



普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材

低频电子线路

刘树林 程红丽 编著



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书从电气、电子信息类专业学生对电子技术知识的实际需求出发,通俗流畅地介绍了常用半导体器件及其所组成电路的原理、基本分析方法和实际应用。

本书共分为8章,内容包括:半导体二极管及其应用,三极管及其放大电路,放大电路中的反馈,低频功率放大电路,多级放大电路与集成运算放大器,波形发生器,直流电源和电子线路读图。每章的后面有思考题和习题,并给出一些很有价值的实训内容。

本书可作为高等学校电气、电子信息类专业“电子技术基础”课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路/刘树林等编著,一北京:机械工业出版社,2007.8

普通高等教育“十一五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-21602-5

I. 低… II. 刘… III. 低频-电子电路-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第081095号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:于苏华 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英
封面设计:张静 责任印制:杨曦
三河市国英印务有限公司印刷
2007年8月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·17.25印张·426千字
标准书号:ISBN 978-7-111-21602-5
定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前言

“低频电子线路”是电气、电子信息类专业学生学好电类其他后续课程的入门基础课，为使学生易于理解、增强教材的可读性，编者结合多年从事电子技术教学工作和应用实践的经验及体会，力求将抽象的问题通俗化、将复杂的问题简单化；在对具体问题进行论述时，避免采用繁琐的公式推导，而是结合图、表和波形，用通俗流畅的语言对有关问题进行由浅入深的分析。本教材内容深浅适中、通俗易懂，既适合相关专业作为教材，也适合其他专业学生、研究人员作为参考书，尤其便于自学。本教材主要特色如下：

1. 内容编排特色

1) 将常用半导体器件的介绍融入到各章节的具体应用电路中，半导体元件本身的介绍后紧接着讲授由它组成的各种应用电路，内容连贯性好，学生学习起来更容易。

2) 从基本放大电路的稳定性问题引出反馈放大电路。

3) 从基本放大电路引出功率放大电路（即集成运算放大器的输出级）。

4) 从基本放大电路放大倍数的局限性引出多级放大电路，多级放大电路重点强调直接耦合电路，再从直接耦合电路的问题引出差动放大电路（即集成运算放大器的输入级）。

5) 在第5章中，将多级放大电路、直接耦合电路、差动放大电路与运算放大器一起讲授，其特点是：运算放大器实际上是一多级放大电路，将它们放在一起很自然地由分立元件过渡到集成电路，从而更容易了解集成电路的优点，强调了集成电路的重要性。

以上的内容安排，均围绕一个重点——集成运算放大器。集成运算放大器以前的章节相当于讲授它的内部电路，以后的章节相当于介绍它的应用。

6) 有了基本放大电路和集成运算放大器的基础知识后，再讲授波形发生电路（正弦波振荡器和非正弦波发生电路），可以集成运放为主，也可以分立元件来讲授，内容编写更灵活，学生也更容易接受。

7) 电子线路读图是本书所学内容的一个综合，也是本书的特点之一。通过一些实用电路的分析，可使学生了解所学知识的用途和重要性，同时可提高学生分析问题和解决问题的能力。

2. 内容安排的系统性和连贯性

本教材在内容安排上特别注重章与章、节与节、段与段之间内容的衔接和连贯性，使学生更容易理解和自学，更能激发学生学习热情。

3. 重点、难点突出

重点内容以小标题的形式在文中出现，有助于学生抓住重点、难点，提高学习效率和学习效果。

4. 注重实践训练和实用性

本教材在注重理论与实际相结合方面还具有以下特点：

1) 对于本教材涉及的重点、难点内容或知识点，均附有实例，以加深学生对相应知识点的理解。

2) 在讲述元器件或集成电路基本知识的同时, 本教材在相应内容后面还列举了常用元件或集成电路的型号、参数等, 以备参考和选用。

3) 各章的后面均附有相应的实践训练内容, 有助于加深学生对本章所学知识的理解, 提高学生的动手能力。

本教材的参考学时为 72~90 学时 (包括实训), 各院校可根据具体情况而定。

本书的第 1、2、3、7 章由刘树林编写, 第 4、5、6、8 章由程红丽编写。全书经翟俊祥教授主审, 主审过程中对本书的定位和内容安排等方面提出了许多宝贵意见, 作者在此表示诚挚的感谢。

参加和支持本书编写的同志还有董敏、李旭虹、杨建翔、杨波、王守华、杨俊三等, 他们对本书的编写提供了许多宝贵资料和建议, 在此表示感谢。

同时向所有关心和帮助本书编写、出版的同志一并表示谢意。

由于时间仓促和水平有限, 书中难免有错误和不妥之处, 恳请读者指正。

编著者

常用符号说明

A	放大倍数或增益的通用符号	I_S	二极管反向饱和电流
A_c	共模电压放大倍数	I_Z	稳压管稳定电流
A_d	差模电压放大倍数	K_{CMR}	共模抑制比
A_i	电流放大倍数	L	电感通用符号
A_u	电压放大倍数、增益	P_{CM}	三极管集电极最大允许耗散功率
A_{uf}	有反馈时（闭环）电压放大倍数、增益	P_{DM}	场效应晶体管漏极最大允许耗散功率
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数、增益	P	功率通用符号
A_{usf}	有反馈且考虑信号源内阻时的电压放大倍数、增益	P_o	输出功率
A, K	二极管的阳极、阴极	P_{om}	输出功率最大值
BW	频带宽度	Q	静态工作点
b, c, e	三极管的基极、集电极、发射极	R	固定电阻通用符号
C	电容通用符号	RP	电位器通用符号
C_i	输入电容	R_i	输入电阻
C_o	输出电容	R_o	输出电阻
C_f	反馈电容	R_L	负载电阻
D, G, S	场效应管的漏极、栅极、源极	R_s	信号源内阻
F	反馈系数通用符号	R_f	反馈电阻
f_T	三极管特征频率	R_T	热敏电阻
f	频率通用符号	T, t	时间、周期、温度
I_B, U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流电流和直流电压	$U_{CC}, U_{EE}, U_{DD}, U_{BB}$	直流电源电压
I_b, U_{be}	大写字母、大写下标表示交流电流和电压有效值	U_{REF}	参考电压
$i_b, \dot{U}_{be}$	大写字母上面加点、小写下标表示电流和电压正弦相量	U_{BR}	二极管反向击穿电压
i_B, u_{BE}	小写字母、大写下标表示总电流和电压瞬时值	U_{CES}	三极管集电极-发射极间的饱和压降
i_b, u_{be}	小写字母、小写下标表示交流电流和电压分量瞬时值	U_{CEO}	三极管基极开路时集电极-发射极间的反向击穿电压
I_+, U_+	集成运放同相输入端的电流、电压	U_Z	稳压管稳定电压
I_-, U_-	集成运放反相输入端的电流、电压	U_P	耗尽型场效应晶体管夹断电压
I_f, U_f	反馈电流、电压	U_T	增强型场效应晶体管开启电压
I_i, U_i	输入电流、电压	VT	三极管、晶闸管通用符号
I_o, U_o	输出电流、电压	VF	场效应晶体管通用符号
I_{CM}	集电极最大容许电流	VD	半导体二极管通用符号
I_{DSS}	场效应晶体管饱和漏极电流	VZ	稳压管通用符号
		α	共基电流增益
		β	共射电流增益
		τ	时间常数
		ω	角频率
		φ	相位差、相角
		η	效率

目 录

前言

常用符号说明

第1章 半导体二极管及其应用 1

- 1.1 半导体基础知识 1
 - 1.1.1 半导体 1
 - 1.1.2 本征半导体 2
 - 1.1.3 杂质半导体 3
- 1.2 PN结与二极管 4
 - 1.2.1 PN结及其单向导电性 4
 - 1.2.2 二极管及其伏安特性 5
 - 1.2.3 二极管的主要参数 7
- 1.3 二极管的实用简化模型 8
 - 1.3.1 理想二极管模型 9
 - 1.3.2 恒压降二极管模型 9
 - 1.3.3 折线近似的二极管模型 10
 - 1.3.4 二极管的微变等效电路模型 11
- 1.4 二极管的分类和应用 12
 - 1.4.1 普通整流二极管及其应用 12
 - 1.4.2 稳压管及其应用 13
 - 1.4.3 光电二极管及其应用 16
 - 1.4.4 发光二极管及其应用 16
- 1.5 实践训练——二极管的测试和
 判别 18
- 思考题与习题 20

第2章 三极管及其放大电路 22

- 2.1 双极型三极管 22
 - 2.1.1 三极管的结构和分类 22
 - 2.1.2 三极管的外部连接要求 22
 - 2.1.3 三极管的电流分配与放大
 作用 23
 - 2.1.4 三极管的伏安特性和主要
 参数 26
- 2.2 放大电路基础 30
 - 2.2.1 放大电路原理框图 30
 - 2.2.2 放大的概念 30
 - 2.2.3 放大电路的主要性能指标 31
- 2.3 共射放大电路的组成和工作原理 32

- 2.3.1 共射放大电路的构成和
 各元件的作用 32
- 2.3.2 共射放大电路的放大原理 34
- 2.3.3 放大电路的组成原则 34
- 2.4 放大电路的分析方法 35
 - 2.4.1 直流通路和交流通路 35
 - 2.4.2 静态工作点 36
 - 2.4.3 图解分析法 37
 - 2.4.4 微变等效电路分析法 45
- 2.5 放大电路静态工作点的稳定问题 49
 - 2.5.1 温度对静态工作点的影响 49
 - 2.5.2 放大电路静态工作点的
 稳定性分析 49
- 2.6 基本放大电路的三种组态 52
 - 2.6.1 共基极放大电路 53
 - 2.6.2 共集电极放大电路 56
 - 2.6.3 三种基本放大电路的比较 58
- *2.7 场效应晶体管放大电路 60
 - 2.7.1 场效应晶体管简介 60
 - 2.7.2 基本共源极放大电路 65
 - 2.7.3 分压式自偏压共源极放大电路 66
 - 2.7.4 共漏极放大电路 68
- 2.8 放大电路的频率响应 70
 - 2.8.1 频率响应概述 70
 - 2.8.2 三极管的频率特性 71
 - 2.8.3 单管共射放大电路的频率响应 74
- 2.9 实践训练 77
 - 2.9.1 三极管的测试和极性判别 77
 - 2.9.2 单管共射放大电路及参数
 测试 80
- 思考题与习题 83

第3章 放大电路中的反馈 88

- 3.1 反馈的概念 88
- 3.2 反馈的分类及其判别 88
 - 3.2.1 正、负反馈及其判别 89
 - 3.2.2 直流、交流反馈及其判别 90
 - 3.2.3 电压、电流反馈及其判别 90

3.2.4 串联、并联反馈及其判别	90	安装与测试	124
3.2.5 负反馈的四种组态及其判别	91	思考题和习题	126
3.3 负反馈放大电路的一般分析方法	93	第5章 多级放大电路与集成运算	
3.3.1 反馈的框图表示	93	放大器	129
3.3.2 反馈的一般关系式	94	5.1 多级放大电路	129
3.4 负反馈对放大电路性能的影响	96	5.1.1 多级放大电路的组成	129
3.4.1 负反馈对放大倍数稳定性的影响	96	5.1.2 多级放大电路的耦合方式	130
3.4.2 负反馈对输入和输出电阻的影响	96	5.1.3 多级放大电路的分析方法	131
3.4.3 负反馈对非线性失真的影响	97	5.1.4 各类耦合方式存在的问题	134
3.4.4 负反馈对频带范围的影响	98	5.2 差动放大电路	136
3.5 深度负反馈电路的分析计算	98	5.2.1 概述	136
3.5.1 深度负反馈的条件	98	5.2.2 基本的差动放大电路	136
3.5.2 放大电路在深度负反馈条件下的分析计算	99	5.2.3 射极耦合差动放大电路	138
3.6 负反馈放大电路的稳定性问题	101	5.2.4 恒流源式差动放大电路	142
3.6.1 负反馈放大电路的自激振荡问题	101	5.2.5 差动放大电路的输入输出连接方式	143
3.6.2 防止振荡的措施	103	5.2.6 差动放大电路的传输特性	144
3.7 实践训练——负反馈放大电路的应用	104	5.2.7 FET 差动放大电路	145
思考题和习题	106	5.3 集成运算放大器	145
第4章 低频功率放大电路	110	5.3.1 集成电路及其分类	145
4.1 功率放大电路的特点和分类	110	5.3.2 集成运算放大电路的外形和工艺特点	146
4.1.1 功率放大电路的特点	110	5.3.3 集成运算放大器的符号	147
4.1.2 功率放大器的分类	111	5.3.4 集成运算放大器的基本组成	147
4.2 互补对称功率放大电路	112	5.3.5 集成运算放大器中的电流源	148
4.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路	112	5.4 集成运算放大器的技术指标和分类	150
4.2.2 甲乙类互补对称功率放大器	115	5.4.1 集成运算放大器主要技术指标	150
4.2.3 单电源互补对称功率放大器	116	5.4.2 集成运算放大器的分类	153
4.3 D类功率放大器	118	5.5 理想运算放大器	154
4.3.1 D类功率放大器的基本组成	118	5.5.1 理想运算放大器(电压型)的技术指标	154
4.3.2 实验型D类功率放大电路	118	5.5.2 理想运算放大器工作在线性区的特点	154
4.4 集成功率放大器	119	5.5.3 理想运算放大器工作在非线性区的特点	155
4.4.1 集成功率放大电路分析	119	*5.5.4 理想跨导运算放大器简介	156
4.4.2 集成功率放大电路的主要性能指标	120	5.6 集成运算放大器的线性应用之一——基本的信号运算电路	158
4.4.3 集成功率放大器的应用要点	121	5.6.1 比例运算电路	158
4.4.4 集成功率放大电路的应用实例	121	5.6.2 加法和减法运算	161
4.5 实践训练——集成功率放大器		5.6.3 积分和微分运算	163

5.6.4 对数和反对数运算	164	6.4 石英晶体振荡电路	205
5.6.5 模拟乘法器	165	6.4.1 正弦波振荡电路的频率 稳定问题	205
5.7 集成运算放大器的线性应用之二 ——有源滤波电路	169	6.4.2 石英晶体的基本特性与 等效电路	205
5.7.1 滤波电路的种类和用途	169	6.4.3 石英晶体振荡电路	206
5.7.2 有源低通滤波电路	170	6.5 非正弦波产生电路	207
5.7.3 有源高通滤波电路	172	6.5.1 矩形波发生器	207
5.7.4 有源带通滤波电路	173	6.5.2 三角波发生器	208
*5.7.5 跨导——电容连续时间 滤波器	174	6.5.3 锯齿波发生器	209
5.8 集成运算放大器的非线性应用	176	6.5.4 集成函数发生器 8038 简介	210
5.8.1 简单电压比较器	176	6.6 实践训练	212
5.8.2 双门限比较器	178	6.6.1 RC 桥式振荡电路	212
5.8.3 迟滞比较器	179	6.6.2 方波、三角波发生器	214
5.9 集成运算放大器应用需注意的 几个问题	181	思考题和习题	216
5.9.1 集成运放参数的测试	181	第7章 直流电源	220
5.9.2 集成运放使用中可能出现 的问题	181	7.1 直流电源的组成	220
5.9.3 集成运放的保护	182	7.2 单相整流电路	221
5.10 实践训练	183	7.2.1 整流电路的基本参数	221
5.10.1 差动放大器及参数测试	183	7.2.2 单相半波整流电路	221
5.10.2 运放的线性应用 ——各类运算电路	185	7.2.3 单相全波整流电路	222
5.10.3 运放的非线性应用 ——电压比较器	188	7.2.4 单相桥式全波整流电路	223
思考题与习题	190	7.2.5 倍压整流电路	224
第6章 波形发生器	194	7.3 单相可控整流电路	225
6.1 振荡电路概述	194	7.3.1 晶闸管(可控硅)简介	225
6.1.1 产生正弦波振荡的条件	194	7.3.2 单相半波可控整流电路	227
6.1.2 振荡电路的组成	195	7.3.3 单相桥式可控整流电路	228
6.1.3 正弦波振荡电路的分析	195	*7.4 三相可控整流电路	229
6.2 RC 桥式正弦波振荡电路	196	7.4.1 三相半波可控整流电路	230
6.2.1 RC 串并网络选频的特性	196	7.4.2 三相桥式全控整流电路	232
6.2.2 RC 桥式正弦波振荡电路的振荡 频率和起振条件	198	7.5 滤波电路	234
6.2.3 稳幅措施	199	7.5.1 电容滤波电路	234
6.2.4 频率的调节	199	7.5.2 电感滤波电路	235
6.3 LC 正弦波振荡电路	200	7.5.3 组合滤波电路	236
6.3.1 LC 选频放大电路	200	7.6 晶体管稳压电路	237
6.3.2 变压器反馈式振荡电路	201	7.6.1 基本串联型稳压电路	237
6.3.3 电感三点式振荡电路	203	7.6.2 带有放大环节的串联型 稳压电路	237
6.3.4 电容三点式振荡电路	204	7.6.3 具有过载保护环节的稳压 电路	238
		7.7 集成稳压器	239
		7.7.1 固定三端稳压器	239
		7.7.2 可调三端稳压器	240

7.8 开关电源	241	8.2 读图方法	251
7.8.1 概述	241	8.2.1 读图的一般方法	251
7.8.2 开关电源的组成和工作原理	242	8.2.2 读图的步骤	251
7.8.3 开关电源的质量指标	243	8.3 读图举例	252
*7.8.4 实用的开关电源	244	8.3.1 音频放大电路	252
7.9 实践训练——三端集成稳压器的		8.3.2 W78 × × 系列三端集成	
测试与应用	246	稳压器	257
思考题与习题	248	8.3.3 通用型集成运算放大器	260
第8章 电子线路读图	251	思考题和习题	264
8.1 概述	251	参考文献	266

第 1 章 半导体二极管及其应用

在本征半导体中掺入 P 型和 N 型杂质，其交界处就形成了 PN 结。PN 结具有单向导电性，是构成众多半导体器件的基础。在 PN 结的两端引出两个电极，并在外面装上管壳，就成为半导体二极管。

本章首先简要地介绍半导体的基础知识，接着讨论 PN 结的原理和特性，然后重点讨论半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数以及二极管的实用简化模型。最后对普通整流二极管、稳压二极管、光电二极管和发光二极管的特性及其应用给予具体介绍。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体

自然界中的物质按导电能力强弱的不同，可以分为三大类：导体、绝缘体和半导体。导体是导电能力特别强的物质，例如一般的金属、碳和电解液等；绝缘体是导电能力特别差，几乎不导电的物质，例如胶木、橡胶和陶瓷等；半导体（Semiconductor）是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，常用的半导体材料有锗（Ge）、硅（Si）和砷化镓（GaAs）等，大多数半导体器件所用的主要材料就是锗和硅。

尽管半导体的导电性能不如导体，绝缘性能又不如绝缘体，但半导体却得到广泛的应用，现代电子技术的发展实际上就是半导体技术的发展。为什么半导体技术会有如此之大的影响力呢？主要在于半导体具有如下一些奇妙特性：

（1）杂敏性 半导体对杂质很敏感。在半导体硅中只要掺入 10^{-8} 的硼（B），电导率就会增大到原来的几万倍。而且，在半导体中不同的部分掺入不同的杂质就呈现不同的性能。

人们用控制掺杂的方法，精确地控制半导体的导电能力，制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件，如普通半导体二极管、晶体三极管、晶闸管、电阻和电容等。再采用一些特殊工艺，将各种半导体器件进行适当的连接就可制成具有某一特定功能的电路——集成电路，甚至系统，这是半导体最具魅力之处。

（2）热敏性 半导体对温度很敏感。温度每升高 10°C ，半导体的电导率就增加一倍。这种特性对半导体器件的工作性能有许多不利影响，但利用这一特性可制成自动控制中有用的热敏电阻，热敏电阻可以感知万分之一摄氏度的温度变化。

把热敏电阻装在机器的各个重要部位，就能集中控制和测量它们的温度。用热敏电阻制作的恒温调节器，可以把环境温度稳定在上下不超过 0.5°C 的范围内。在农业上，热敏电阻能准确地测出植物叶面的温度和土壤的温度。另外它还能测量辐射，几百米远人体发出的热辐射或 1km 外的热源均能方便地测出。

（3）光敏性 半导体对光照很敏感。半导体受光照射时，它的电导率会增加一倍。例

如,一种硫化镉(CdS)的半导体材料,在一般灯光照射下,它的电导率是移去灯光后的几十倍或几百倍。

自动控制中用的光电二极管、光电晶体三极管和光敏电阻等,就是利用这一特性制成的。

应用这些光电器件可以实现路灯、航标灯的自动控制,制成火灾报警装置,可以进行产品自动计数,实现机器设备的人身安全保护等。

半导体之所以具有这些特性,其根本原因在于它的特殊结构。下面对此进行讨论。

1.1.2 本征半导体

纯净的半导体材料称为本征半导体。半导体原子结构的简化模型如图1-1所示,每个原子的最外层有四个电子(通常称为价电子)。在硅或锗的晶体中,原子在空间排列成为规则的晶格,呈晶体状态,所以半导体也称晶体。两个相邻的原子共有一对价电子,形成所谓共价键。在绝对零度时,每个原子都和周围的四个原子以共价键的形式相互紧密结合,如图1-2所示。由于此时的本征半导体不存在自由电子,所以没有导电能力,就等同于绝缘体。

在室温下,由于价电子的热运动,共价键中的某些电子可以获得足够的动能,挣脱原子核的束缚,离开共价键而成为“自由电子”,这种现象称为热激发,又叫本征激发。共价键中的电子在挣脱束缚成为自由电子后,在它原来的位置就会留下一个空位,称为“空穴”,如图1-3所示。空穴处因缺少了一个带负电的价电子而呈现出正电性,所以空穴带正电。邻近的价电子很容易被此空穴所吸引,跑来填补这个空位,并在邻近原子处又生成一个新的空位,这就是“空穴的运动”。可见,自由电子和空穴总是成对出现的,称为“电子空穴对”。热激发导致电子空穴对的产生,而自由电子在移动过程中又可能填补某个空穴,这时就会消失一个电子空穴对,这称为电子与空穴的“复合”。产生的电子空穴对愈多,复合的机会也就愈大,本征热激发和复合是半导体中两个相反的过程,它们永不休止地进行着,但在一定的温度时,热激发和复合得到动态平衡。这时,半导体中电子和空穴的浓度也就相对固定下来。所以本征半导体中电子空穴对的数目是和温度有关的。在室温下,本征半导体中存在的电子空穴对数量是很有限的,其导电能力也很弱。在本征半导体中电子和空穴总是成对出现的,所以自由电子和空穴的数量相等。

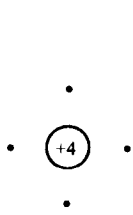


图1-1 原子简化模型

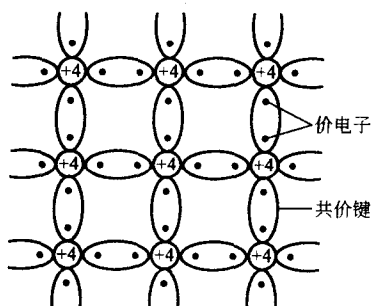


图1-2 半导体的共价键结构

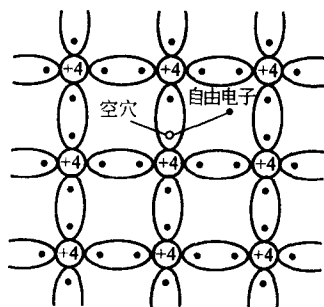


图1-3 本征半导体中的电子和空穴

在外加电场的作用下, 半导体中的自由电子向电源正极移动形成电子电流, 而空穴向负极移动形成空穴电流。可见, 电子和空穴是半导体中两种运载电荷的粒子, 统称为“载流子”。半导体有两种载流子同时参与导电, 这是半导体区别于金属导体的一个重要特性。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体在室温下所存在的电子空穴对很少, 因此导电能力很差。但是只要在本征半导体中掺入千万分之一的某种杂质, 其导电能力就会大大改善。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。人们通过掺入不同种类和数量的杂质元素, 来控制半导体的导电性能, 制造出众多的半导体器件, 如二极管、晶体三极管、场效应晶体管、集成电路以及各种特殊的半导体器件。根据掺入的杂质不同, 可分为N型半导体和P型半导体两类。

1. N型半导体

在硅(或锗)晶体中掺入五价元素(如磷、砷、锑等)后, 杂质原子就代替了晶体中某些硅原子的位置, 它同相邻的四个硅原子组成共价键时, 就多余一个价电子, 该电子在共价键之外, 在室温下就很容易挣脱束缚成为自由电子。同时, 杂质原子因失去一个价电子而成为正离子, 它们在晶阵中不能移动, 也不参与导电。由于杂质原子可提供大量的自由电子, 而不产生空穴, 这样在半导体中自由电子的数量远大于空穴的数量。这种半导体将以自由电子导电为主, 所以称自由电子为“多数载流子”(简称多子), 空穴为“少数载流子”(简称少子), 我们把这种半导体称为N型半导体或电子型半导体。N型半导体的结构示意图如图1-4所示。

2. P型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入少量三价元素(如硼、铝、镓等)后, 杂质原子的三个价电子与周围的硅原子形成共价键时, 出现一个空穴, 如图1-5所示。邻近的价电子受到热激发获得能量时, 就很有可能填充这个空穴, 使杂质原子变成不能移动的负离子。杂质原子在产生空穴的同时并不产生新的自由电子, 使得半导体中的空穴数量远多于自由电子的数量, 即空穴是多子, 自由电子是少子, 我们把这种杂质半导体称为P型半导体或空穴型半导体。

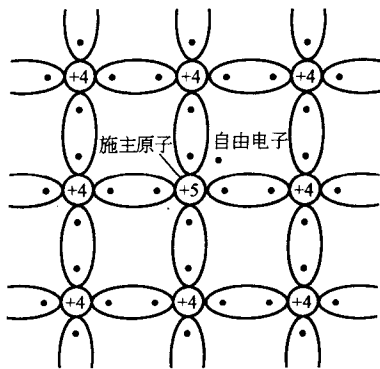


图1-4 N型半导体中的晶体结构

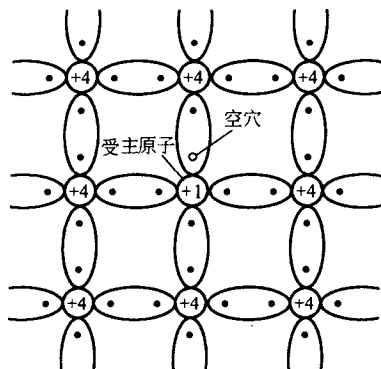


图1-5 P型半导体中的晶体结构

应当指出, 本征半导体掺入某种杂质的过程中, 既不损失电荷, 也未获得电荷, 整个半导体内正负电荷处于平衡状态, 所以杂质半导体呈电中性。在本征半导体中掺入微量杂质

后, 其导电能力可以大大增强, 通过控制杂质浓度可以改变其导电能力的强弱。在半导体集成电路中, 电阻元件就是基于这样的原理而制做的。

1.2 PN 结与二极管

1.2.1 PN 结及其单向导电性

一块本征半导体中掺进不同的杂质, 使一部分为 P 型, 另一部分为 N 型, 那么在 P 型与 N 型中间就会产生一个过渡区, 这个过渡区具有特殊的电学性能, 称为 PN 结。PN 结是构成众多半导体器件的基础, 下面我们就来讨论 PN 结的形成和它的单向导电性。

1. PN 结的形成

一块杂质半导体, 它的一侧是 P 区, 另一侧为 N 区, 在 P 区和 N 区之间形成一交界面, 如图 1-6 所示。P 区的多子是空穴, 少子是自由电子; 而 N 区的多子是电子, 少子是空穴, 这样在 P 区和 N 区的交界面就出现了多子和少子的浓度差。N 区的电子向 P 区运动, P 区的空穴向 N 区运动, 这种由于浓度差异而引起的运动称为“扩散运动”。扩散到 P 区的电子不断地与空穴复合, 同时 P 区的空穴向 N 区扩散, 并与 N 区中的电子复合。交界面两侧多子复合的结果就出现了由不能移动的带电极子组成的“空间电荷区”, 如图 1-6b 所示。N 区一侧出现正离子区, P 区一侧出现负离子区, 正负离子在交界面两侧形成一个内电场。由于内电场的存在, 电子要从 N 区到 P 区必须越过一个能量高坡, 一般称势垒, 因此又把空间电荷区称为势垒区。内电场对多子的扩散运动起阻碍作用的同时, 但又有利于 N 区中的少子(空穴)进入 P 区, P 区的少子(电子)进入 N 区, 这种在内电场作用下少子的运动称为“漂移运动”。扩散运动有助于内电场的加强, 内电场的加强将阻碍多子的扩散, 而有助于少子的漂移, 少子漂移运动的加强又将削弱内电场, 又有助于多子的扩散, 最终扩散运动和漂移运动必在一定温度达到动态平衡, 即在单位时间内由 P 区扩散到 N 区的空穴数量等于由 P 区漂移到 N 区自由电子的数量, 形成彼此大小相等、方向相反的漂移电流和扩散电流, 交界面的总电流为零。在动态平衡时, 交界面两侧缺少载流子的区域称为“耗尽层”, 这就是 PN 结。

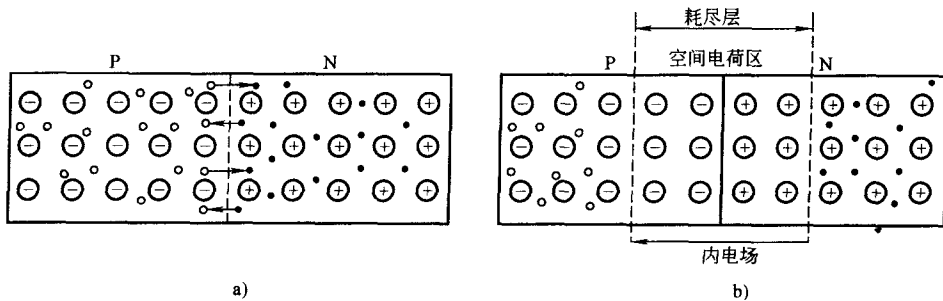


图 1-6 PN 结的形成

a) 多数载流子的扩散运动 b) 形成空间电荷区

综上所述, 在无外加电场或其他因素激发时, PN 结处于平衡状态, 空间电荷区的宽度就是一定的(约几微米到几十微米), 此时的 PN 结电阻很大, P 区与 N 区的体电阻与之比

较通常可以忽略。

2. PN 结的单向导电性

要想使 PN 结中有电流通过,就必须打破扩散和漂移所建立的动态平衡,这就需要给 PN 结外加电场。

(1) PN 结正偏——外加正向电压

在图 1-7 中,当 P 区接电源正端, N 区接电源负端时,外加电场与 PN 结内电场方向相反,内电场被削弱,耗尽层变窄,打破了 PN 结的平衡状态,使扩散占优势。多子形成的扩散电流通过回路形成很大的正向电流,此时 PN 结呈现的正向电阻很小,称为“正向导通”。为保护 PN 结,通常要在回路中串联一个限流电阻。

(2) PN 结反偏——外加反向电压

在图 1-8 中,当 P 区接电源负端, N 区接电源正端时,外加电场与 PN 结内电场方向相同,内电场被加强,耗尽层变宽,打破了 PN 结的平衡状态,使漂移占优势。两区的少子在�内电场作用下漂移过 PN 结形成了反向电流。因为少子浓度很低,所以反向电流很小,而且在温度一定时,少子的浓度基本保持恒定,故又称反向电流为反向饱和电流,用 I_s 表示。反偏的 PN 结所呈现的反向电阻很大,称为“反向截止”。

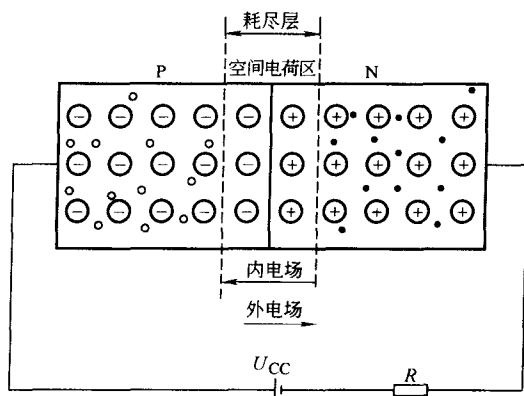


图 1-7 外加正向电压时的 PN 结

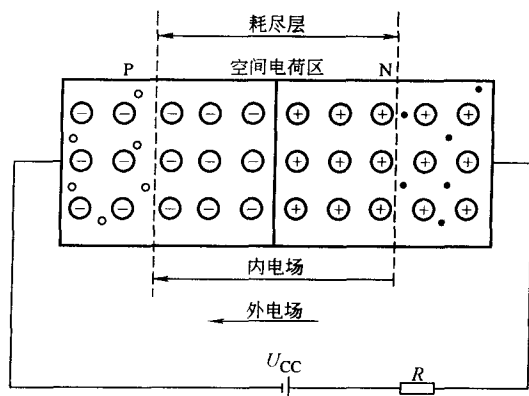


图 1-8 外加反向电压时的 PN 结

由以上分析可知,PN 结外加正向电压时,表现为正向导通;外加反向电压时,表现为反向截止,这就是 PN 结的单向导电性。

还应特别指出,当环境温度升高时,由于热激发使半导体内少数载流子的浓度也将增加,因此 PN 结的反向饱和电流将增大,这是造成温度变化时,半导体器件工作不稳定的重要因素,在实际应用中必须加以考虑。

1.2.2 二极管及其伏安特性

在 PN 结的两端引出两个电极,并在外面装上管壳,就成为半导体二极管。

1. 二极管的结构和符号

二极管的结构和符号如图 1-9 所示。接在 P 区的引出线称为二极管的阳极,用 A 表示;接在 N 区的引出线称为二极管的阴极,用 K 表示。

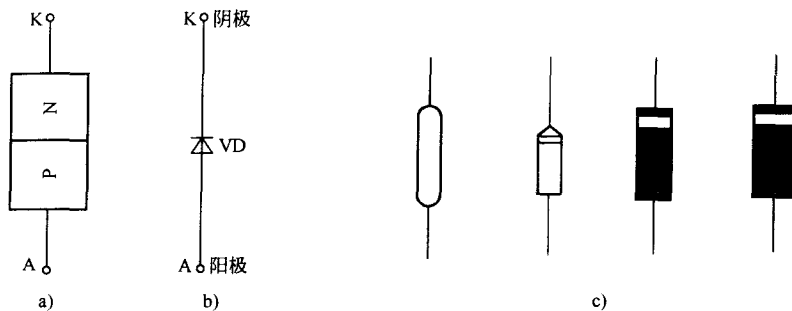


图 1-9 半导体二极管的结构、符号和外形

2. 二极管的伏安特性

加在二极管两端的电压和流过二极管电流间的关系称为二极管的伏安特性，二极管电压和流过二极管的电流可用图 1-10a 和 b 所示电路进行测试。

根据测出的二极管两端电压及对应的流过二极管的电流数值，所描绘出的电流随电压变化的曲线，称为二极管的伏安特性曲线，如图 1-11 所示（图中是硅二极管）。

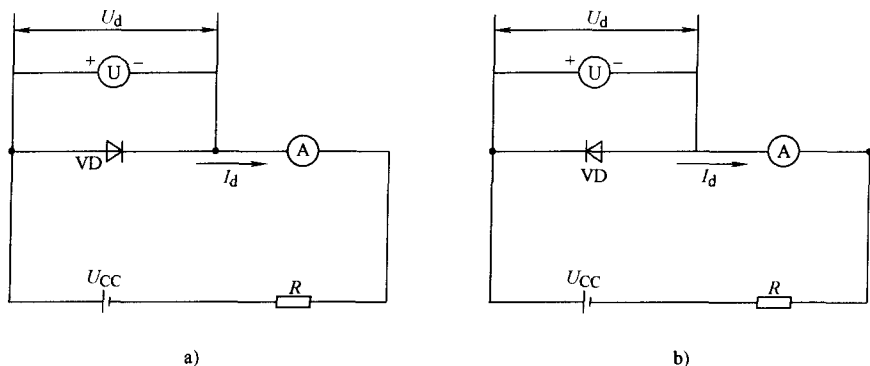


图 1-10 测试二极管伏安特性电路

a) 测正向伏安特性 b) 测反向伏安特性

下面对二极管伏安特性曲线加以说明。

(1) 正向特性 当二极管加正向电压（P 接电源的正端，N 接电源的负端）时，伏安特性曲线分为正向死区和正向导通区两部分。

1) 正向死区：图 1-11 所示 OA 区域，称为正向死区。当加在二极管两端正向电压较小时，正向电流极小（几乎为零），二极管呈现的电阻较大，这一部分区域称为正向特性的死区。随着二极管两端电压不断增大，超过电压 U_{th} 时，流过二极管的电流快速增加，称这个电压为门坎电压，有时也称死区电压。在常温下，硅管的门坎电压约为 0.5 ~ 0.7V，锗管约为 0.1 ~ 0.3V。

2) 正向导通区：图 1-11 所示 AB 段为正

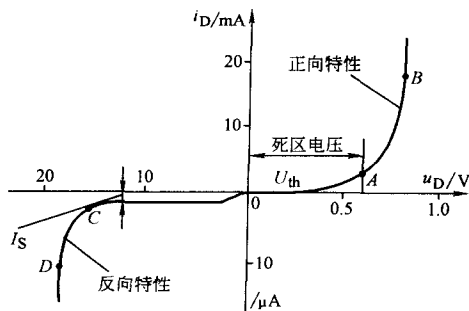


图 1-11 二极管伏安特性

向导通区。当二极管正向电压大于门坎电压 U_{th} 时, 电流随电压增加而迅速增大, 二极管处于导通状态, 电流与电压的关系基本上是一条指数曲线。此时, 正向电流上升很快, 而二极管的正向压降变化很小, 基本保持不变。

(2) 反向特性 当二极管两端加反向电压时, 伏安特性曲线分为反向截止区和反向击穿区两部分。

1) 反向截止区: 图 1-11 中 OC 段为反向截止区。在反向截止区给二极管加反向电压时, 反向电流很小, 呈现的电阻很大, 二极管处于反向截止状态。这时流过二极管的反向电流几乎不随反向电压的变化而变化, 该电流叫做反向饱和电流 I_s 。小功率硅管的 I_s 约为几十微安, 小功率锗管的 I_s 约为几百微安。温度升高时, 反向饱和电流随之增加。

2) 反向击穿区: 当反向电压增加到一定大小时, 反向电流急剧增加, 这种现象称为二极管的反向击穿, 如图 1-11 的 CD 段所示。这时的反向电压称为二极管的反向击穿电压, 用 U_{BR} 表示。二极管反向击穿后, 应当采取限流措施, 否则很大的反向击穿电流会使 PN 结温度迅速升高而烧坏 PN 结。普通二极管在实际应用中, 应尽量避免二极管的反向击穿。

(3) 二极管伏安特性的表达式 根据理论分析, 二极管的伏安特性可表示为

$$i_D = I_s (e^{U_D/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, U_D 为加在二极管两端的电压; U_T 为温度电压当量, 在常温下 (热力学温度 300K) 为 26mV; i_D 为通过二极管的电流; I_s 为二极管的反向饱和电流。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是工程设计中选用二极管的主要依据。二极管的主要参数如下:

(1) 最大正向电流 I_F 该电流是指二极管长期运用时允许通过的最大正向平均电流, 如果实际工作时的正向平均电流超过此值, 二极管内的 PN 结可能会过分发热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_R 该电压是指正常使用时所允许加在二极管两端的最大反向电压。为了确保二极管安全工作, 通常取二极管反向击穿电压 U_{BR} 的一半作为 U_R 。

(3) 反向饱和电流 I_s 该电流是指二极管未击穿时的反向电流, 其值愈小, 则二极管的单向导电性愈好。由于反向电流会随着温度的增加而增加, 所以在使用二极管时要注意温度的影响。

(4) 极间电容 在二极管的 PN 结交界处形成的势垒区, 是积累空间电荷的区域, 当 PN 结两端加上交变电压时, 空间电荷就会随之改变, PN 结就会显示出电容效应。外加电压变化频率越高, 电容效应就越显著。这可用图 1-12 表示二极管的高频等效电路, 其中 r 表示结电阻, C 表示结电容, 包括势垒电容和扩散电容的总效果。

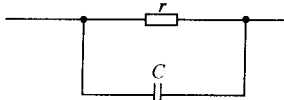


图 1-12 PN 结高频等效电路

1) 势垒电容 C_B : 由于 PN 结的势垒区中空间电荷随外加电压的变化而变化形成的电容效应称势垒电容。势垒电容 C_B 的大小与 PN 结面积 S 成正比, 与耗尽层厚度 δ 成反比。在二极管反偏时, 结电容主要决定于势垒电容 C_B 。

2) 扩散电容 C_D : 由于加在 PN 结上的正向电压大小变化, 积累在 P 区的电子浓度或 N 区的空穴浓度随之发生变化, 从而形成了电容效应, 它反映了在外加电压作用下载流子在扩散过程中的积累情况, 因此称为扩散电容 C_D 。在二极管正偏时, 结电容主要决定于扩散电容 C_D 。

二极管的参数是正确使用二极管的依据,一般半导体手册中都给出了各种型号管子的参数。在使用时,应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压,否则管子容易损坏。

表 1-1 中列出一些常用二极管参数,以供参考。其中,2AP 型检波二极管(点接触型锗管),在电子设备中作检波和小电流整流用;2CZ52 ~ 2CZ59 系列整流二极管,用于电子设备的整流电路中。

表 1-1 几种半导体二极管的主要参数

(1) 国产 2AP 型锗二极管					
型号	最大整流电流 (平均值) I_F/mA	最高反向工作电压 (峰值) U_{RM}/V	反向电流 $I_S/\mu\text{A}$	最高工作频率 f/MHz	用途
2AP1	16	20	≤ 250	150	检波及小电流整流
2AP7	12	100	≤ 250	150	

(2) 国产 2CZ 系列硅整流二极管					
型号	最大整流电流 (平均值) I_F/A	最高反向工作电压 (峰值) U_{RM}/V	反向压降 U_F/V	反向电流 $I_S/\mu\text{A}$	用途
2CZ52	0.1	25 ~ 600	0.7	1	用于频率为 3kHz 以下电子设备的整 流电路中
2CZ53	0.3	25 ~ 400	1	5	
2CZ54	0.5	25 ~ 800	1	10	
2CZ55	1	25 ~ 1000	1	10	
2CZ56	3	100 ~ 2000	0.8	20	
2CZ57	5	25 ~ 2000	0.8	20	
2CZ58	10	100 ~ 2000	0.8	30	
2CZ59	20	25 ~ 1400	0.8	40	

(3) 整流二极管				
型号	最大整流电流 (平均值) I_F/A	最高反向工作电压 (峰值) U_{RM}/V	正向压降 U_F/V	反向电流 $I_S/\mu\text{A}$
IN4148	0.1	80	1	1
IN4001	1	100	1	5
IN4004	1	400	1	5
IN4007	1	1000	1	5
IN5391	1.5	100	1	5
IN5392	1.5	100	1	5
IN5399	1.5	1000	1	5
IN5401	3	100	1	5
IN5404	3	400	1	5
IN5408	3	1000	1	5

1.3 二极管的实用简化模型

从上面的分析可以看到,二极管的伏安特性是非线性的,所以我们不能用以前学过的用