



国家级精品课程主干教材

普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材

# 模拟电子技术基础教程

王友仁 李东新 姚睿 编著



科学出版社

国家级精品课程主干教材  
普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材

# 模拟电子技术基础教程

王友仁 李东新 姚 睿 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书根据模拟电子技术课程的教学基本要求与学习特点,适应近几年模拟电子技术的发展,主要讨论模拟电子电路的基本概念、基本原理、基本电路和分析方法。全书共分为8章,内容包括半导体器件、放大电路基础、模拟集成运算放大器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和直流稳压电源。

本书可作为高等学校电气信息类专业(包括电气工程及其自动化、自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制技术、生物医学工程等)模拟电子技术课程的教材,也可供其他专业选用,并可供有关工程技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础教程/王友仁,李东新,姚睿编著. —北京:科学出版社, 2011. 2

(国家级精品课程主干教材·普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-024715-5

I. ①模… II. ①王…②李…③姚… 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(2011)第 004438 号

责任编辑:匡敏 张丽花/责任校对:张小霞  
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年2月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—4 000 字数:470 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

为了适应电子技术发展和当前高等教育人才培养的需要,根据模拟电子技术课程教学基本要求,针对模拟电子技术课程教学中内容多、学生掌握知识比较困难、课程学时数不足等问题,结合“电子线路”国家精品课程建设和多年教学实践,编写了这本《模拟电子技术基础教程》。本书编写思路为:立足于模拟信号放大与处理这一条主线,保证模拟电子技术基础内容,强调理论联系实际,适应现代电子技术的发展。对传统教学内容进行了适当更新,主要体现在:适度删减分立元器件电路,突出集成电路原理与应用,重视实际应用电路与设计案例,引入现代模拟集成电路新技术、新知识、新器件及新方法,如光电子器件、开关电容滤波器、模拟乘法器、丁类功率放大器。

本书共8章,内容包括半导体器件、放大电路基础、模拟集成运算放大器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和直流稳压电源。基础教学内容包括半导体器件、放大器基础、模拟集成运算放大器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大电路、正弦波振荡电路、功率放大电路和线性直流稳压电源;可选教学内容有非理想集成运算电路的误差分析、开关电容滤波器、模拟乘法器、非正弦信号发生电路、集成多功能信号发生器、变压器耦合推挽功率放大电路、丁类功率放大器、功率器件、开关型直流稳压电源等。每章中配备了精选的例题和足够数量的习题,并给出了内容提要、本章小结及一定数量的思考题。为便于教师教学与学生自学,同时编写了配套教辅《模拟电子技术基础教程学习指导与习题解析》。

王友仁为本书主编,负责全书的策划组织、大纲制定和统稿。第3、4、5、8章由南京航空航天大学王友仁执笔,第1、2章由河海大学李东新执笔,第6、7章和4.4节由南京航空航天大学姚睿执笔。南京航空航天大学林华负责第3、4、5、8章的习题编写和文稿排版。

承蒙首届全国高校教学名师中国矿业大学于洪珍教授审阅本书,并提出了宝贵的修改意见,在此深表谢意。南京航空航天大学陈鸿茂教授仔细审阅了书稿,并提出了详细的修改意见与建议,特此感谢。研究生杨玲、陈妤、任晋华、吴祎、袁鹏、王晓艳、刘斐文、罗慧等参与了书中插图绘制和文稿录入工作,在此一并致谢。

由于编者的能力和水平所限,书中可能存在疏漏和不当之处。恳请各位读者批评指正。

编 者

2010年11月于南京

# 目 录

## 前言

## 本书主要符号说明

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体的特性	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	2
1.1.4 PN 结的形成	3
1.1.5 PN 结的单向导电性	4
1.1.6 PN 结的电容特性	5
1.2 半导体二极管	7
1.2.1 二极管的结构	7
1.2.2 二极管的特性曲线	7
1.2.3 二极管的主要参数	9
1.2.4 二极管的电路模型	9
1.2.5 特殊二极管	11
1.3 半导体三极管	15
1.3.1 三极管的结构	15
1.3.2 三极管的工作原理	15
1.3.3 三极管的特性曲线	17
1.3.4 三极管的主要参数	19
1.3.5 三极管的电路模型	21
1.4 场效应晶体管	23
1.4.1 结型场效应管	23
1.4.2 绝缘栅场效应管	27
1.4.3 场效应管的主要参数	32
1.4.4 场效应管的小信号模型	33
1.4.5 场效应管与晶体三极管的比较	34
1.5 光电子器件	34
本章小结	40
习题	40
第 2 章 放大电路基础	45
2.1 放大器的概念与技术指标	45
2.1.1 放大器的概念	45
2.1.2 放大器的主要技术指标	45
2.2 共射放大电路	47

2.2.1	共射放大电路的组成及工作原理	47
2.2.2	放大电路的分析方法	49
2.2.3	放大电路的工作点稳定问题	56
2.3	共基和共集放大电路	59
2.3.1	共基放大电路	59
2.3.2	共集放大电路	60
2.3.3	三种组态三极管放大电路的比较	62
2.4	场效应管放大电路	63
2.4.1	场效应管放大电路的偏置电路与直流分析	64
2.4.2	场效应管组成的三种基本放大电路交流分析	65
2.5	多级放大电路	68
2.5.1	级间耦合方式	68
2.5.2	多级放大电路的分析	70
2.6	放大电路的频率响应	72
2.6.1	频率响应概述	73
2.6.2	高通电路和低通电路	74
2.6.3	三极管的频率参数及高频小信号模型	77
2.6.4	共射放大电路的频率响应	80
2.6.5	共基和共集放大电路的高频响应	85
2.6.6	多级放大电路的频率响应	86
	本章小结	88
	习题	89
<b>第3章</b>	<b>模拟集成运算放大器</b>	<b>95</b>
3.1	电流源电路	96
3.2	差动放大电路	102
3.2.1	双极型三极管差动放大电路	102
3.2.2	场效应管差动放大电路	109
3.2.3	差动放大电路的传输特性	111
3.3	双极型集成运算放大器	115
3.3.1	集成运算放大器的基本组成	115
3.3.2	典型BJT集成运算放大器	117
3.4	场效应管型集成运算放大器	119
3.4.1	BiFET集成运算放大器	119
3.4.2	CMOS集成运算放大器	120
3.5	集成运算放大器的主要技术参数	121
3.6	理想集成运算放大器	124
	本章小结	126
	习题	127
<b>第4章</b>	<b>模拟信号运算与处理电路</b>	<b>133</b>
4.1	基本运算电路	133
4.1.1	比例运算电路	133
4.1.2	求和运算电路	137
4.1.3	积分和微分运算电路	140



4.1.4	对数和反对数运算电路	142
4.1.5	非理想集成运放运算电路的误差分析	144
4.2	有源滤波器	148
4.2.1	滤波电路的作用与分类	148
4.2.2	一阶有源滤波器	149
4.2.3	二阶有源滤波器	150
4.2.4	状态变量滤波器	157
4.2.5	开关电容滤波器	158
4.3	电压比较器	161
4.3.1	单门限比较器	161
4.3.2	迟滞比较器	163
4.3.3	窗口比较器	165
4.3.4	集成电压比较器	166
4.4	模拟乘法器	168
4.4.1	模拟乘法器工作原理	168
4.4.2	模拟乘法器应用	171
	本章小结	175
	习题	176
<b>第5章</b>	<b>反馈放大电路</b>	<b>185</b>
5.1	反馈的基本概念与分类	185
5.1.1	反馈的基本概念	185
5.1.2	反馈的分类与判断	185
5.1.3	反馈放大电路的方框图表示及其一般表达式	193
5.2	负反馈对放大电路性能的影响	195
5.2.1	提高放大电路的稳定性	195
5.2.2	减小非线性失真	196
5.2.3	扩展通频带	196
5.2.4	抑制反馈环内噪声	198
5.2.5	对输入电阻和输出电阻的影响	198
5.3	深度负反馈放大电路的分析计算	202
5.3.1	深度负反馈的特点	202
5.3.2	深度负反馈放大电路的计算	203
5.4	负反馈放大电路的稳定性分析	207
5.4.1	负反馈放大电路的自激振荡与稳定性工作条件分析	207
5.4.2	常用的频率补偿方法	210
	本章小结	213
	习题	214
<b>第6章</b>	<b>信号产生电路</b>	<b>221</b>
6.1	正弦波振荡电路	221
6.1.1	正弦振荡电路的基本工作原理	221
6.1.2	RC正弦振荡电路	223
6.1.3	LC正弦振荡电路	227
6.1.4	石英晶体正弦振荡电路	233

6.2	非正弦信号发生器	236
6.2.1	矩形波信号发生器	236
6.2.2	三角波信号发生器	239
6.2.3	锯齿波信号发生器	240
6.2.4	压控振荡器	241
6.3	集成多功能函数信号发生器	243
	本章小结	245
	习题	245
<b>第7章</b>	<b>功率放大电路</b>	<b>252</b>
7.1	功率放大电路的一般问题	252
7.1.1	功率放大电路的特点	252
7.1.2	功率放大电路提高效率的主要途径	253
7.2	互补推挽功率放大电路	255
7.2.1	乙类互补对称功率放大电路	255
7.2.2	甲乙类互补对称功率放大电路	260
7.2.3	准互补对称功率放大电路	261
7.2.4	单电源互补对称功率放大电路	262
7.2.5	变压器耦合推挽功率放大电路	263
7.3	丁类功率放大器	264
7.4	集成功率放大器	266
7.4.1	通用型集成功率放大器 LM386	266
7.4.2	集成音频放大器 MAX9712	268
7.5	功率器件	269
7.5.1	功率 BJT	269
7.5.2	功率 MOSFET	271
7.5.3	IGBT 功率模块	272
	本章小结	274
	习题	275
<b>第8章</b>	<b>直流稳压电源</b>	<b>279</b>
8.1	整流与滤波电路	280
8.1.1	整流电路	280
8.1.2	滤波电路	281
8.2	线性直流稳压电路	285
8.2.1	串联型线性直流稳压电路	286
8.2.2	线性集成稳压器	291
8.3	开关直流稳压电路	298
8.3.1	串联型开关直流稳压电路	299
8.3.2	变换型开关直流稳压电路	304
	本章小结	308
	习题	309
	参考文献	313



# 第 1 章 半导体器件

## 【内容提要】

首先介绍半导体的基础知识,如半导体特性、本征与杂质半导体、PN 结的形成、PN 结的单向导电性等。接着讨论半导体二极管的结构、特性曲线、主要参数与电路模型,重点阐述双极型三极管和场效应晶体管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数与电路模型。最后分析典型光电子器件原理及应用。

## 1.1 半导体基础知识

### 1.1.1 半导体的特性

半导体器件是构成各种电子电路和集成电路的基础,半导体器件又由半导体材料组成。半导体材料的导电性能介于导体与绝缘体之间,常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)及化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等,其中硅材料是目前最常用的半导体材料。当半导体材料受到外部光和热的激发时,其导电能力将发生显著变化。如果在纯净的半导体中加入少量的杂质元素,其导电能力也会显著增加。

半导体的导电性能是由其原子结构决定的。硅的原子序数是 14,在硅原子中共有 14 个电子围绕原子核旋转,最外层的轨道上有 4 个电子,称为价电子。锗的原子序数是 32,原子最外层的轨道上也有 4 个价电子,所以硅和锗都是 4 价元素。用带有 +4 电荷的正离子以及它周围的 4 个价电子来表示一个 4 价元素的原子,如图 1.1.1 所示。



图 1.1.1 4 价元素原子简化结构模型

在硅或锗的晶体中,原子在空间排列成有规则的晶格。其中每个原子最外层的价电子,不仅受到自身原子核的束缚,同时也受到相邻原子核的吸引。因此,每个价电子不仅围绕自身的原子核,同时也围绕相邻的原子核运动。也就是说,两个相邻的原子共有一对价电子,这一对价电子组成共价键,如图 1.1.2 所示。在硅或锗的晶体中,每个原子都与周围的 4 个原子以共价键的形式紧密地结合在一起,组成整齐的晶格结构。

### 1.1.2 本征半导体

不含杂质的纯净半导体称为本征半导体。

在本征半导体中,由于晶体中共价键的结合力很强,在热力学温度为零度时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,因此在  $T = 0\text{K}$  时晶体中不存在能够导电的载流子。在常温下,受本征激发仅有少数价电子获得足够的能量,克服共价键的束缚而成为自由电子。但因为自由电子的数量很少,所以本征半导体的导电能力非常弱。

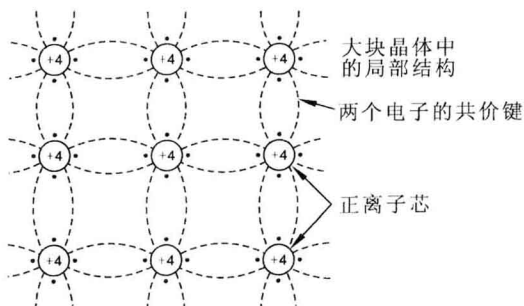


图 1.1.2 晶体中的价电子与共价键

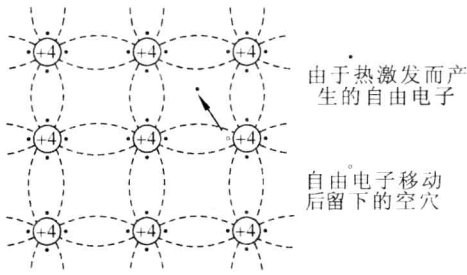


图 1.1.3 本征半导体中的自由电子与空穴

当本征半导体中的某些价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时,在原来的共价键中留下一个空位,这种空位称为空穴,如图 1.1.3 所示。本征激发中,自由电子和空穴相遇而释放能量,电子和空穴将成对消失,即自由电子和空穴的复合。在空穴附近共价键中的电子受本征激发形成自由电子,比较容易填补该空穴,而在附近的共价键中又留下一个新的空位,同样,其他地方的电子又有可能来填补后一个空位。从效果上看,这种共有电子的填补运动,

相当于带正电荷的空穴在运动,这种运动称为空穴运动,并将空穴视为带正电的载流子。由此可见,半导体中存在两种载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴。

在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现的,称其为自由电子-空穴对,因此两种载流子的浓度是相等的。本征半导体中载流子的浓度,除了与半导体材料本身的性质有关外,还与温度密切相关,随着温度的升高,浓度将按指数规律增加。因此,其导电率将随温度的增加而增加。另一方面,空穴和自由电子的本征激发和复合是时刻存在的,当它们的浓度相等时,本征激发和复合达到了一种动态平衡。

### 1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质就会使半导体的导电性能发生显著的变化。根据掺入杂质的性质不同,杂质半导体可分为 P 型半导体和 N 型半导体两大类。

#### 1. P 型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入少量的 3 价的杂质元素(如硼),因硼原子只有 3 个价电子,它与周围硅原子形成共价键时,缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位,当相邻共价键上的电子受到热激发或在其他激发条件下获得能量,就有可能填补这个空位,使硼原子成为不能移动的负离子,并带有一个单位的负电荷,而原来硅原子共价键则因缺少一个电子形成了空穴,但整个半导体仍呈中性而不带电,如图 1.1.4 所示。

在加入受主杂质产生空穴时,并不产生新的自由电子。但原来的本征晶体中由于本征激发仍会产生少量的自由电子-空穴对。控制掺入杂质的浓度,便可控制空穴数量。在这种半导体中空穴数量远大于自由电子的数量,以空穴导电为主,因而空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子,故称为 P(空穴)型半导体。其中 3 价硼原子在硅晶体中能接受电子,故称硼为受主杂质。

#### 2. N 型半导体

与 P 型半导体类似,在 4 价的硅(或锗)晶体中掺入少量的 5 价杂质元素(如磷),则原来晶体中的一

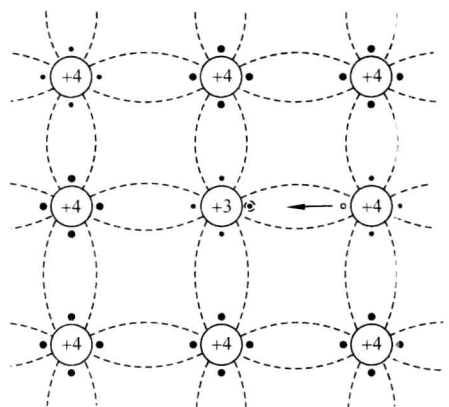


图 1.1.4 P 型半导体的结构模型

些硅原子将被杂质原子代替。而杂质原子的最外层有 5 个价电子,它与周围 4 个硅原子组成共价键时将多余一个电子,这个电子不受共价键的束缚,只受自身原子核的吸引,这种束缚力比较微弱,在室温下即可成为自由电子,如图 1.1.5 所示。失去自由电子的杂质原子固定在晶体上不能移动,并带有一个单位的正电荷,称为正离子。在这种杂质半导体中,电子的浓度远远大于空穴的浓度,以电子导电为主,因而电子为多数载流子,空穴为少数载流子,故称为 N(电子)型半导体。其中 5 价的杂质原子提供电子,称为施主杂质。

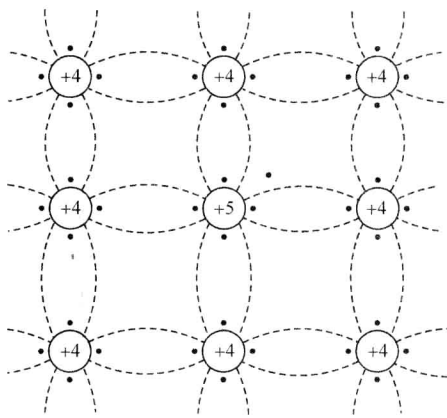


图 1.1.5 N 型半导体的结构模型

综上所述,半导体掺入杂质后,载流子的数目都有相当程度的增加。若每个受主杂质都能产生一个空穴,或者每个施主杂质都能产生一个自由电子,尽管杂质含量很少,但它们对半导体的导电能力却有很大的影响。因而在半导体中掺杂是提高半导体导电能力的有效方法。

#### 1.1.4 PN 结的形成

如果将一块半导体的一侧掺杂成 P 型半导体而另一侧掺杂成 N 型半导体,则在两者的交界处将形成个 PN 结。

在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧,由于多数载流子的电子和空穴的浓度相差悬殊,所以 N 区中的多数载流子电子要向 P 区扩散;同时, P 区的多数载流子空穴也要向 N 区扩散,如图 1.1.6(a)所示,当电子和空穴相遇时将发生复合而消失,于是在交界面两侧分别形成由不能移动的正负离子组成的空间电荷区,如图 1.1.6(b)所示。由于空间电荷区内缺少可以自由运动的载流子,所以又称为耗尽层。在扩散之前,无论 P 区还是 N 区,从整体来说各自都保持着电中性。但是,由于多数载流子的扩散运动,电子和空穴因复合而消失,空间电荷区中只剩下不能参加导电的正负离子,因而破坏了 P 区和 N 区原来的电中性,在图 1.1.6(b)中,空间电

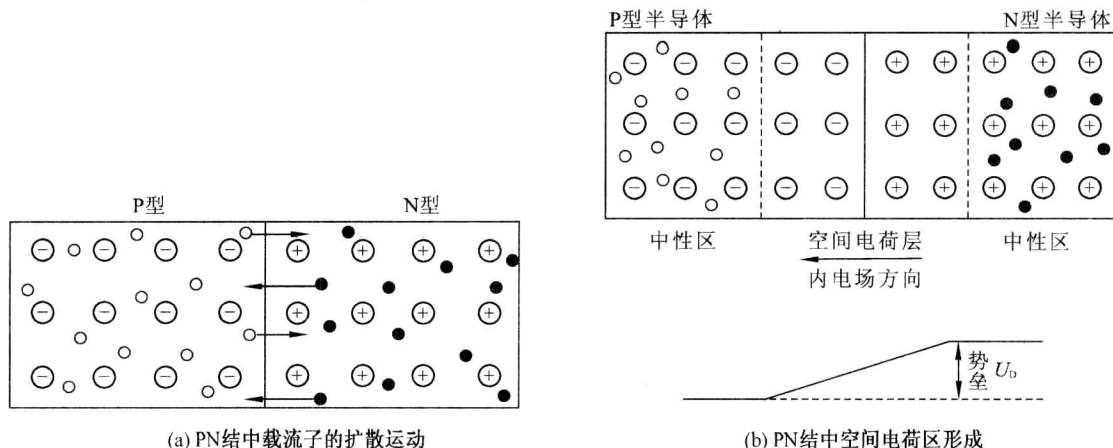


图 1.1.6 PN 结的形成

荷区的左侧(P区)带负电,右侧(N区)带正电,因此在两者之间产生了一个电位差 $U_D$ ,称为势垒。它的电场方向是由N区指向P区,这个电场称为内电场。因为空穴带正电,而电子带负电,所以内电场的作用将阻止多数载流子继续进行扩散,所以又称为阻挡层。但是,这个内电场却有利于少数载流子的运动,即有利于P区中的电子向N区运动,N区中的空穴向P区运动。通常,少数载流子在电场作用下的定向运动称为漂移运动。

PN结中有两种载流子的运动,即扩散运动和漂移运动。多数载流子的扩散运动产生了扩散电流,而少数载流子的漂移运动产生了漂移电流。随着多数载流子扩散运动的进行,PN结空间电荷区的宽度逐渐增大。而随着少数载流子漂移运动的进行,PN结空间电荷区的宽度逐渐减小。当扩散电流与漂移电流相等时,空间电荷区的宽度不再加大。一般地,空间电荷区很薄,为几微米至几十微米。势垒 $U_D$ 的大小与半导体材料有关,硅材料为 $0.6\sim 0.8V$ ,锗材料为 $0.2\sim 0.3V$ 。

### 1.1.5 PN结的单向导电性

当PN结中载流子运动处于平衡状态时,称为平衡PN结。在施加外加电压时,PN结具有单向导电性。

#### 1. 外加正向电压

在图 1.1.7 中,当PN结外加正向电压 $U$ ,即 $U$ 的正端接P区,负端接N区时,外加

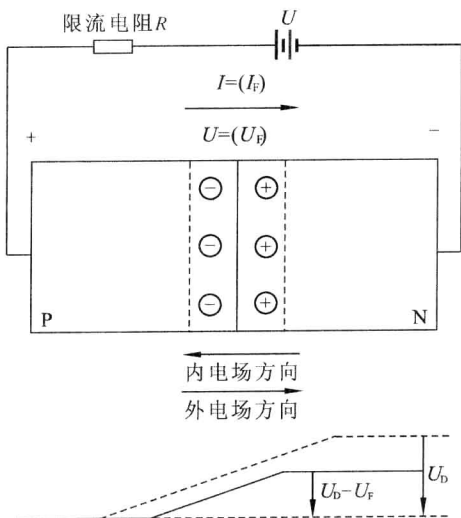


图 1.1.7 PN结外加正向电压

电场与PN结内电场方向相反。在这个外加电场作用下,PN结的平衡状态被打破,P区中的多数载流子空穴和N区中的多数载流子电子都要向PN结移动,即P区空穴进入PN结后,就要和原来的一部分负离子中和,使P区的空间电荷量减少。同样,当N区电子进入PN结时,中和了部分正离子,使N区的空间电荷量减少,结果PN结变窄,这时耗尽区厚度变薄,因而电阻的阻值减小,所以通常将这个方向的外加电压称为正向电压。

由于半导体本身的体电阻比PN结上的电阻小很多,所以外加电压作用后,其值将集中降落在PN结上,因此,外加电压将使PN结的电场由 $U_D$ 减小到 $U_D - U_F$ 。PN结电场强度的减小,有利于P区和N区中多数载流子的扩散运动形成扩散

电流,这时扩散运动将大于漂移运动,N区电子不断扩散到P区,P区空穴不断扩散到N区。PN结内的电流主要由扩散电流所决定,在外电路上形成一个流入P区的电流,称为正向电流 $I$ 。当外加电压 $U$ 升高,PN结电场便进一步减弱,扩散电流随之增加,在正常工作范围内,PN结上外加电压只要稍有变化便能引起电流的显著变化,因此电流 $I$ 是随外加电压迅速上升的。这样正向的PN结表现为一个阻值很小的电阻,此时也称PN结导通。同时,由少数载流子形成的漂移电流,其方向与扩散电流相反,与正向电流比较,其数值很小可忽略不计。

## 2. 外加反向电压

在图 1.1.8 中,外加反向电压  $U$  的正极接 N 区,负极接 P 区,外加电场方向与 PN 结内电场方向相同。在这种外电场作用下,P 区中的空穴和 N 区中的电子都将进一步离开 PN 结,使耗尽层厚度加宽,此时 PN 结就处于反向偏置。

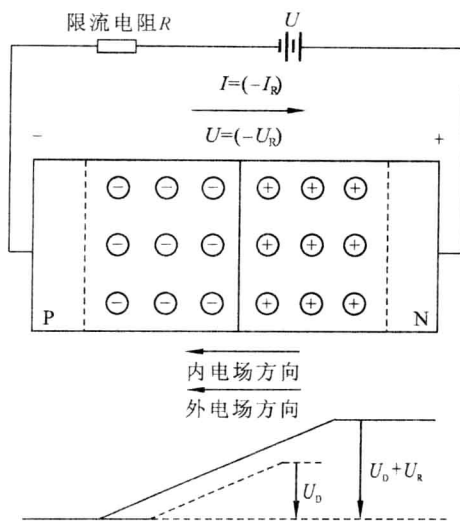


图 1.1.8 PN 结外加反向电压

外加电压将使 PN 结电场由  $U_D$  增加到  $U_D + U_R$ 。PN 结电场强度的增加,阻碍了多数载流子的扩散运动,因此扩散电流趋近于零。但是 PN 结电场的增加,N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动,因此在这种情况下 PN 结内的电流由漂移电流决定。漂移电流的方向与扩散电流相反,表现在外电路上有一个流入 N 区的反向电流  $I_R$ 。它是由少数载流子的漂移运动形成的。由于少数载流子的浓度很小,所以  $I_R$  是很微弱的,一般硅管为微安数量级。同时,少数载流子是由本征激发产生的,其数值决定于温度,与外加电压  $U_R$  几乎无关。在一定温度  $T$  下,由于热激发而产生的少数载流子的数量是一定的,电流的值趋于恒定,此时该电流称为反向饱和电流  $I_S$ 。

### 1.1.6 PN 结的电容特性

PN 结的耗尽层内的空间电荷量与耗尽层外载流子数量在外加电压变化时将发生变化,这种电荷量随外加电压变化的现象,称为 PN 结的电容效应。按产生机理可以分为扩散电容和势垒电容。PN 结的电容效应直接影响半导体器件(二极管、三极管和场效应管等)的高频特性和开关性能。

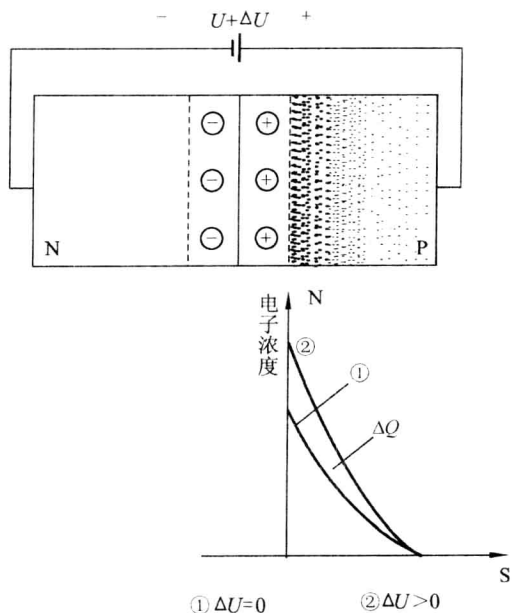


图 1.1.9 PN 结的扩散电容形成示意图

#### 1. 扩散电容 $C_D$

当 PN 结处于正向偏置时,空间电荷区 P 区的空穴将向 N 区扩散,其结果导致在 N 区靠近 PN 结的边缘有高于正常情况时的空穴浓度,这种超量的空穴浓度可视为电荷存储到 PN 结的两侧。存储电荷量的大小,取决于 PN 结上所加正向电压的大小,离 PN 结越远其浓度越低,这是空穴在 N 区与电子产生复合所致。类似地,N 区的电子向 P 区扩散。其浓度  $N$  分布曲线呈指数规律,如图 1.1.9 所示。

当外加电压有一定的增量  $\Delta U$  时,相应的空穴(或电子)扩散运动在 PN 结两侧产生一定的电荷增量  $\Delta Q$ ,二者之比  $\Delta Q/\Delta U$  为扩散电容  $C_D$ ,即

$$C_D = \frac{\Delta U}{\Delta Q} \quad (1.1.1)$$

PN 结在正向偏置时, 积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随正向电压的增加其数量很快增加, 扩散电容较大。而反向偏置时, 载流子数目很少, 扩散电容很小, 一般可以忽略不计。因此, 扩散电容主要发生在 PN 结正向偏置工作时。

## 2. 势垒电容 $C_B$

势垒电容是由 PN 结空间电荷区中的电荷量变化形成的, 如图 1.1.10 所示。当 PN 结反向偏置电压减小时, P 区和 N 区靠近 PN 结的区间中, 一部分多子在扩散过程中与空间电荷区中的离子中和, 使 PN 结变窄、离子电荷量减少; 当 PN 结反向偏置电压增加时, 导致 PN 结变宽、离子电荷量增加。这种电压变化使 PN 结空间电荷区中电量发生变化的现象是一种电容效应, 用势垒电容表征。其大小与 PN 结的面积成正比, 与空间电荷区的宽度  $L$  成反比。PN 结反向偏置时,  $L$  很大, 故  $C_B$  很小; 而当 PN 结正向偏置时,  $L$  很小,  $C_B$  很大。

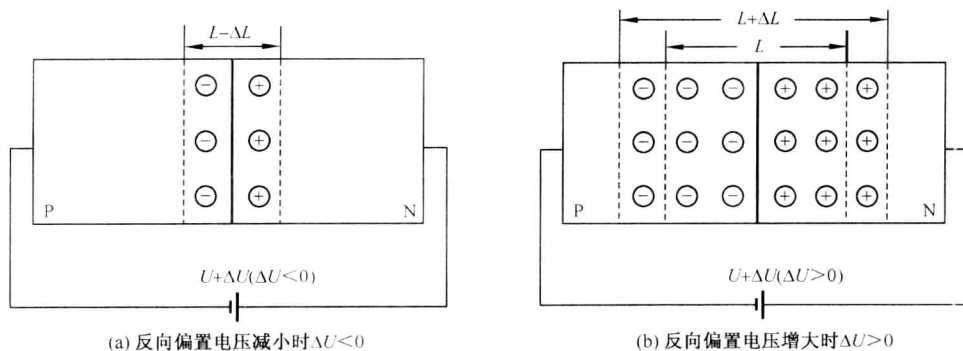


图 1.1.10 PN 结的势垒电容形成示意图

扩散电容和势垒电容都随外加电压改变而改变, 与普通电容不一样, 属于非线性电容。PN 结的结电容  $C_j$  是扩散电容  $C_D$  和势垒电容  $C_B$  之和, 即

$$C_j = C_D + C_B \quad (1.1.2)$$

当 PN 结正向偏置时,  $C_j$  一般以  $C_D$  为主; 反向偏置时, 则近似等于  $C_B$ 。PN 结反向偏置时的结电容虽然很小, 但此时 PN 结的结电阻很大, 在这种情况下, 结电容的容抗随工作频率提高而降低时, 对 PN 结单向导电特性的影响很大。

综上所述, PN 结的电容效应是扩散电容  $C_D$  和势垒电容  $C_B$  的综合反映, 在高频运用时, 必须考虑 PN 结电容的影响。

## 思 考 题

- 1.1.1 空间电荷区是由电子、空穴还是由施主离子、受主离子构成的? 空间电荷区又称为耗尽层, 为什么?
- 1.1.2 要使 PN 结处于正向偏置, 外接电压的极性应该如何连接?
- 1.1.3 PN 结处于反向偏置时, 耗尽层的宽度是增加还是减少, 为什么?
- 1.1.4 简述 PN 结的单向导电原理。
- 1.1.5 PN 结的电容效应包括哪两个方面? 应分别在什么条件下考虑?



## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 二极管的结构

半导体二极管是以PN结为核心,在PN结的两端各引出一个电极,并加管壳封装而成。PN结的P型半导体一端引出的电极为阳极(或称正极),PN结的N型半导体一端引出的电极为阴极(或称负极)。普通二极管按使用的半导体材料不同分为硅管和锗管,按其结构的不同可分为点接触型和平面型两类。

点接触型二极管的结构如图1.2.1(a)所示,其PN结面积很小,所以极间电容很小,适用于高频电路和数字电路。例如,2AP1是点接触型锗二极管,最大整流电流为16mA,最高工作频率为150MHz。但是这种类型的二极管不能承受高的反向电压和大的导通电流。

平面型二极管的PN结是用合金法或扩散法做成的,其结构如图1.2.1(b)所示。由于这种二极管的PN结面积大,可承受较大的电流,但极间电容也大。这类器件适用于整流,不宜用于高频电路中。例如,2CP1为面接触型硅二极管,最大整流电流为400mA,最高工作频率只有3kHz。

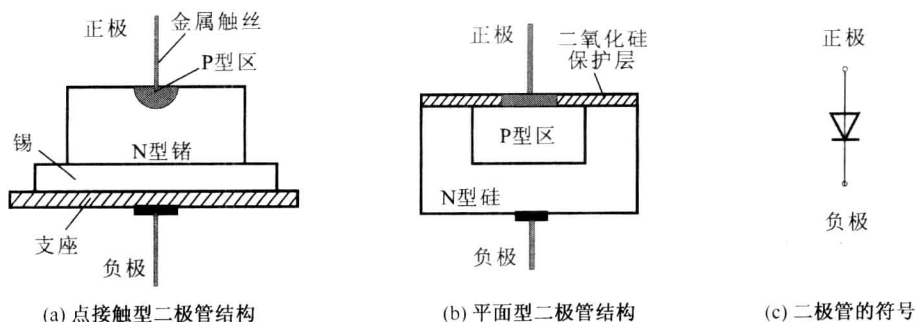


图 1.2.1 半导体二极管的结构及符号

### 1.2.2 二极管的特性曲线

半导体二极管两端电压  $u_D$  与流过的电流  $i_D$  之间的关系称为伏安特性,伏安特性曲线如图1.2.2所示,其中实线为硅二极管,虚线为锗二极管。

#### 1. 正向特性

当二极管正向偏置(即  $u_D > 0$ )时,  $i_D \sim u_D$  正向伏安特性曲线近似地呈现为指数曲线。由于二极管的引线电阻、体电阻都很小,电极间的漏电阻又很大,对二极管的伏安特性的影响均不大,故可用式(1.2.1)近似地表示二极管的伏安特性。

$$i_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (1.2.1)$$

式中,  $U_T$  为温度的电压当量,常温下为 26mV。

不论是硅管还是锗管,当正向偏置电压较小时,  $i_D$  近似为零,二极管仍未完全导通,这一

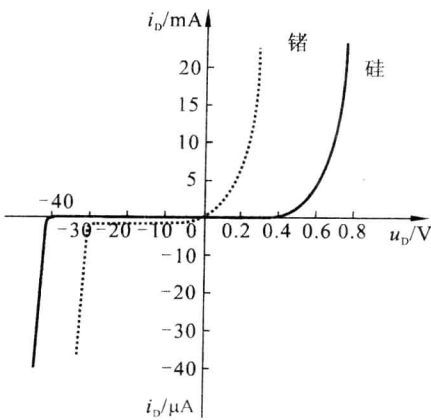


图 1.2.2 二极管的伏安特性曲线

电压称为门坎电压(又称死区电压)。硅管的门坎电压约为0.5V,锗管约为0.1V;二极管的工作电压  $u_D$  大于门坎电压后,电流  $i_D$  迅速增加,二极管开始导通。硅管的正向导通电压约0.7V,锗管约为0.2V。当  $u_D \gg U_T$  时,则有  $\exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right) \gg 1$ ,故有

$$i_D = I_S \exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right) \quad (1.2.2)$$

上式表明二极管具有近似于指数特征的正向伏安特性。因此,  $u_D \gg U_T$  后,电流  $i_D$  上升极快,其上升斜率可通过对式(1.2.2)求导获得,有

$$\frac{di_D}{du_D} = I_S \exp\left(\frac{u_D}{U_T}\right) \frac{1}{U_T} \approx \frac{i_D}{U_T} \quad (1.2.3)$$

$\frac{du_D}{di_D}$  称为二极管的动态电阻或交流电阻,记作  $r_d$ , 则有

$$r_d \approx \frac{U_T}{i_D} \quad (1.2.4)$$

## 2. 反向特性

当二极管反向偏置(即  $u_D < 0$ )时,二极管反向电流由半导体中少数载流子漂移形成,故在室温下反向电流很小。小功率硅二极管的反向饱和电流  $I_S$  一般小于  $0.1\mu A$ ,锗管的  $I_S$  为几十到几百微安。在二极管击穿之前,反向电流几乎不随反向电压的变化而改变。

当反向偏置电压超过某一定数值以后,反向电压的增加将使反向电流急剧增大,由此二极管就发生反向击穿。当二极管发生反向击穿后,如果反向电流不是太大,则二极管的功耗不大,PN结的温度也不会超过允许的最高结温(如硅管为  $150\sim 200^\circ C$ ,锗管为  $75\sim 100^\circ C$ ),二极管也不会损坏,此时若降低反向电压到击穿电压以下,则二极管仍能继续工作(即具有正常的伏安特性),因而这种击穿是可逆的,称为电击穿;但是,当二极管发生电击穿后,若仍继续增大反向电压,反向电流也随之增大,则管子会因功耗过大导致PN结的温度超过最高允许温度而烧坏,造成二极管的永久性损坏,故这种击穿是不可逆的,称为热击穿。产生热击穿的机理通常分为齐纳击穿和雪崩击穿。

(1) 齐纳击穿:对于掺杂浓度高的PN结,空间电荷区的宽度很薄,所以在较低的反向电压下,空间电荷区中就有较强的电场,足以把空间电荷区里的半导体原子的价电子从共价键中激发出来,形成载流子,使反向电流突然增大,出现击穿,这种击穿称为齐纳击穿。当二极管击穿电压低于4V时,击穿主要是由齐纳击穿所致。击穿电压还受温度的影响,发生齐纳击穿的二极管,当温度上升时,价电子的能量增加,使价电子激发需要的电压变小,所以齐纳击穿电压具有负的温度系数。

(2) 雪崩击穿:对于掺杂浓度低的PN结,空间电荷区的宽度很宽,需要更高的电压才能在空间电荷区中有较强的电场,使少数载流子的漂移运动加速,当它们与共价键中的价电子发生“碰撞”时,会产生新的载流子,这一现象称为“碰撞电离”。碰撞电离产生的新的载流子又被加速,又会与共价键中的价电子发生“碰撞”,产生越来越多新的载流子,出现雪崩似的连锁反

应,引起反向电流剧增,导致二极管被击穿。这种击穿称为雪崩击穿,其击穿电压一般大于6V。由于温度上升时,晶体中的原子热运动加剧,被加速的少子在产生碰撞电离前与原子发生“摩擦”的机会增加,损耗部分能量,所以要有更高的反向电压才能使二极管击穿,也就是说雪崩击穿具有正的温度系数。

击穿电压介于4~6V之间时,两种击穿都可能发生,也可能同时发生,这时击穿电压的温度系数较小。用于整流的二极管,其击穿电压一般大于6V,故其击穿属雪崩击穿,只有硅稳压二极管的反向击穿电压有小于或等于4V的可能,才会出现齐纳击穿。

### 1.2.3 二极管的主要参数

#### 1. 最大整流电流 $I_F$

最大整流电流是指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过PN结要引起管子发热,电流太大,则引起发热量超过限度,就会使PN结烧坏。

#### 2. 反向击穿电压 $U_{BR}$

反向击穿电压是指二极管反向击穿时的电压值。当发生反向击穿时,反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏。一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半,以确保二极管能安全运行。例如,2AP1最高反向工作电压规定为20V,而反向击穿电压实际上大于40V。

#### 3. 反向电流 $I_R$

反向电流是指管子未击穿时的反向电流。 $I_R$ 值越小,表明二极管的单向导电性越好。随着温度增加,反向电流会明显增加,所以在使用二极管时要注意温度的影响。

#### 4. 极间电容 $C_j$

极间电容是反映二极管中PN结电容效应的参数,因PN结中存在扩散电容 $C_D$ 和势垒电容 $C_B$ ,则有 $C_j = C_D + C_B$ 。二极管结电容的值通常为几皮法至几十皮法,有些结面积大的二极管结电容可达几百皮法。在高频运用时,必须考虑极间电容的影响。

#### 5. 最高工作频率 $f_M$

$f_M$ 数值主要决定于PN结电容的大小。结电容越大,则二极管允许的最高工作频率越低。当工作频率大于 $f_M$ 时,将使二极管单向导电性变差。

### 1.2.4 二极管的电路模型

#### 1. 理想模型

图1.2.3(a)中虚线表示实际二极管的伏安特性,粗实线表示理想二极管的伏安特性。图1.2.3(b)为理想二极管的符号。由图可见在正向偏置时,其管压降为0V,而当二极管处于反向偏置时,认为它的电阻为无穷大,电流为零。在实际的电路中,当电压源电压远比二极管的管压降大时,利用此模型来近似分析是可行的。