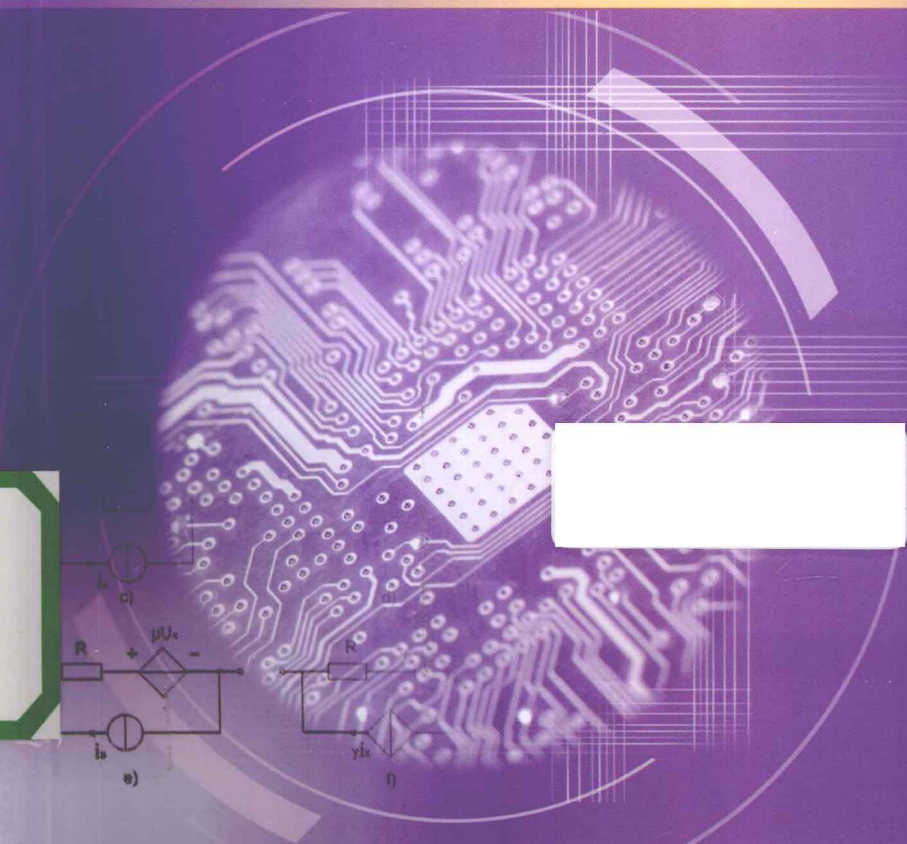




普通高等教育“十二五”规划教材

模拟电子技术基础

艾延宝 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

模拟电子技术基础

主 编 艾延宝
副主编 季庆浮 李 娜
参 编 房俊杰 宋婀娜 王国新
主 审 赵金宪



机械工业出版社

本书由多年从事模拟电子技术教学和研究工作的教师编写完成。本书精心组织,精选内容,注重知识的基础性、结构的系统性,强调面向实用。

全书共分9章,包括半导体二极管、晶体管及其基本放大电路、场效应晶体管放大电路、多级放大电路、模拟集成电路、反馈放大电路、信号处理和信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电路。每章附有小结和相关内容的习题。附录介绍了PSpice软件,以帮助学生提高分析电路和设计电路的能力。

本书可以作为高等院校自动化、电子信息工程、电气工程、通信工程、测控技术与仪器、计算机等专业的理论课教材,也可供其他从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/艾延宝主编, —北京:机械工业出版社, 2012.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-39996-4

I. ①模… II. ①艾… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第301076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

版式设计:霍永明 责任校对:李锦莉

封面设计:张静 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年2月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39996-4

定价:28.00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

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是依据教育部教学指导委员会颁布的课程教学基本要求编写的。全书分为9章。第1章介绍半导体二极管，第2章介绍晶体管及其基本放大电路，第3章介绍场效应晶体管放大电路，第4章介绍多级放大电路，第5章介绍模拟集成电路，第6章介绍反馈放大电路，第7章介绍信号处理和信号产生电路，第8章介绍功率放大电路，第9章介绍直流稳压电路。除此之外，在附录中介绍了PSpice开发软件。

本书编写过程中，在注重基础的同时，吸收了很多新教材中的新思想、新理论和新技术，较好地处理了实用性和先进性之间的关系，可满足“应用型本科学生”的培养目标。本书具有以下特点：

(1) 内容精炼，注重实用。

(2) 理论与实际紧密结合。在理论分析的同时，引入实用电路，解决实际问题，提高学生学习兴趣。

(3) 基础与系统并重。强调对基本知识点的覆盖，降低了知识点的难度与深度，有利于学生的学习和掌握；同时也强调“模拟电子技术”知识的系统性，还介绍了模拟电路设计的先进方法和手段。

本书第1、4章由房俊杰、宋婀娜编写，第2、3章由艾延宝编写，第5章的5.1、5.2、5.3节由王国新编，第5章的5.4节和第6、7章由李娜编写，第8、9章由季庆浮编写，附录部分由房俊杰编写。艾延宝任主编，负责全书的整体规划与统稿工作。赵金宪教授任主审，对本书的编写提出了宝贵的意见，在此向他表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免会有疏漏和不足之处，希望广大读者予以批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

编 者

目 录

前言

第1章 半导体二极管 1

1.1 半导体物理知识 1

1.1.1 本征半导体 1

1.1.2 杂质半导体 3

1.2 PN结 4

1.2.1 热平衡状态下的PN结 4

1.2.2 PN结的伏安特性 5

1.3 实际二极管 9

1.3.1 二极管的几种常见结构 9

1.3.2 实际二极管的伏安特性 10

1.4 二极管的模型、参数、分析方法和基本应用 10

1.4.1 二极管的开关模型及应用 11

1.4.2 二极管的恒压模型及应用 11

1.4.3 二极管的小信号模型 12

1.5 二极管电路的分析方法 13

1.5.1 图解法 13

1.5.2 解析法 15

1.6 二极管的主要参数 16

1.7 其他类型的二极管 17

1.7.1 稳压管 17

1.7.2 光敏二极管 19

1.7.3 发光二极管 19

*1.7.4 光隔离器件 20

*1.7.5 变容二极管 20

*1.7.6 肖特基二极管 20

小结 21

习题 22

第2章 晶体管及其基本放大电路 26

2.1 晶体管 26

2.1.1 晶体管的结构 26

2.1.2 晶体管的放大原理 27

2.1.3 晶体管的共发射极特性曲线 29

2.1.4 晶体管的主要参数 30

2.1.5 光敏晶体管 32

2.2 共发射极晶体管放大电路 33

2.2.1 电路结构 33

2.2.2 工作原理 33

2.2.3 主要技术指标 34

2.3 晶体管放大电路的基本分析方法 34

2.3.1 晶体管放大电路的静态分析 34

2.3.2 晶体管放大电路的动态分析 36

2.4 晶体管放大电路的静态工作点稳定问题 41

2.4.1 温度对静态工作点的影响 41

2.4.2 基极分压式发射极偏置晶体管放大电路 42

2.5 共集电极和共基极晶体管放大电路 45

2.5.1 共集电极晶体管放大电路 45

2.5.2 共基极晶体管放大电路 47

2.5.3 晶体管放大电路三种组态的比较 48

小结 49

习题 49

第3章 场效应晶体管放大电路 53

3.1 结型场效应晶体管 53

3.1.1 结型场效应晶体管的结构和工作原理 53

3.1.2 结型场效应晶体管的特性曲线及参数 56

3.2 MOS场效应晶体管 58

3.2.1 N沟道增强型MOS场效应晶体管 59

3.2.2 N沟道耗尽型MOS场效应晶体管 61

3.3 场效应晶体管放大电路 62

3.3.1 场效应晶体管放大电路的三种组态 62

3.3.2 场效应晶体管放大电路静态 工作点的设置方法及分析 估算.....	62	6.1.1 反馈的基本概念	116
3.3.3 场效应晶体管放大电路的动态 分析.....	64	6.1.2 反馈的基本方程式	116
小结	68	6.2 反馈的组态及判断方法	118
习题	68	6.2.1 负反馈和正反馈	118
第4章 多级放大电路	70	6.2.2 电压反馈和电流反馈	118
4.1 多级放大电路的耦合方式	70	6.2.3 串联反馈和并联反馈	118
4.1.1 直接耦合.....	70	6.2.4 交流反馈和直流反馈	119
4.1.2 阻容耦合.....	72	6.3 四种类型的负反馈放大电路	120
*4.1.3 变压器耦合.....	72	6.3.1 电压串联负反馈	120
4.1.4 光电耦合.....	73	6.3.2 电流并联负反馈	121
4.2 多级放大电路的动态分析	74	6.3.3 电压并联负反馈	122
4.3 组合放大电路	75	6.3.4 电流串联负反馈	122
4.3.1 共射-共基放大电路	75	6.4 负反馈对放大电路性能的 影响	123
4.3.2 共集-共集放大电路	76	6.4.1 负反馈对增益的影响	123
4.3.3 其他组合放大电路.....	79	6.4.2 负反馈对输入电阻和输出电阻 的影响	124
4.4 放大电路的频率响应	81	6.4.3 负反馈对非线性失真、通带等 的影响	127
4.4.1 频率响应的基本概念.....	81	6.5 深度负反馈条件下的近似计算	129
4.4.2 晶体管的高频等效模型.....	84	6.6 负反馈放大电路的稳定问题	131
4.4.3 常见电路的频率响应.....	88	小结	134
小结	97	习题	134
习题	97	第7章 信号处理和信号产生 电路	139
第5章 模拟集成电路	100	7.1 基本运算电路	139
5.1 集成运算放大器概述	100	7.1.1 加法电路	139
5.2 集成运算放大器中的电流源 电路	101	7.1.2 减法电路	140
5.3 差分放大电路	102	7.1.3 积分电路	141
5.3.1 差分放大电路的组成	102	7.1.4 微分电路	143
5.3.2 差分放大电路的输入和输出 方式	103	7.2 滤波电路的基本概念和分类	144
5.3.3 差模信号和共模信号	103	7.3 有源滤波电路	145
5.3.4 典型差分放大电路	103	7.3.1 一阶有源滤波电路	145
5.3.5 恒流源差分放大电路	109	7.3.2 二阶有源滤波电路	146
5.4 集成运算放大器举例	110	7.4 正弦波振荡电路的振荡条件	153
5.4.1 MC14573 集成运算放大器	110	7.5 RC 正弦波振荡电路.....	155
5.4.2 LM741 集成运算放大器	111	7.6 LC 正弦波振荡电路.....	157
小结	114	7.6.1 LC 并联谐振回路的频率 响应	157
习题	114	7.6.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡 电路	159
第6章 反馈放大电路	116	7.6.3 电感三点式正弦波振荡 电路	160
6.1 反馈的基本概念和基本方程式	116		

7.6.4 电容三点式正弦波振荡电路	161	8.6 TDA2030A 音频集成功率放大器	188
7.6.5 石英晶体正弦波振荡电路	163	* 8.7 功率器件的散热和功率晶体管的二次击穿问题	190
7.7 非正弦信号产生电路	165	8.7.1 功率器件的散热	190
7.7.1 电压比较器	165	8.7.2 功率晶体管的二次击穿问题	191
7.7.2 方波发生器	168	小结	192
7.7.3 三角波发生器	169	习题	193
7.7.4 锯齿波发生器	170	第9章 直流稳压电源	196
小结	172	9.1 单相整流电路	196
习题	172	9.1.1 单相半波整流电路	196
第8章 功率放大电路	176	9.1.2 单相桥式整流电路	198
8.1 功率放大电路概述	176	* 9.1.3 倍压整流电路	200
8.1.1 功率放大电路的特点及主要研究对象	176	9.2 滤波电路	200
8.1.2 功率放大电路的类型	177	9.2.1 电容滤波电路	201
8.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	178	9.2.2 电感滤波电路	203
8.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路的组成及工作原理	178	9.2.3 复式滤波电路	203
8.2.2 乙类双电源互补对称功率放大电路的输出功率及效率	179	9.3 稳压电路	205
8.2.3 乙类双电源互补对称功率放大电路中功率晶体管的选择	181	9.3.1 并联型稳压电路的组成	205
8.2.4 乙类互补对称功率放大电路的交越失真	182	9.3.2 并联型稳压电路的稳压原理	205
8.3 甲乙类互补对称功率放大电路	182	9.3.3 稳压电路的性能指标	205
8.3.1 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	182	9.4 串联反馈型稳压电路	207
8.3.2 甲乙类单电源互补对称功率放大电路	183	9.4.1 串联反馈型稳压电路的设计思想	207
8.3.3 使用复合管的甲乙类互补对称功率放大电路	185	9.4.2 串联反馈型稳压电路的组成	207
* 8.4 功率放大电路的应用	185	9.4.3 串联反馈型稳压电路的稳压原理	208
8.4.1 变压器耦合单管功率放大电路	185	9.5 集成稳压器	211
8.4.2 变压器耦合乙类推挽功率放大电路	186	9.5.1 W7800 系列三端稳压器	211
* 8.5 功率 VMOSFET 和 DMOSFET	187	9.5.2 W117 系列三端稳压器	212
8.5.1 VMOSFET 功率放大器	187	9.5.3 三端稳压器的应用	213
8.5.2 DMOSFET 功率放大器	187	9.6 开关型稳压电路	216
		9.6.1 串联开关型稳压电路	216
		* 9.6.2 并联开关型稳压电路	218
		小结	219
		习题	219
		附录 PSpice 简介	222
		参考文献	232

第 1 章 半导体二极管

引言

半导体二极管（简称二极管）是用半导体材料制成的，是广泛应用于电子设备的最简单的半导体器件。二极管的内部结构示意图如图 1-1 所示。

二极管的核心部分是 PN 结。PN 结是 P 型半导体和 N 型半导体的接触面附近的区域。PN 结由外壳保护起来并引出两个极，就构成了二极管。其中一个极和 P 型半导体相连接，称为正极或阳极，另一个极和 N 型半导体相连接，称为负极或阴极。那什么是

PN 结？什么是 N 型半导体和 P 型半导体？二极管的工作原理是什么？流过二极管的电流和加在二极管两端的电压的关系如何？二极管有什么用途？这些都是本章要回答的问题。

本章首先介绍半导体物理知识，讲解本征半导体、N 型半导体、P 型半导体。然后讲解 PN 结的形成和工作原理、伏安特性，实际二极管常见结构、伏安特性和基本应用，以及二极管电路的分析方法等。

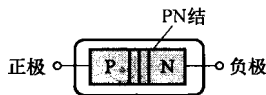


图 1-1 二极管的内部结构示意图

1.1 半导体物理知识

自然界中的物质，按其导电能力分类，可以分成三大类：导体、绝缘体和半导体。电阻率低于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体，电阻率高于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为绝缘体，导电能力介于导体和绝缘体之间，称为半导体。最常见的半导体材料是硅，其次是锗，还有一些化合物如砷化镓等也是半导体。本书着重讨论硅和锗的特性。

硅在元素周期表中的序号是 14，原子核外有 14 个电子，它的价电子是 4 个。锗在元素周期表中的序号是 32，原子核外有 32 个电子，而它的最外层电子数也是 4 个，即也有 4 个价电子。因此可以用同一个模型来表示硅和锗原子。



图 1-2 简化模型

图 1-2 所示为硅和锗原子的简化模型，此模型分成两部分，一部分是价电子，另一部分是惯性核。惯性核是指硅和锗原子除了价电子以外的部分。很明显，惯性核应具有 4 个正电荷。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是纯净的半导体单晶。在单晶中，半导体内原子按晶格排列得非常整齐。硅或锗的单晶在热力学温度为零度时，即 $T=0\text{K}$ 时的平面结构示意图如图 1-3 所示。

从图 1-3 中可以看出，当温度为 0K 时，硅和锗的每个原子都以共价键的形式和它周围的原子结合并相互作用。

当温度升高时，有些原子中的价电子获得足够的能量，可以克服共价键的束缚，跑到晶格中，成为可以在晶格中自由运动的自由电子，而在原共价键中出现一个空位，称为空穴。

因此,只要产生一个自由电子,必然对应一个空穴,即自由电子和空穴成对出现,称为电子-空穴对。温度越高,产生的电子-空穴对就越多。这种产生电子-空穴对的过程,称为本征激发,如图1-4所示。

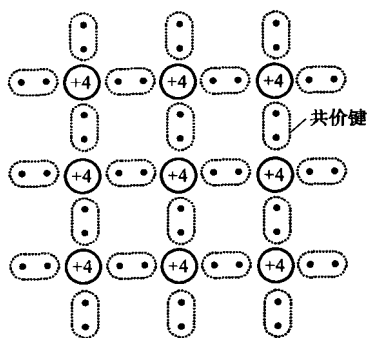


图 1-3 单晶结构平面示意

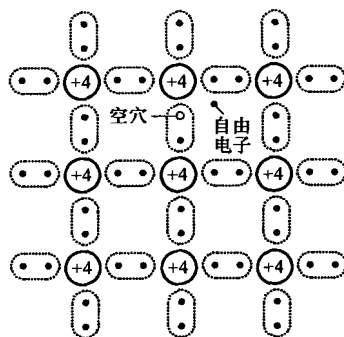


图 1-4 本征激发

自由电子可以在晶格中运动,它是带负电的粒子,它的运动可以产生电流;空穴也可以运动,如果其他共价键中的电子移动到某一空穴所在的共价键中,填补了空位,就相当于空穴移动了位置。如图1-5所示,共价键A中的电子填补了共价键B的空位,共价键A中就会出现空位,也就是空穴从B移动到A,自由电子从A移动到B。空穴的运动方向和自由电子的运动方向相反,因此可以把空穴的运动看作是一种带正电粒子的运动。空穴运动产生电流的方向和电流的方向相同。自由电子和空穴都称为载流子。

本征激发的实质是,当温度升高时,价电子获得足够的能量,挣脱共价键的束缚而成为自由电子。

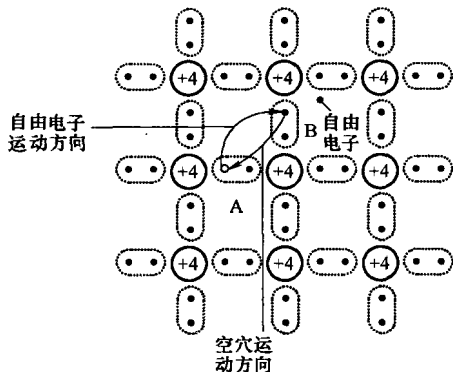


图 1-5 空穴的移动

在本征半导体中,与本征激发同时存在的一种现象称为复合。复合是指自由电子放出能量又回来填补空穴的过程。当自由电子和空穴发生复合时,一个电子-空穴对就消失了。显然,激发使电子-空穴对增加,而复合又使电子-空穴对减少。在一定温度下,本征半导体内的激发和复合达到动态平衡,即电子浓度和空穴浓度相等,而且是一个定值。通常,将本征半导体材料单位体积内的载流子的多少称为本征载流子浓度,其大小可以用下面的公式表示:

$$n_i = p_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (1-1)$$

式中, n_i 表示本征半导体中自由电子的浓度; p_i 表示本征半导体中空穴的浓度; A 是和半导体材料有关的常数,硅材料为 $3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$, 锗材料为 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$; E_g 为 0K 时半导体材料的带隙能量,硅材料的 E_g 为 1.207eV, 锗材料为 0.785eV; T 为热力学温度 (K); k 为玻耳兹曼常数, $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。

由式 (1-1) 可以看出,本征载流子浓度和温度有关,当温度一定时,对于固定的一块半导体材料,本征载流子浓度是一定的;温度升高,本征载流子浓度增加,也就是说,温度

升高时半导体材料的导电能力增强。

由于本征半导体中，空穴和自由电子是成对出现的，因此整块本征半导体还是呈电中性的。

1.1.2 杂质半导体

通过式(1-1)可知，在室温 27℃ (300K) 下，硅材料的本征载流子浓度为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 而硅材料的原子密度 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ，所以只有 $1/(3.3 \times 10^{12})$ ，即 3 万亿分之一的原子由于本征激发产生了电子-空穴对，因此本征半导体的导电能力很弱；另外，在一定温度下，给定的本征半导体材料的载流子浓度是一个定值，它的导电能力也不能被人为控制。为了提高半导体材料的导电能力，并且实现人为控制半导体材料的导电性，可以采用掺杂技术。

所谓掺杂，就是将半导体材料中掺入一定量的杂质元素。一般，掺入的杂质元素的浓度既要远大于本征载流子的浓度，又要远小于材料的原子密度，以使杂质原子零星地分布于半导体材料的晶格中。

掺杂的半导体材料称为杂质半导体。杂质半导体分为两种，一种是 N 型半导体，一种是 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在半导体材料硅、锗中掺入五价元素，就能制成 N 型半导体。用于掺杂的常见的五价元素有磷和砷。图 1-6 所示为 N 型半导体结构示意图。

图 1-6 中，因为杂质原子是五价的，所以杂质的原子有五个价电子，其中四个价电子和周围的半导体材料原子中的价电子组成共价键，而余下的一个价电子很容易挣脱杂质原子的束缚，成为自由电子。理论和实验表明，在室温下，晶格中所有的杂质原子都能释放出一个自由电子，这种杂质称为施主杂质。由于这个自由电子不是共价键中的电子，所以没有空穴产生。杂质原子由于释放出一个电子而变成正离子，而这个正离子是束缚在晶格中，不能像载流子那样运动。杂质原子带正电而自由电子带负电，所以整块半导体还是呈电中性的。

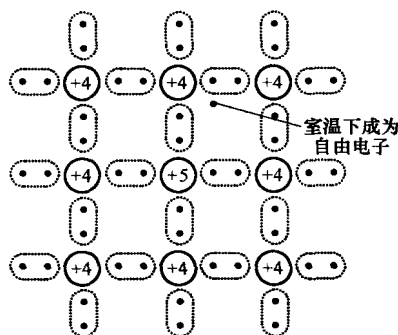


图 1-6 N 型半导体结构示意图

由以上分析可知，施主杂质掺入半导体材料中，半导体中的自由电子浓度大大增加。此时空穴的浓度比相同温度下的本征半导体中的浓度还要小，这是因为自由电子浓度增加后，加大了空穴与自由电子复合的机会。也就是说在这种半导体中，自由电子的浓度很大而空穴的浓度很小。因此，这种半导体中，自由电子是多数载流子（多子）；空穴是少数载流子（少子）。由于这种半导体中的多子是电子，而电子带负电，故这种半导体称为 N 型半导体。

在室温情况下，N 型半导体中的每一个施主杂质原子都能提供一个自由电子。虽然此时 N 型半导体内仍然存在着由本征激发而产生的自由电子，但是，由于掺杂浓度远远大于由本征激发而产生的载流子的浓度，自由电子主要由掺入的施主杂质产生，因此，N 型半导体的自由电子的浓度可以认为近似等于掺杂浓度。如果用 N_d 表示掺入的施主杂质浓度，则 N 型半导体的多子浓度（电子浓度） n_{n0} 表示为

$$n_{n0} \approx N_d \quad (1-2)$$

由半导体物理中的热平衡条件可知,在温度一定时,半导体内的自由电子浓度 n_0 和空穴浓度 p_0 的乘积为本征载流子的浓度 n_i 和 p_i 的乘积,可由下式表示:

$$n_0 p_0 = n_i p_i = n_i^2 \quad (1-3)$$

由热平衡条件,可以求出 N 型半导体中少子的浓度 P_{n0}

$$P_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-4)$$

2. P 型半导体

如果在半导体材料硅、锗中掺入三价元素,就能制成 P 型半导体。用于掺杂的常见三价元素是硼。图 1-7 所示为 P 型半导体结构示意图。

图 1-7 中,因为硼原子是三价的,所以它和周围半导体材料的原子中的价电子组成共价键时,缺少一个电子。理论和实验表明,在室温下,晶格中所有的硼原子都能获得半导体材料原子中的一个价电子而变成负离子,这个负离子是束缚在晶格中的,它不能像载流子那样运动。而给硼原子提供电子的那个原子的共价键中就出现了一个空穴。因此,一个硼原子就对应一个空穴的出现。因为硼原子接受一个电子变为负离子,所以称这种杂质半导体为 P 型半导体。掺杂元素硼称为受主杂质。

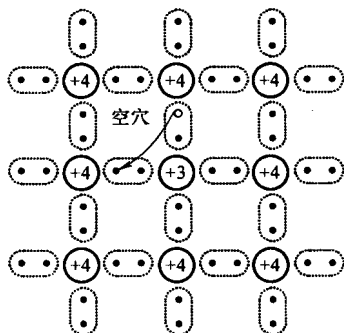


图 1-7 P 型半导体结构示意图

如果用 N_a 表示掺入受主杂质浓度,则 P 型半导体的多子浓度 p_{p0} 表示为

$$p_{p0} \approx N_a \quad (1-5)$$

P 型半导体的少子浓度为

$$n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1-6)$$

由式 (1-2) ~ 式 (1-6) 可以看出,无论是 N 型半导体还是 P 型半导体,多子的浓度都可以由掺杂浓度来控制,因此可以认为,杂质半导体的多子浓度只和掺杂浓度有关而和温度无关;少子浓度与 n_i^2 有关,因此少子浓度和温度有关,当温度升高时,少子浓度会增加。

1.2 PN 结

所谓 PN 结就是 P 型半导体和 N 型半导体相互接触的区域。从 1.1 节讲述 P 型半导体和 N 型半导体时已经知道,实际上在一块半导体单晶上利用杂质补偿技术就能够做出两种类型的半导体区域。例如,在一块半导体单晶的一定区域中掺入施主杂质,使这个区域成为 N 型区,然后再在这个 N 型区中选一个较小的区域掺入比原施主杂质浓度还要高的受主杂质,生成一个 P 型区(一般 P 型区的净掺杂浓度是 N 型区的掺杂浓度的 10 ~ 100 倍),这样一个 PN 结就形成了。P 型区和 N 型区的净掺杂浓度不同时,称为不对称 PN 结。若 P 型区掺杂浓度高,写作 P^+ 型区,可以用 P^+N 表示不对称 PN 结。一般半导体器件中的 PN 结都是不对称 PN 结。

1.2.1 热平衡状态下的 PN 结

如上所述,可以用杂质补偿技术在一块半导体单晶上同时生成两个相互连接的区域,即

N 型区和 P 型区。P 型区中多子是空穴，而空穴在 N 型区内是少数，因此在 P 型区和 N 型区的接触面附近，存在着载流子浓度差。载流子浓度差会引起载流子由浓度高的地方流向浓度低的地方，这种由于浓度差而引起的载流子的运动，称为扩散。扩散运动而产生的电流称为扩散电流。由于 P 型区空穴的浓度大于 N 型区空穴的浓度，因此 P 型区的空穴就向 N 型区扩散；同样，N 型区的电子是多子，P 型区的电子是少数，因此电子从 N 型区向 P 型区扩散，如图 1-8 所示。

由图 1-8 可知，P 型区的空穴向 N 型区扩散，当空穴到 N 型区后，就成为 N 型区的少数，很容易被 N 型区内的多子——电子复合。因此，在接触面附近，剩下了受主杂质的负离子，这些负离子被束缚在晶格中，不能自由移动。同样道理，N 型区的多子——电子扩散到 P 型区，在接触面附近留下了施主杂质的正离子，这样形成了所谓的空间电荷区，如图 1-9 所示。在空间电荷区内，多数载流子已经扩散到对方并被复合掉了，或者说消耗尽了，因此空间电荷区又称为耗尽层。

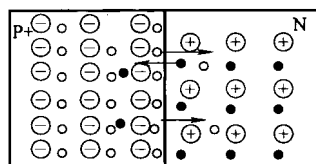


图 1-8 载流子扩散示意

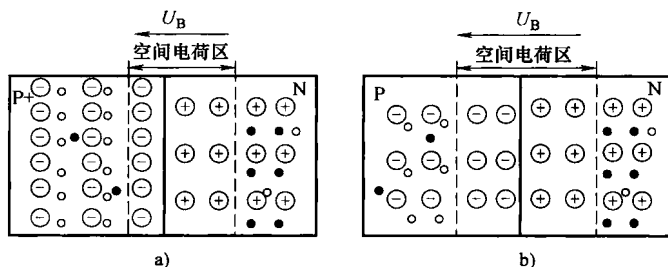


图 1-9 空间电荷区示意

a) 不对称 PN 结 b) 对称 PN 结

由于空间电荷区内有带正电的施主杂质离子和带负电的受主杂质离子，即一边是正电荷，另一边是负电荷，因此存在电场，称为内建电场。内建电场只在空间电荷区内存在，电力线从正电荷出发，终止于负电荷，而空间电荷区以外的 P 型区域和 N 型区域还是呈电中性的。由于空间电荷区存在的内建电场对多子的扩散起到了阻碍的作用，P 型区的多子——空穴就不太容易扩散到 N 型区了，而 N 型区的多子——电子也不大容易扩散到 P 型区，也就是内建电场对多子的扩散有阻挡作用，因此空间电荷区又称为阻挡区或阻挡层。

内建电场对多子的扩散有阻挡作用，但少子在内建电场的作用下会产生运动。这种载流子在内建电场的作用下而产生的定向运动称为漂移。由载流子因漂移而产生的电流称为漂移电流。P 型区的少子——电子，在内建电场的作用下会向 N 型区漂移，同样，N 型区的少子——空穴，也向 P 型区漂移。由于在 PN 结中多子的扩散运动方向正好和少子的漂移运动方向相反，因此当温度一定时，扩散运动和漂移运动会达到动态平衡状态。

1.2.2 PN 结的伏安特性

以上讲解的是没有加任何电压时的热平衡状态下的 PN 结。但是 PN 结在使用过程中都是要加电压的，有可能加正向电压（P 型区接电源的正极，N 型区接电源的负极），也有可能加反向电压（N 型区接电源的正极，P 型区接电源的负极），或者加正、反向交替变化的

交流电压。下面讨论 PN 结的电流和加在它两端的电压的关系, 即 PN 结的伏安特性。

1. PN 结的正向特性

如图 1-10 所示, PN 结加上了正向电压, 即 P 型区接电源的正极, N 型区接电源的负极, 也称正向偏置。

空间电荷区的载流子极少, 它的电阻很高, 而中性区内有大量的载流子, 中性区的电阻很小, 所以电源电压 U 几乎都加到空间电荷区上了。在空间电荷区中, U 所形成的电场方向和原内建电场的方向相反, 此时空间电荷区的宽度变窄。PN 结未加电压时处于热平衡状态, 多子的扩散和少子的漂移处于动平衡状态。PN 结加正向电压之后, 空间电荷区变窄, 空间电荷区两端电位差变小, 此时 P 型区的多子——

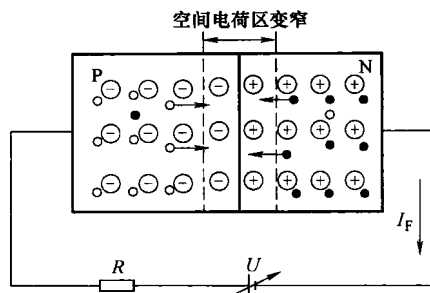


图 1-10 PN 结正向电压示意

空穴向 N 型区扩散, N 型区的少子——空穴在电场力的作用下向 P 型区漂移, 但是, 从 P 型区扩散到 N 型区的空穴数量大于从 N 型区漂移到 P 型区的空穴数量, 所以有一定数量的空穴由 P 型区净注入到 N 型区。这些净注入的空穴到了 N 型区就成了 N 型区的少子。由于空穴不断注入 N 型区, 使得在 N 型区的边缘处少子的浓度升高, 因此少子要向浓度低的地方扩散。只要外加正向电压 U 是稳定的, 空穴就会不断地注入到 N 型区, 并且使 N 型区的少子浓度有一个稳定的分布, 最终形成正向电流 I_F 。显然, 外加的正向电压越高, PN 结的正向电流 I_F 就越大。外加的正向电压称为正向偏置电压。

2. PN 结的反向特性

当 PN 结加上反向电压时, P 型区与电源负极相连, N 型区与电源的正极连接, 也称反向偏置。此时电源电压在空间电荷区内产生的电场方向和内建电场的方向相同, 使空间电荷区变宽。因为空间电荷区变宽, 多子的扩散很难进行, 但是有利于少子的漂移, 如图 1-11 所示。因此, N 型区的少子——空穴只要到达空间电荷区的边缘, 就很快被电场拉到 P 型区。同样, P 型区的少子——自由电子只要运动到空间电荷区边缘, 就被空间电荷区的电场拉到 N 型区。因此只要 U 的值大于 0.1V 以上, 空间电荷区就基本上没有多子的扩散电流, 只有少子的漂移电流了。N 型区少子——空穴向 P 型区漂移, P 型区少子——自由电子向 N 型区漂移, 两漂移电流方向相同, 因此总的漂移电流等于空穴的漂移电流加上自由电子的漂移电流, 这就是 PN 结的反向电流 I_R 。

反向电流 I_R 很小, 因为它是由少子的运动形成的, 而无论是 P 型区还是 N 型区少子浓度都很小, 当外加反向电压 U 增加时, 反向电流也增加。但是, 当外加反向电压增加到 0.1V 以上时, 反向电流基本上就不再增加了。因为此时几乎全部少子都参与了形成反向电流的定向移动, 这时的反向电流称为反向饱和电流, 用 I_s 表示。

一般硅 PN 结的反向饱和电流 I_s 的值在 $10^{-15} \sim 10^{-9}$ A 之间, 锗 PN 结的反向饱和电流 I_s 的值在 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ A 之间。反向饱和电流与少子的浓度有关, 而少子的浓度和温度有关, 因此, 反向饱和电流也和温度有关, 温度越高, 反向饱和电流越大。

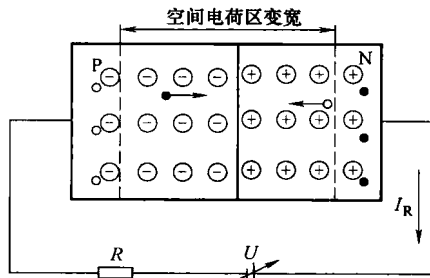


图 1-11 PN 结加反向偏置电压示意

3. PN 结的伏安特性表达式

如上所述,当 PN 结加正向电压时,就会产生正向电流 I_F ;当 PN 结加反向电压时,就会产生反向电流 I_R 。理论和实践都可以证明,PN 结的电流和电压的关系式可以用下式表示:

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \quad (1-7)$$

式中, I_S 为 PN 结的反向饱和电流; U_T 为温度的电压当量,室温时 $U_T = 0.026V$; n 为理想因数,一般 $1 \leq n \leq 2$,和 PN 结的尺寸、材料及通过 PN 结的电流有关。

式 (1-7) 中, n 实际上是考虑了空间电荷区内部电子和空穴的复合而加上一个修正系数,当电流非常小时, n 取 2,一般情况下, n 取 1,因此,今后如果没有特殊说明,都将 n 取为 1,即

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-8)$$

例 1-1 已知一个硅 PN 结在室温下 $I_S = 10^{-10}A$,求 $U = +0.6V$ 和 $U = -0.6V$ 时的 PN 结电流。

解: 当 $U = +0.6V$ 时,产生的是正向电流 I_F 。所以有

$$I_F = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = 10^{-10} \left(e^{\frac{0.6}{0.026}} - 1 \right) A = 10^{-10} (1.05 \times 10^{10} - 1) A \approx 1.05A$$

当 $U = -0.6V$ 时,产生的是反向电流 I_R 。所以有

$$I_R = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) = 10^{-10} \left(e^{\frac{-0.6}{0.026}} - 1 \right) A = 10^{-10} (9.5 \times 10^{-11} - 1) A \approx -10^{-10}A$$

从上例的计算过程可以看出,当所加正向电压 U 远大于 U_T 时,式 (1-8) 中的 1 可以忽略不计, $I_F = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$,即当正向电压增加时,正向电流按指数规律增加。因此,为避免 PN 结因电流过大而烧毁,PN 结上所加的正向电压必须小于内建电压。而反向电压和 PN 结所加的反向电压的大小几乎无关,故称该电流为反向饱和电流。这里强调一下,反向饱和电流随温度的增加而增加。

4. PN 结的击穿

反向电流和反向电压无关是有条件的,条件是 PN 结上所加的反向电压不能太大。如果反向电压加得太大,PN 结的反向电流会突然猛增,这种现象称为“击穿”。

如果在 PN 结发生击穿时不采取措施限制反向电流的增长,PN 结会因电流太大而烧毁,这种击穿称为热击穿。热击穿是不可逆击穿,故在 PN 结中应避免热击穿。

另一种击穿是可逆的,如果采取一定的措施使 PN 结在击穿区的电流不做无限制的增加,则 PN 结不会损坏,称为可逆击穿。可逆击穿有两种,一种称为雪崩击穿,一种称为齐纳击穿。

一般雪崩击穿发生在掺杂浓度比较低的 PN 结中。当反向电压加得比较大时,空间电荷区的宽度较大,载流子通过空间电荷区,能获得足够大的动能。这种具有足够动能的载流子在运动中会和空间电荷区的原子相碰撞,使原子中的价电子由于获得能量而脱离原子的束缚而成为自由电子,这就产生了电子-空穴对。这些电子和空穴又可以在电场中加速而获得足够大的动能,再去和空间电荷区的原子相碰撞,空间电荷区的载流子急剧增加,使 PN 结反向电流急剧增加而产生了击穿。由于这种载流子增加的过程和雪崩相似因此称为雪崩击穿。

齐纳击穿发生在掺杂浓度比较高的 PN 结中。因为掺杂浓度比较高,空间电荷区很薄,PN 结上加较高的反向电压时,空间电荷区的电场强度就足够大。该电场能使空间电荷区内的原子中的价电子摆脱原子的束缚,而产生电子-空穴对,空间电荷区内的载流子急剧增加,反向电流急剧增加,使 PN 结产生了击穿。一般的 PN 结掺杂浓度没有那么多高,所以电击穿多数是雪崩击穿。

以上两种电击穿的过程是可逆的,在 PN 结两端的反向电压降低后,PN 结仍可恢复原来状态。但它有一个前提条件,就是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率。若超过了,就会因热量散发不出去而使 PN 结温度上升,直到过热而烧毁,这时就成为热击穿了。

热击穿必须尽量避免,而电击穿则可为人们所利用(如稳压管)。

5. PN 结的温度特性

由 PN 结的伏安特性表达式可以看出, I_s 和 U_T 均与温度有关,因此 PN 结的伏安特性也和温度有关。如图 1-12 所示,当温度升高时,伏安特性如图 1-12 中虚线所示。

从图 1-12 中可以看出,当温度升高时,PN 结的伏安特性曲线向左移动。也就是说,当温度升高时,要使 PN 结中的正向电流为一个定值,所需要施加的正向电压就要减小。一般温度每升高 1°C ,正向电压减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。

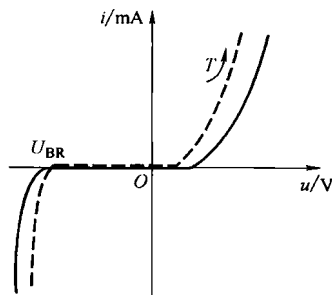


图 1-12 PN 结的温度特性

6. PN 结的电容特性

若 PN 结两端加上随时间变化的电压时,PN 结还会显示出电容特性。PN 结电容有两种类型:一种称为势垒电容,用 C_B 表示;另一种称为扩散电容,用 C_D 表示。

(1) 势垒电容

由以上讨论可知,PN 结两端加的电压变化时,PN 结的空间电荷区宽度就改变,空间电荷区内杂质离子的数量就会改变,这一效果很像电容的充电和放电。尤其当 PN 结所加的反向电压变化时,这一效果更明显,因为此时空间电荷区的宽度的变化比较大。一般 PN 结的势垒电容是非线性的。空间电荷区的电荷与电压的关系如图 1-13 所示。

(2) 扩散电容

当 PN 结加正向电压时,会有多数载流子注入,因此在空间电荷区以外的中性区附近,就形成了一定的少子分布。当正向电压变化时,这种少子分布也随之改变,如图 1-14 所示。

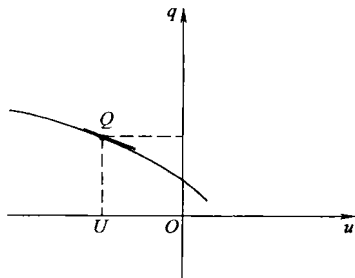


图 1-13 空间电荷区的电荷与电压的关系

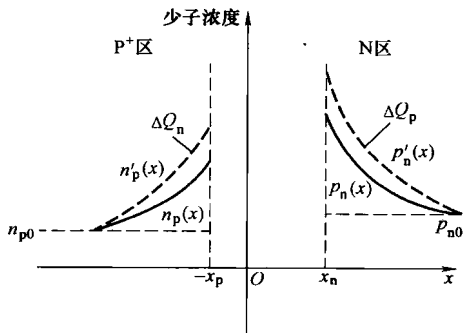


图 1-14 PN 结正向电压变化时的少子浓度分布

N型区的 x_n 处的少子的浓度最高,由于扩散形成的少子分布曲线为 $p_n(x)$ 。如果PN结上的正向电压增加,少子浓度分布曲线会变化,如图1-14中的 $p_n'(x)$,则少子的电荷量分别增加了 $\Delta Q_p = p_n'(x) - p_n(x)$,电荷量变化可等效为一个电容效应。

PN结的结电容 $C_j = C_B + C_D$,当PN结加正向电压时,以扩散电容 C_D 为主,即 $C_j \approx C_D$;当PN结加反向电压时, $C_j \approx C_B$ 。

【思考题】

1. 空间电荷区是由自由电子、空穴还是由施主杂质离子、受主杂质离子构成?空间电荷区又称为耗尽层、耗尽区或阻挡层、势垒区,为什么?
2. 如需使PN结处于正向偏置,外接电压的极性如何确定?
3. PN结处于反向偏置时,空间电荷区的宽度是增加还是减小,为什么?
4. PN结的单向导电性在什么外部条件下才能显示出来?
5. PN结的电容效应是怎么产生的?

1.3 实际二极管

二极管按PN结面积的大小分类,可以分成点接触型二极管、面接触型二极管和平面二极管。点接触型二极管的PN结面积小,而面接触型二极管的PN结面积较大。

1.3.1 二极管的几种常见结构

二极管的常见结构主要有三种,点接触型二极管、面接触型二极管和平面二极管,如图1-15所示(图中正极也称为阳极,负极也称为阴极)。

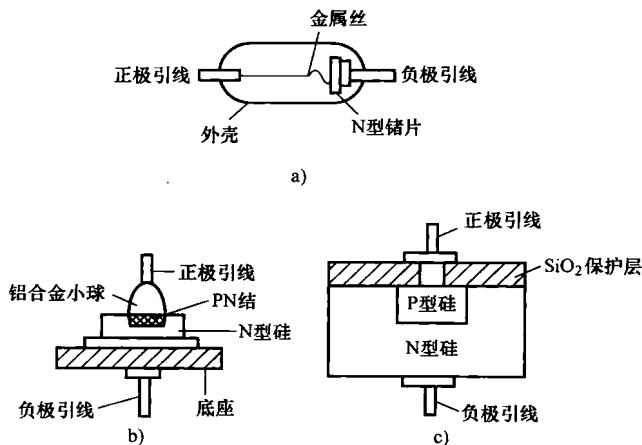


图1-15 二极管的常见结构

a) 点接触型二极管 b) 面接触型二极管 c) 平面二极管

点接触型二极管是由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接形成PN结。结面积小,不能通过较大电流,但其结电容较小,一般在1pF以下,工作频率可达100MHz以上,适用于高频电路和小功率整流。

面接触型二极管采用合金法工艺制成的。结面积大，能够流过较大的电流，但其结电容大，只能在较低频率下工作，一般仅作为整流管使用。

平面二极管是采用扩散法制成的。结面积较大的可用于大功率整流，结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

1.3.2 实际二极管的伏安特性

以上讨论的 PN 结伏安特性，是针对理想化的 PN 结讨论的。在讨论过程中认为中性区的体电阻为零，中性区和引线之间的接触电阻也为零，因此认为电压 U 全部加到了空间电荷区上。但是，实际二极管的中性区存在体电阻，中性区和引线之间存在接触电阻，这些电阻的存在使实际二极管的正向伏安特性和理想的 PN 结伏安特性略有不同，当正向电压相同时，实际二极管的正向电流要小些，如图 1-16 所示。

另外，实际二极管在制造过程中 PN 结不可避免地会产生表面污染，使反向电流有较大增加。由于表面污染的存在，反向电流也不再与反向电压无关了，实际二极管的反向电流随着反向电压的增加而略有增加。

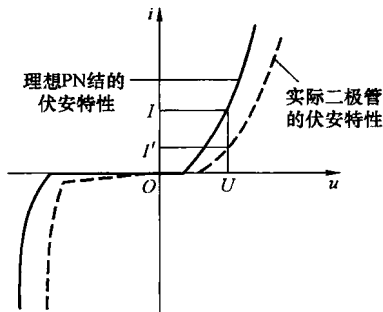


图 1-16 实际二极管和理想 PN 结的伏安特性比较

【思考题】

1. 为什么说在使用二极管时，应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压？
2. 如何用万用表的“ Ω ”挡来辨别一只二极管的正、负两极？
3. 比较硅、锗两种二极管的性能。在工程实践中，为什么硅二极管应用得较普遍？
4. 在二极管电路中，其他条件不变，温度升高时，二极管的电流将会产生怎样的变化趋势？硅二极管和锗二极管哪种受温度影响更大？

1.4 二极管的模型、参数、分析方法和基本应用

二极管是一个非线性器件，即二极管的各项参数会随电流和电压的改变而变化。二极管的特点是，对应不同的工作点，它的直流电阻和交流电阻都不相同。

如图 1-17 所示，两个不同的工作点 Q_1 、 Q_2 ，它们的直流电阻等于从原点分别到 Q_1 、 Q_2 连线的直线斜率的倒数，很显然，这两点的直流电阻不同，即 $R_1 = U_1/I_1$ ， $R_2 = U_2/I_2$ 。 Q_1 、 Q_2 两点交流电阻为 $r_1 = \left. \frac{du}{di} \right|_{Q_1}$ ， $r_2 = \left. \frac{du}{di} \right|_{Q_2}$ ，它们分别等于 Q_1 、 Q_2 处切线斜率的倒数，同样，这两点的交流电阻（或称为小信号微变电阻）也不同。因此，如果非常精确地研究非线性器件组成的电路是很复杂的，而且实际上也没有必要，因为二极管的工作还受电路中其他元器件的影响。所以，在工程计算中，往往根据不同的分析要求，而采用不同的简化模型。

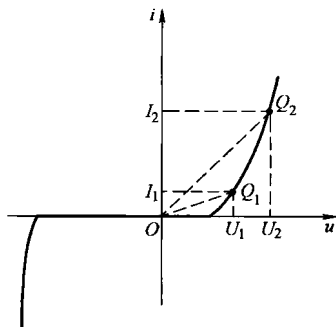


图 1-17 二极管的直流电阻和交流电阻