

■ 徐长根 张建超 王瑞萍 王秀丽 编著

电子 线路

融合低频高频 确保基本要求
回避深奥理论 淡化数学运算
注重物理意义 结合实际应用
难度由浅入深 内容通俗易懂
兼顾图文并茂 便于对比学习



清华大学出版社

电子 线路

常州大学图书馆
藏书章

徐长根 张建超 王瑞萍 王秀丽 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本针对高职高专通信与电子类专业的试验教材,力图将低频电子线路和高频电子线路的主要内容进行归并,以帮助学生缩短专业基础课程的学习时间。在编写上以够用、易学为原则,回避深奥理论,淡化数学运算,注重物理意义,结合实际应用。

全书共12章:前7章分别是半导体器件基础、基本放大电路、多级放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大电路、功率放大电路和直流电源;后5章分别是正弦振荡电路、高频小信号放大电路、调制与解调、高频功率放大电路和高频自动控制。

本书内容连贯,通俗易懂,图文并茂,注重对比学习,并配有适度练习题。

本书可作为高职高专通信、电子、电气、自动化、机电一体化等专业基础课程教学的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员或电子技术爱好者参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电子线路/徐长根等编著.--北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-36968-4

I. ①电… II. ①徐… III. ①电子线路—高等职业教育—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 135278 号

责任编辑:田在儒

封面设计:傅瑞学

责任校对:袁芳

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:18

字 数:413千字

版 次:2014年9月第1版

印 次:2014年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.80元

产品编号:060139-01

本书力图将低频电子线路和高频电子线路的主要内容进行归并,以够用、易学为原则,帮助学生缩短专业基础课程的学习时间,以便有效地进入专业课程的学习和训练,尽快融入社会需求之中。

本书适合于高职高专通信和电子类专业,要求学生在此之前已经完成“电路”和“电子装配工艺”课程的学习。

本书共12章,其中低频电路7章,高频电路5章。建议全学期理论教学学时数为96,配套的实验教学学时数为32,实验内容视教学条件而定。

本书每节的内容比较均衡,首尾呼应,独立性较强。每节的难度逐步加大,尽量做到深入浅出,言简意赅;强化物理分析,弱化公式计算;突出实际应用,回避深奥理论;注重对比学习和图表的视觉效果,文字描述通俗易懂。

本书低频部分注意到知识的逐步演进:半导体器件基础→基本放大电路→多级放大电路→负反馈放大电路→集成运算放大电路→功率放大电路→直流电源。在负反馈放大电路之前,将直接耦合放大电路和差动放大电路内容适度进行了展开;在集成运算放大电路之后,更侧重于从应用角度了解电路原理,物理意义解释多于数学分析。

本书用正弦振荡电路作为衔接,从低频部分过渡到高频部分,逐步引出关联的主要知识点:正弦振荡电路→高频小信号放大电路→调制与解调→高频功率放大电路→高频自动控制。在调制解调之前,把混频电路作为过渡,引出频率变换,小信号放大电路全部介绍之后,再进入高频功率放大电路,最后一章属于知识拓展内容。

本书配套练习题在每章篇末出现,确保掌握应知应会内容,难度逐渐加深。

本书已在校内试用两届。教学督导裴帮新对本书提出了许多宝贵意见,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位读者批评、指正。

编者

2014年5月

常用符号表

符号	量 名 称	符号	量 名 称	符号	量 名 称
基本符号		u_c	集电极瞬时电压	g_c	三极管变频跨导
I	电流	u_{be}	发射结瞬时电压	g_m	场效应管跨导
U	电压	u_{ce}	三极管管压降	I_{DSS}	场效应管饱和漏电流
P	功率	U_{CC}	集电极电源/可变直流电源	U_P	场效应管夹断电压
R	电阻	U_{BB}	基极电源	U_T	场效应管开启电压
G	电导	U_{EE}	发射极电源	高频参数	
X	电抗	I_{c0}	谐振电路直流分量	p	接入系数
B	电纳	I_{c1}	谐振电路基波分量	k	耦合系数
Z	阻抗 $Z=R+jX$	功率、效率		η	耦合因数
Y	导纳 $Y=G+jB$	P_u	电源提供功率	$ r $	反射系数
L	电感	P_o	电路输出功率	ρ	驻波比
C	电容	P_T	集电极损耗功率	Z_0	特性阻抗
M	互感	η	电路效率	M_n	调幅系数
t	时间	阻抗、导纳、频率		$K(t)$	开关函数
τ	时间常数	R_s	信号源内阻	K	乘法因子, 传输系数
F, f	频率	R_i	电路输入电阻	K_d	检波效率
ω	角频率	R_o	电路输出电阻	K_i	调频灵敏度
f_h	高端截止频率	R_L	电路负载电阻	K_p	调相灵敏度
f_l	低端截止频率	r	谐振电路损耗电阻	M_i	调频系数
f_{BW}	通频带 $f_{BW}=f_h-f_l$	g	谐振电路损耗电导	M_p	调相系数
φ	相位	f_0	谐振电路中心频率	$\Delta\omega$	频偏
Q	品质因数	R_0	谐振电路谐振电阻	$\Delta\varphi$	相移
A_u	电压增益	器件参数		S_i	鉴频灵敏度
A_i	电流增益	C_i	二极管结电容	θ	半导通角
A_p	功率增益	U_{th}	二极管死区电压	α	余弦脉冲分解系数
VT	三极管	U_{br}	二极管反向击穿电压	g_1	波形系数
VD	二极管	U_Z	稳压管稳压值	ξ	广义失谐
T	变压器	I_Z	稳压管工作电流		集电极电压利用系数
Y	石英晶体	r_Z	稳压管动态电阻	K_v	压控灵敏度
电压、电流		β	三极管直流放大倍数	K_d	鉴相灵敏度
$U(I)$	电压(电流)直流值	β	三极管交流放大倍数		
	下标大写表示直流	$r_{bb'}$	三极管基区体电阻		
	下标小写表示有效值	r_{be}	三极管输入电阻		
$u(i)$	电压(电流)瞬时值	I_{CBO}	三极管反向饱和电流		
	下标大写表示直流	I_{CEO}	三极管穿透电流		
	下标小写表示交流	I_{CM}	三极管最大集电极电流		
u_s	信号源电压	P_{CM}	三极管最大集电极功耗		
u_i	电路输入电压	U_{EBO}	三极管反向击穿电压		
u_o	电路带载输出电压	U_{CES}	三极管集电极饱和压降		
u'_o	电路空载输出电压	f_T	三极管特征频率		

第 1 章 半导体器件基础	1
1.1 半导体基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结及其单向导电特性	4
1.1.4 PN 结的生产制造	5
小结	6
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 二极管的结构与分类	6
1.2.2 二极管的正向特性	8
1.2.3 二极管的反向特性	10
1.2.4 二极管的使用	11
小结	13
1.3 半导体三极管	13
1.3.1 三极管的基本识别	13
1.3.2 三极管的物理特性	15
1.3.3 三极管的特性曲线	17
1.3.4 三极管的主要技术参数	18
小结	19
1.4 场效应晶体管	19
1.4.1 结型场效应管	20
1.4.2 绝缘栅型场效应管	22
1.4.3 场效应管的主要参数	24
1.4.4 各种场效应管的特性比较	24
小结	25
习题一	26
第 2 章 基本放大电路	29
2.1 共发射极放大电路(1)	29

2.1.1	放大电路的基本概念	29
2.1.2	共发射极放大电路	31
2.1.3	电流电压符号与波形	33
小结		34
2.2	共发射极放大电路(2)	34
2.2.1	放大电路的动态分析方法	35
2.2.2	静态工作点及稳定方法	37
小结		39
2.3	共集电极放大电路.....	40
2.3.1	共集电极放大电路基本概念	40
2.3.2	共集电极放大电路原理分析	41
2.3.3	共集、共射放大电路综合运用.....	43
2.3.4	共集、共射放大电路对比分析.....	45
小结		46
2.4	共基极放大电路.....	46
2.4.1	共基极放大电路基本概念	46
2.4.2	共基、共射放大电路对比分析.....	49
2.4.3	三极管三种放大电路比较	49
2.4.4	三极管应用电路	50
小结		51
2.5	场效应管放大电路.....	51
2.5.1	场效应管的直流偏置	51
2.5.2	场效应管的微变等效电路	53
2.5.3	场效应管共源极放大电路	53
2.5.4	场效应管共漏极放大电路	54
2.5.5	场效应管应用电路	55
小结		56
习题二		56
第3章	多级放大电路.....	60
3.1	多级交流放大电路.....	60
3.1.1	多级交流放大电路的基本形式	60
3.1.2	多级交流放大电路的动态特性	62
3.1.3	放大电路的频率特性	63
小结		65
3.2	多级直流放大电路.....	66
3.2.1	多级直流放大电路的基本形式	66
3.2.2	多级直流放大电路的零点漂移	67

3.2.3 差动放大电路	68
小结	72
习题三	72
第4章 负反馈放大电路	75
4.1 负反馈放大电路的判别	75
4.1.1 简单判别	75
4.1.2 深度判别	77
4.1.3 负反馈放大电路的4种组态	80
小结	82
4.2 负反馈放大电路的计算	83
4.2.1 反馈放大电路的方框图表示法	83
4.2.2 负反馈放大电路的物理功能	85
4.2.3 深度负反馈	86
小结	88
4.3 负反馈放大电路的性能	89
4.3.1 放大倍数下降原因	89
4.3.2 直流负反馈放大电路的性能	89
4.3.3 交流负反馈放大电路的性能	90
4.3.4 反馈效果与信号源和负载的关系	93
4.3.5 负反馈放大电路的自激问题	94
小结	95
习题四	95
第5章 集成运算放大电路	99
5.1 结构特点及理想化	99
5.1.1 基本特性	99
5.1.2 集成运放特性及理想化	101
5.1.3 应用电路分析方法	102
小结	104
5.2 集成运放运算电路	104
5.2.1 比例运算	105
5.2.2 加法与减法	106
5.2.3 微分与积分	107
5.2.4 指数与对数	108
5.2.5 乘法与除法	108
5.2.6 综合应用实例	109
小结	110

5.3 有源滤波与非线性应用	110
5.3.1 有源滤波器	110
5.3.2 比较器	113
5.3.3 信号产生器	116
小结	116
习题五	117
第6章 功率放大电路	120
6.1 功率放大基本概念	120
6.1.1 功能特点	120
6.1.2 技术参数	121
6.1.3 交越失真	123
6.1.4 基本电路形式	124
小结	126
6.2 功率放大电路实例	127
6.2.1 分立元器件构成功率放大电路	127
6.2.2 集成电路功率放大电路	129
小结	134
习题六	134
第7章 直流电源	138
7.1 直流电源基本概念	138
7.1.1 交直流转换方框图	138
7.1.2 变压电路	139
7.1.3 整流电路	139
7.1.4 滤波电路	141
7.1.5 稳压电路	142
7.1.6 技术指标	144
小结	145
7.2 直流电源电路实例	145
7.2.1 分立元器件电路	145
7.2.2 集成电路	146
小结	151
7.3 开关电源	151
7.3.1 开关电源方框图	151
7.3.2 开关电源工作原理	152
7.3.3 开关电源实用电路	154
7.3.4 逆变电源	157

小结	158
习题七	159
第 8 章 正弦振荡电路	162
8.1 选频网络与 RC 正弦振荡	162
8.1.1 选频网络	162
8.1.2 正弦振荡原理	165
8.1.3 正弦振荡电路的技术要求	167
小结	168
8.2 LC 正弦振荡电路	168
8.2.1 变压器反馈式	168
8.2.2 电感三点式	169
8.2.3 电容三点式	170
8.2.4 三点式振荡电路的规律	171
8.2.5 三点式振荡电路的改进	172
8.2.6 晶体振荡电路	173
小结	174
8.3 正弦振荡电路实例	175
8.3.1 LC 振荡电路	175
8.3.2 RC 振荡电路	177
8.3.3 晶体振荡电路	178
8.3.4 压控振荡电路	179
小结	181
习题八	181
第 9 章 高频小信号放大电路	185
9.1 电路特点与性能指标	185
9.1.1 电磁波的波段划分	185
9.1.2 调幅广播系统方框图	185
9.1.3 谐振回路	187
9.1.4 三极管高频特性	189
9.1.5 高频电路性能指标	191
小结	192
9.2 高频谐振放大	193
9.2.1 单调谐电路	193
9.2.2 多级单调谐电路	196
9.2.3 双调谐电路	197
9.2.4 调谐电路的稳定性	198

小结	199
9.3 高频宽带放大	199
9.3.1 窄带信号与宽带信号	199
9.3.2 宽带放大系统部件	200
9.3.3 使用分立元器件进行宽带放大	204
9.3.4 集成电路宽带放大	204
小结	205
9.4 混频与变频	205
9.4.1 基本概念	206
9.4.2 三极管混频	206
9.4.3 二极管混频	210
9.4.4 模拟乘法器混频	211
小结	212
习题九	212
第 10 章 调制与解调	216
10.1 幅度调制	216
10.1.1 基本概念	216
10.1.2 普通调幅(AM)	218
10.1.3 抑制载波双边带调幅(DSB)	220
10.1.4 单边带调幅(SSB)	221
10.1.5 残留边带调幅(VSB)	223
小结	223
10.2 幅度解调	223
10.2.1 包络检波	223
10.2.2 平方律检波	227
10.2.3 同步检波	228
小结	229
10.3 调频与鉴频	229
10.3.1 基本概念	229
10.3.2 调频原理及电路	231
10.3.3 鉴频原理及电路	234
小结	236
习题十	236
第 11 章 高频功率放大电路	240
11.1 高频功率放大电路基本理论	240
11.1.1 基本概念	240

11.1.2 谐振高频功率放大原理	242
小结	246
11.2 高频功率放大电路动态特性	246
11.2.1 高频功率放大电路外部特性	247
11.2.2 馈电电路与输出回路	250
小结	253
习题十一	253
第 12 章 高频自动控制	257
12.1 自动增益控制与自动频率控制	257
12.1.1 反馈控制基本原理	257
12.1.2 自动增益控制	258
12.1.3 自动频率控制	260
小结	263
12.2 自动相位控制	263
12.2.1 锁相环基本原理	264
12.2.2 电路实例	269
小结	270
习题十二	270
附录 部分习题参考答案	274
参考文献	276

半导体器件基础

1.1 半导体基本知识

半导体技术发展至今,已有 60 多年的历史,半导体器件在电子学领域得到了极为广泛的应用。从分立元件到集成电路,再到大规模集成电路,电子技术的发展已经进入了微电子时代。无论技术先进到何种程度,硬件仍然主要是依靠半导体技术。

本节是半导体技术的一个入门,从应用角度对半导体基本知识进行简单的介绍,在认知本征半导体和杂质半导体的基础上,重点学习 PN 结的单向导电性,并了解其制造过程。

1.1.1 本征半导体

自然界中的物质按照导电能力一般分为导体、半导体和绝缘体 3 类。本征半导体是半导体的自然形态,虽然不能导电,但它为半导体导电奠定了基础。

1. 四价元素原子结构

半导体是导电能力处于导体和绝缘体之间的一种物质,常用的半导体材料有硅、锗和砷化镓等。

半导体的导电能力会随着温度、光照或掺入杂质而发生明显变化,这也是近代电子学利用半导体材料制造各种半导体器件和集成电路的主要原因。

图 1-1 为简化的原子结构模型。



图 1-1 简化的原子结构模型

四价元素硅或锗在半导体制作过程中起主要作用,不大于三价或不小于五价的元素也会在掺杂过程中发挥作用。通常把原子最外层的电子称为价电子,物质的导电性能取决于价电子的数目。

2. 共价键结构

把半导体材料制成晶体之后,其原子结构按照一定规则排列组成晶体点阵,每两个相邻原子的最外层轨道上都有一对公有电子,形成共价键结构,如图 1-2 所示。

纯净的半导体晶体称为**本征半导体**。本征半导体在热力学零度(-273°C)时,价电子没有能力挣脱共价键的束缚形成自由电子,因此不导电。

3. 本征激发

在室温条件下,价电子在不停地热运动,其中少数电子获得足够的动能之后,有可能挣脱共价键的束缚,成为自由电子,这种现象称为**热激发**或**本征激发**。

一旦共价键中的某个电子成为自由电子后,在其原来的位置上就会留下一个空位,称为**空穴**。由于电子带负电,空穴则带正电。因此,自由电子和空穴是成对出现的,称为**电子空穴对**。

本征激发产生自由电子和空穴,如图 1-3 所示。

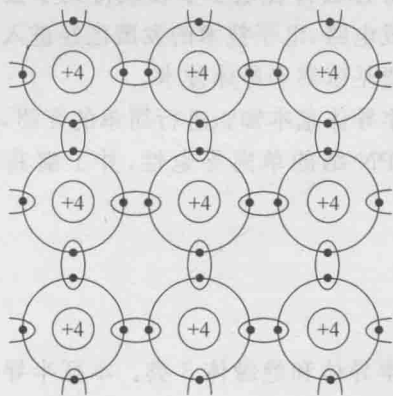


图 1-2 共价键结构

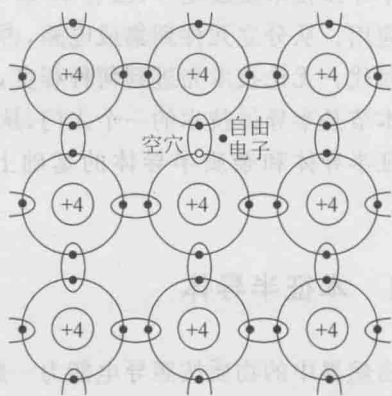


图 1-3 本征激发

热激发导致电子空穴对产生,而自由电子在移动过程中又可能填补某个空穴,使得一对电子空穴对消失,此现象称为**电子空穴对的复合**。产生的电子空穴对越多,复合的机会越大。这样,在一定的室温条件下,本征半导体内的电子和空穴的浓度是相等的。

4. 外加电场作用

在外加电场作用下,半导体中的自由电子向电源的正极移动,形成**电子电流**;空穴向电源的负极移动,形成**空穴电流**。由于电子和空穴都能运载电流,统称为**载流子**。

本征半导体不同于金属导体的一个重要特性就是有两种载流子参与导电。

1.1.2 杂质半导体

在室温条件下,本征半导体内的电子空穴对数量极少,导电能力很差。但是,只要在其中掺入千万分之一的某种杂质,导电能力就大为改观。掺入杂质的半导体称为**杂质半导体**。

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,可以制造出各种半导体器件,例如二极管、三极管、场效应管、集成电路和各种特殊的半导体器件。

根据掺入杂质的不同,杂质半导体分为 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少量五价元素(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 4 个硅原子组成共价键时,多余的一个价电子在共价键之外,成为自由电子。

杂质原子因为失去一个价电子而成为正离子,它们在晶格中不能移动,因此不能参与导电。

由于杂质原子可以提供大量的自由电子,而不产生空穴,使得半导体中的自由电子数量远远超过空穴的数量。这种半导体将以自由电子导电为主,称自由电子为多数载流子或多子,称空穴为少数载流子或少子。

N 型半导体是以自由电子为多子,也称其为电子型半导体。

2. P 型半导体

在硅或锗晶体中掺入三价元素(如硼、铝、镓等)后,杂质原子的 3 个价电子与周围的硅原子组成共价键时,出现一个空穴。

邻近的价电子受到热激发获得能量时,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远超过自由电子的数量。

P 型半导体是以空穴为多子,也称其为空穴型半导体。

N 型半导体和 P 型半导体的结构如图 1-4 所示。

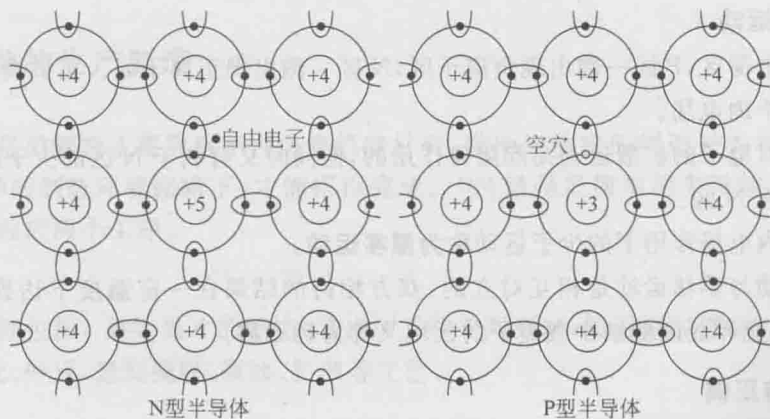


图 1-4 N 型半导体和 P 型半导体的结构

3. 杂质半导体的电中性

本征半导体掺入杂质后,既不损失电荷,也不获得电荷,内部正负电荷处于平衡状态,杂质半导体呈电中性。但是,控制掺杂浓度可以改变其导电能力,半导体集成电路中的电

阻就是基于此原理制作的。

1.1.3 PN 结及其单向导电特性

在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。

1. 扩散运动

同时具有 P 型和 N 型的杂质半导体在 P 区和 N 区之间形成了一个界面,如图 1-5 所示。

在 P 区多子是空穴,少子是自由电子,N 区情况相反,这样在两区的交界面就出现了多子和少子的浓度差。这种浓度差会引起 N 区的电子向 P 区运动,称为扩散运动,扩散到 P 区的电子不断地与空穴复合。同样的道理,P 区的空穴向 N 区扩散,与 N 区的电子复合。交界面两侧多子复合的结果,就出现了一个空间电荷区,这就是 PN 结,如图 1-6 所示。

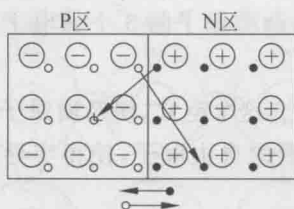


图 1-5 载流子扩散运动

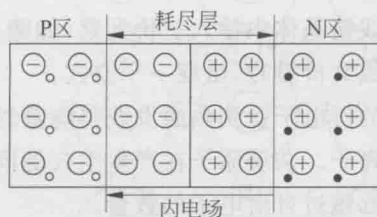


图 1-6 PN 结的形成

2. 漂移运动

在空间电荷区,P 区一侧出现负离子区,N 区一侧出现正离子区。正负离子在交界面两侧形成一个内电场。

内电场对电子的扩散运动是起阻碍作用的,但同时又有利于 N 区的少子进入 P 区,P 区的少子进入 N 区。

这种在内电场作用下的少子运动称为漂移运动。

扩散运动与漂移运动是相互对立的,双方相持的结果在一定温度下达到动态平衡。动态平衡时,交界面两侧缺少载流子的区域又称为耗尽层。

3. PN 结正偏

要想控制 PN 结的导电能力,就必须打破扩散运动和漂移运动建立的平衡,可以通过给 PN 结外加电场来实现,有正偏和反偏两种做法。

所谓正偏,就是 P 区接电源正端,N 区接电源负端。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,PN 结平衡状态被打破,扩散运动占优势。

多子形成的扩散电流通过回路形成很大的正向电流,PN 结呈现的正向电阻很小,称

为正向导通。PN 结正偏如图 1-7 所示, R 为保护 PN 结的限流电阻。

4. PN 结反偏

所谓反偏, 就是 P 区接电源负端, N 区接电源正端。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, PN 结平衡状态被打破, 漂移运动占优势, PN 结反偏如图 1-8 所示。

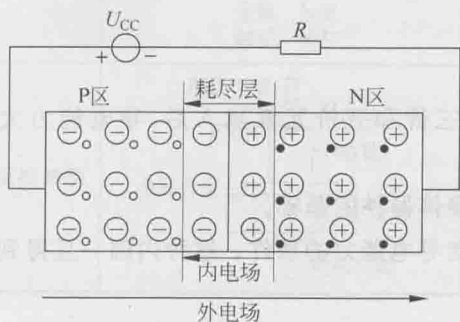


图 1-7 PN 结正偏

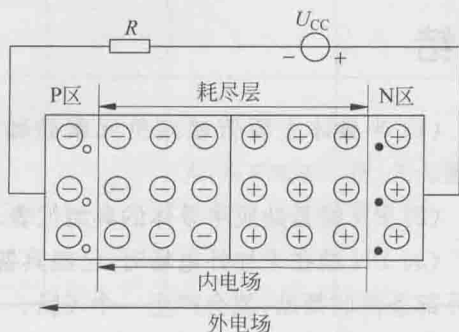


图 1-8 PN 结反偏

两区浓度很低的少子在内电场作用下, 漂移通过 PN 结形成反向电流, 也称反向饱和电流 I_s , 电流很小。锗管的反向饱和电流在 μA 级, 硅管的在 nA 级。PN 结反偏时电阻很大, 称为反向截止。

综上所述, PN 结外加正向电压时导通, 外加反向电压时截止, 这就是 PN 结的单向导电性。

环境温度改变时, 由于热激发使半导体内少数载流子浓度增加, 使 PN 结的反向饱和电流增大, 这在实际应用中需要加以考虑。

1.1.4 PN 结的生产制造

半导体器件的制造主要取材于自然界的硅材料, 借助于精密的制造设备和复杂的工艺过程, 在超净的制造环境保障下, 才能得以完成。PN 结是最简单的半导体, 制造过程仍然需要经过前后两个工序。

1. 前工序

前工序过程包括: 原始晶片的提纯、芯片加工和中间测试, 最后完成管芯。芯片加工包括衬底、氧化、外延、光刻掩膜、腐蚀、扩散等工艺。

2. 后工序

后工序过程包括: 划片、贴片、键合、封装、筛选、产品测试, 最后以产品方式提交给用户。

二极管前后工序产品外形如图 1-9 所示。