用 I_S 表示。由于少子的浓度随温度的变化而变化,故反向电流也随温度的变化而变化。

总之,当 PN 结外加正向电压时,呈低阻态,有较大的正向电流流过,可视为导通;当 PN 结外加反向电压时,呈高阻态,只有很小的反向电流(纳安级)流过,可视为截止。PN 结的这种特性即为 PN 结的单向导电性。

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管的表示符号、外形及结构

在 PN 结的两端,各引出一个电极,并用外壳封装起来,就构成半导体二极管。其电路中的表示符号如图 1-9a 所示。二极管的外形如图 1-9b 所示。

二极管有以下几种分类方式:

(1) 按材料分 二极管按材料可分为硅管、锗管、砷化镓管等。

(2) 按工艺结构分 二极管按工艺结构可分为点接触型、面接触型和平面型,如图 1-10 所示。

① 点接触型:点接触型二极管的 PN 结是由一根很细的铝金属丝和一块半导体通过瞬间大电流熔接在一起形成的,其结面积很小,故不能承受大电流和较高的反向电压,一般用于高频检波和开关电路。

② 面接触型:面接触型二极管的 PN 结采用合金法或扩散法形成,结面积比较大,可以承受大电流。但由于结面积大,其结电容也比较大,工作频率较低,一般用于低频整流电路。

③ 平面型:平面型二极管是一种特制的硅二极管。它不仅能通过较大的电流,而且性能稳定可靠,多用于开关、脉冲及高频电路中。

(3) 按用途分 二极管按用途可分为普通二极管和特殊二极管。

① 普通二极管:有整流二极管、检波二极管、开关二极管、快速二极管等。

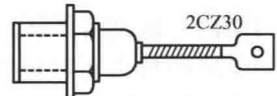
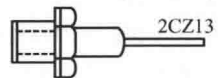
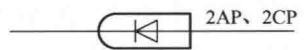
② 特殊二极管:有变容二极管、发光二极管、光敏二极管、隧道二极管、稳压二极管、触发二极管等。

1.3.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指流过二极管的电流 i 和其两端电压 u 之间的关系。由于二极管的本质就是一个 PN 结,故具有单向导电性。二极管的伏安特性包括正向特性和反向特性,如

阴极 ————  ———— 阳极

a) 二极管的表示符号



b) 几种二极管的外形

图 1-9 二极管

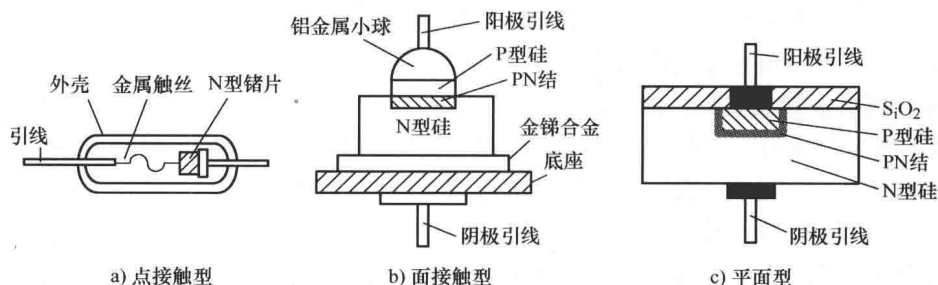


图 1-10 半导体二极管的结构示意图

图 1-11 所示。图中，实线为硅管特性；虚线为锗管特性。

1. 正向死区

图 1-11 中的 (1) 段为二极管的正向特性。当正向电压较小时，外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散的阻力，此时正向电流近似为零，二极管呈现较大电阻，该区域称为二极管的死区。当二极管两端的正向电压增大到一定值 U_{th} 时，PN 结内电场的作用被大大削弱，电流迅速增加，二极管开始导通。 U_{th} 称为阈值电压。 U_{th} 的大小与材料和温度有关，硅管约为 0.5V，锗管约为 0.1V。

2. 正向导通区

当二极管的正向电压超过阈值电压后，正向电流随外加电压的增加而迅速增大，形成较大的正向电流，这时二极管正向导通。在正常使用的电流范围内，正向压降很小且基本维持不变，工程上被看作常数。二极管的正向导通电压用 U_F 表示，硅管的 $U_F = 0.6 \sim 0.8V$ ，典型值取 0.7V；锗管的 $U_F = 0.2 \sim 0.3V$ ，典型值取 0.2V。

通过理论分析和实验测试可得二极管的正向伏安特性为指数关系，即

$$i = I_S (e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中， I_S 为二极管的反向饱和电流； U_T 为温度电压当量，在常温下，取 $U_T = 26mV$ 。

3. 反向截止区

图 1-11 中的 (2) 段为二极管的反向截止区。当反向电压绝对值小于反向击穿电压 U_{BR} 时，少数载流子形成的反向饱和电流 I_S 很小，而且与反向电压的大小几乎无关。硅管的反向电流要比锗管小得多，常温下小功率硅管的反向饱和电流一般小于 $0.1\mu A$ ，锗管约为几微安。

4. 反向击穿区

图 1-11 中的 (3) 段为二极管的反向击穿区。当反向电压绝对值增大到反向击穿电压 U_{BR} 时，二极管的反向电流急剧增加，这种现象为反向击穿。一般，二极管的反向电压在几

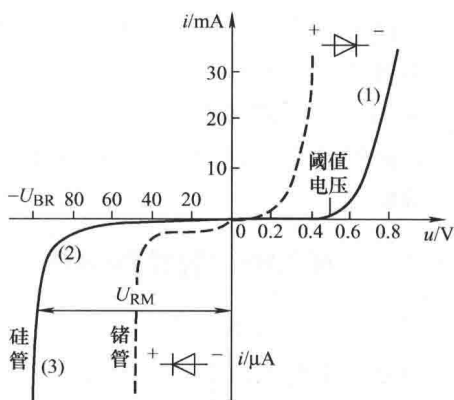


图 1-11 二极管的伏安特性

论一论：根据二极管的单向导电性，只要外加正向电压，二极管上就有较大的正向电流产生？