

上海市高校教育高地建设项目

线性与非线性 电子线路基础

XIANXING YU FEIXIANXING DIANZI XIANLU JICHU

方烈敏 编著

上海大学出版社

线性与非线性 电子线路基础

上海大学出版社

· 上 海 ·

内 容 提 要

本书共分9章,内容包括半导体器件基础、基本放大电路、负反馈放大器、信号运算与处理电路、功率放大器、信号产生电路、振幅调制、解调与混频、角度调制与解调和直流稳压电源。在内容介绍上,注重概念的解释、原理的讲解、电路的分析和电路的应用。

本书可作为电子技术的基础教材可供高等院校相关专业的师生使用,也可供相关工程技术人员和从业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

线性与非线性电子线路基础 / 方烈敏编著. —上海:
上海大学出版社, 2009. 12
ISBN 978-7-81118-555-3

I. ①线… II. ①方… III. ①线性电路—高等学校—
教材②非线性电路—高等学校—教材 IV. ①TN710
②TN711.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 209026 号

责任编辑 陈基明 王悦生 封面设计 柯国富

线性与非线性电子线路基础

方烈敏 编著

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

江苏句容市排印厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 420 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1~3 100

ISBN 978-7-81118-555-3/TN·013 定价: 28.00 元

前言

随着电子技术的发展,世界已经步入了数字时代,但是模拟电子电路仍然是现代电子技术的重要组成部分。将现实世界中的声、光、电、力等物理信号转换成对应的模拟电信号,并对它们进行放大、变换、运算和处理是模拟电路的主要任务;或将模拟电信号转换成数字电信号,经处理后,还原成模拟电信号,最终转换成人们可接受和理解的物理信号,这其中模拟电路起着重要的支撑作用。

“电子线路”是一门理论性和实践性非常强的课程,它作为广播、通信、计算机、自动控制等专业的重要基础课程,不仅能使学生掌握模拟电路的基本原理及其应用,同时也能培养学生分析问题、解决问题的能力,是学生提高理论和实践能力的重要环节之一。

为了适应电子技术的发展和对人才培养的需求,编者根据课程的基本要求并结合专业特点,编写了本教材。本教材在内容安排上尝试将线性电子线路和非线性电子线路合二为一,在满足系统性的前提下,适当删减了非线性电子线路的内容,对于各种单元电路着重强调基本概念、基本原理、基本分析方法和基本设计方法;对于集成电路,则在讲清电路的组成原理基础上,着重强调其应用。

本书共分9章,第1章半导体器件基础,主要讨论了二极管、三极管和场效应管等半导体器件的基本原理及特性。第2章基本放大电路,包括了基本BJT单元电路、基本FET单元电路、放大器的频率响应、集成运算放大器基础、电流模电路基础等,讨论了基本放大电路的工作原理、分析方法和应用特点。第3章负反馈放大电路,主要讨论了负反馈放大器的类型及其判断方法、负反馈对放大器的性能改善以及负反馈放大器的稳定性。第4章信号运算与处理电路,主要讨论了由集成运算放大器构成的各种信号运算与处理电路。第5章功率放大器,主要讨论音频功率放大器和高频谐振功率放大器。第6章信号产生电路,主要讨论了正弦波振荡器、方波和三角波发生器的组成原理及特点。第7章振幅调制、解

前言

调与混频,主要讨论了线性频谱搬移电路的基本原理、特性及电路。第8章角度调制与解调,主要讨论了非线性频谱搬移电路的基本原理、特性及电路。第9章直流稳压电源,主要讨论直流稳压电源的基本组成及串联型线性直流稳压电路和开关型直流稳压电路。

本书的出版得到了上海市高校教育高地建设项目基金的资助,在此深表谢意。在本教材的编写过程中,得到了笔者所在学院领导的大力支持,在此深表感谢;同时对各参考教材的作者也深表感谢,后人总是站在前人的肩膀上的;最后更要感谢出版社的同志为本书出版所付出的努力。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者和专家批评指正。

编者

2009年7月于上海

目 录

第 1 章 半导体器件基础	001
1.1 半导体二极管	001
1.1.1 半导体基础知识	001
1.1.2 PN 结	004
1.1.3 半导体二极管	009
1.2 双极型晶体管	015
1.2.1 BJT 的工作原理	016
1.2.2 BJT 的伏安特性曲线	018
1.3 场效应晶体管	020
1.3.1 结型场效应管	020
1.3.2 绝缘栅场效应管	024
本章小结	029
习题 1	029
第 2 章 基本放大电路	034
2.1 概述	034
2.1.1 放大器的基本原理及组成	034
2.1.2 放大器的性能指标	035
2.1.3 放大器的分析方法	038
2.2 放大器的偏置电路	041
2.2.1 BJT 偏置电路	041
2.2.2 FET 偏置电路	043
2.2.3 电流源电路	044
2.3 基本组态放大电路	047
2.3.1 晶体管的小信号等效电路模型	047
2.3.2 BJT 基本组态放大电路的性能	050
2.3.3 FET 基本组态放大电路的性能	056
2.4 差分放大电路	060
2.4.1 差放电路的组成及特点	060
2.4.2 差放的小信号性能分析	062

2.4.3 差放的差模传输特性	066
2.4.4 FET 差放电路简介	067
2.5 多级放大电路	067
2.5.1 级间耦合问题	067
2.5.2 多级放大器的性能分析	069
2.6 放大器的频率响应	070
2.6.1 复频域分析方法	070
2.6.2 单级放大器的频率响应	073
2.6.3 多级放大器的频率响应	078
2.7 集成运算放大器基础	081
2.7.1 集成运算放大器的组成原理	082
2.7.2 集成运算放大器的主要技术参数	082
2.7.3 集成运算放大器的理想化近似	084
2.8 电流模电路基础	085
2.8.1 跨导线性回路	085
2.8.2 电流传输器	087
本章小结	089
习题 2	089
第 3 章 负反馈放大电路	101
3.1 反馈放大器的基本概念	101
3.1.1 反馈放大器的组成原理	101
3.1.2 反馈放大器的类型与判别	102
3.2 负反馈对放大器性能的改善	106
3.2.1 提高增益的稳定性	106
3.2.2 改变输入、输出电阻	106
3.2.3 改善线性失真和频率响应	109
3.2.4 改善非线性失真	110
3.3 深度负反馈放大器的性能估算	110
3.3.1 深度负反馈的条件	110
3.3.2 深度负反馈放大器的性能估算	111
3.4 负反馈放大器的稳定性讨论	112
3.4.1 负反馈放大器的稳定工作条件	112
3.4.2 相位补偿技术	114
本章小结	116
习题 3	117
第 4 章 信号运算与处理电路	120
4.1 基本运算电路	120

4.1.1	比例运算电路	120
4.1.2	加法运算电路	121
4.1.3	减法运算电路	122
4.1.4	积分与微分运算电路	124
4.1.5	对数与反对数运算电路	125
4.1.6	模拟乘、除运算电路	127
4.1.7	精密整流电路	131
4.1.8	由电流传输器构成的基本运算电路	131
4.1.9	电压比较器	133
4.2	有源滤波器基础	136
4.2.1	低通滤波器	136
4.2.2	高通滤波器	139
4.2.3	带通滤波器	141
4.2.4	带阻滤波器	144
4.2.5	全通滤波器	147
4.2.6	开关电容滤波器	148
	本章小结	149
	习题4	150
第5章	功率放大器	157
5.1	功率放大器概述	157
5.1.1	功率放大器主要考虑的问题	157
5.1.2	功率放大器的类型	158
5.2	音频功率放大器	159
5.2.1	音频功率放大器的性能特点	159
5.2.2	甲类音频功率放大器	160
5.2.3	乙类推挽音频功率放大器	162
5.2.4	丁类音频功率放大器	170
5.3	高频谐振功率放大器	173
5.3.1	谐振功率放大器的工作原理	173
5.3.2	谐振功率放大器的调制特性	175
5.3.3	丙类谐振功率放大电路	176
	本章小结	181
	习题5	182
第6章	信号产生电路	188
6.1	正弦信号产生电路	188
6.1.1	正弦波振荡器的组成原理	188
6.1.2	LC正弦波振荡电路	190

6.1.3	石英晶体振荡电路	193
6.1.4	RC 正弦波振荡电路	195
6.2	非正弦信号产生电路	196
6.2.1	方波信号发生器	197
6.2.2	三角波、锯齿波发生器	197
6.2.3	集成信号发生器	198
	本章小结	200
	习题 6	200
第 7 章	振幅调制、解调与混频	206
7.1	振幅调制的基本原理	206
7.1.1	普通调幅信号	206
7.1.2	抑制载波的双边带调制信号	210
7.1.3	抑制载波的单边带调制信号	211
7.2	振幅调制电路	213
7.2.1	高电平调幅电路	213
7.2.2	低电平调幅电路	214
7.3	振幅解调电路	215
7.3.1	同步检波电路	215
7.3.2	包络检波电路	216
7.4	混频电路	219
7.4.1	混频的基本概念	219
7.4.2	混频电路	219
7.4.3	混频干扰与失真	222
	本章小结	224
	习题 7	224
第 8 章	角度调制与解调	228
8.1	角度调制的基本原理	228
8.1.1	调角信号的基本概念	228
8.1.2	调角信号的基本特性	229
8.2	调频电路	232
8.2.1	直接调频电路	232
8.2.2	间接调频电路	234
8.3	鉴频电路	237
8.3.1	鉴频方法概述	237
8.3.2	斜率鉴频电路	239
8.3.3	相位鉴频电路	240

本章小结	242
习题 8	243
第 9 章 直流稳压电源	247
9.1 直流稳压电源的组成原理	247
9.2 整流电路	248
9.2.1 单相半波整流电路	248
9.2.2 单相桥式全波整流电路	249
9.3 滤波电路	250
9.4 直流稳压电路	251
9.4.1 概述	251
9.4.2 串联型线性直流稳压电路	253
9.4.3 开关型直流稳压电路	255
本章小结	260
习题 9	261
主要参考文献	264

第1章 半导体器件基础



图 1.1.1 硅、锗和砷化镓的原子结构

1.1 半导体二极管

1.1.1 半导体基础知识

在自然界中,按导电能力可把物质分为导体、绝缘体和半导体三类。电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下的金属一般都是良好导体;电阻率在 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上的物质,如陶瓷、云母、石英等为绝缘体;而导电能力介于导体和绝缘体之间(即电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) 的物质称为半导体。尽管属于半导体的物质有很多,但目前能用来制造半导体器件的主要半导体材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。其中,硅(Si)和砷化镓(GaAs)在目前大规模和超大规模集成电路中广泛应用。

1.1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的基本概念

元素的原子结构是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核运动的电子组成,而处于最外层的电子称为价电子。硅(Si)和锗(Ge)的原子结构分别如图 1.1.1(a)和(b)所示,它们都是四价元素,均有 4 个价电子。由于元素的许多物理和化学性质都与价电子有关,半导体的导电特性也与价电子有关。因此,在研究半导体的导电特性时,可用如图 1.1.1(c)所示简化的惯性核模型表示。

硅和锗都是晶体,它们的晶格排列都是有规律的,并通过由价电子组成的共价键把相邻的原子牢固地结合在一起,它们的共价键结构如图 1.1.2 所示。当把硅和锗的晶体做成晶格排列完全一致并且纯净的单晶体时,才是制造半导体器件的基本材料。硅和锗的单晶体称为本征半导体。

2. 本征半导体的导电特性

(1) 本征激发

本征半导体在零开尔文($T=0 \text{ K}$)和没有其他外界能量激发时,它的价电子都被束缚在共价键中,没有自由电子而不能导电。当有外界能量激发(如受热或光照)时,某些价电子就

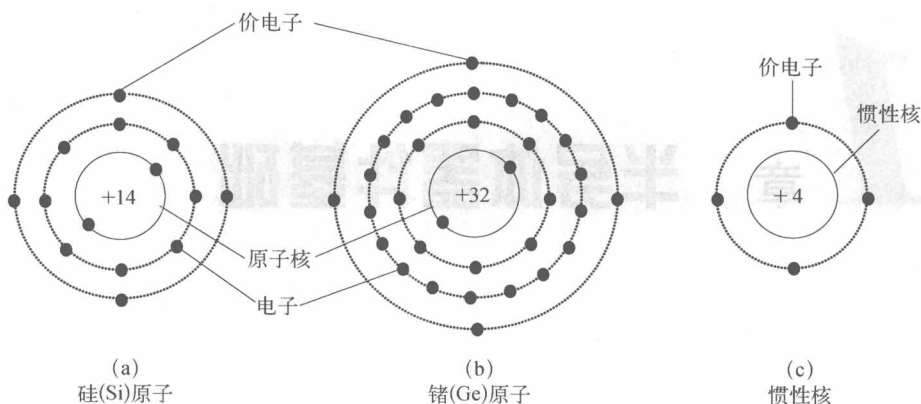


图 1.1.1 硅和锗原子结构模型

会获得一定的能量,挣脱共价键的束缚而成为自由电子,同时在共价键中留下相同数量的空位,这种现象称为本征激发。

本征激发后共价键中留下的空位,在外加电场的作用下,邻近共价键中的价电子很容易填补到这个空位上,而该价电子原来的位置上又留下新的空位,新空位又被邻近的价电子填补,这样的继续相当于一个空位在晶格中移动,如图 1.1.3 所示。由于带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同,因此把空位看作带正电荷的粒子,并称之为空穴。由此可见,半导体中有自由电子和空穴两种载流子导电。在本征半导体中,由激发产生的两种载流子总是成对出现的。另外,被激发的自由电子和空穴在热骚动过程中相遇,自由电子会释放原来吸收的能量,填入共价键中的空位,造成自由电子和空穴成对消失,这种现象称为复合。

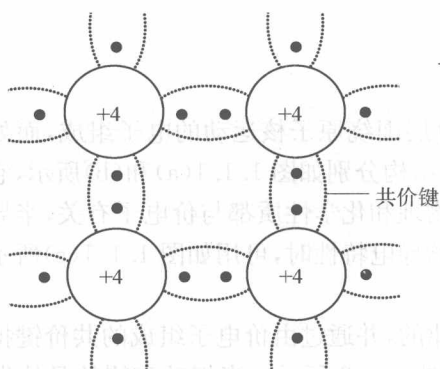


图 1.1.2 共价键结构

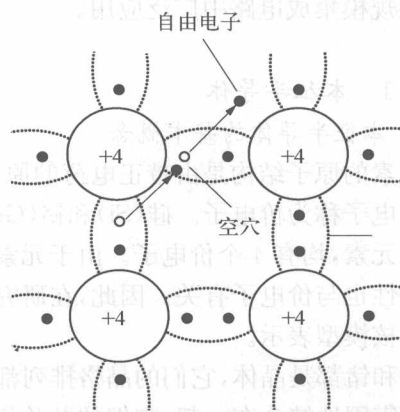


图 1.1.3 本征激发和空穴移动

(2) 本征载流子浓度

当温度一定时,本征激发和复合都在不停地进行,最终达到动态平衡,使载流子浓度处于某一热平衡值。

设本征半导体在热平衡时的自由电子浓度为 n_i ,空穴浓度为 p_i ,则可以证明它们与温度的关系式满足

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} \quad (1.1.1)$$

式中, A 是与半导体材料有关的常数, 硅的 $A = 3.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 锗的 $A = 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$; k 是玻尔兹曼常数, $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$; E_{g0} 是 $T = 0 \text{ K}$ 时破坏共价键所需的能量, 硅的 $E_{g0} = 1.21 \text{ eV}$, 锗的 $E_{g0} = 0.785 \text{ eV}$ 。

由式(1.1.1)可知, 本征半导体的载流子浓度与温度有关, 即导电能力随温度上升而增强。利用这一特性, 半导体材料可用来制作热敏和光敏器件, 但同时也是使半导体器件的温度特性变坏的主要原因。

在室温($T = 300 \text{ K}$)下, 根据式(1.1.1)可求得, 硅的 $n_i = p_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 锗的 $n_i = p_i \approx 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 但与它们的原子密度(约为 10^{22} cm^{-3} 数量级)相比仅占几万亿分之一。因此, 本征半导体的导电能力是很弱的, 不进一步加工是不能直接用来制造半导体器件的。

1.1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质元素, 可使它的导电能力发生明显变化而成为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同, 杂质半导体又可分为 N 型半导体和 P 型半导体两类。

1. N 型半导体

在本征硅半导体中掺入微量的五价元素(如砷、磷、锑等), 能使晶体中的自由电子浓度大大增加, 故称这种杂质半导体为 N(电子)型半导体。掺入的五价元素(杂质)有 5 个价电子, 其中的 4 个与相邻的硅原子构成共价键, 留下 1 个不受共价键束缚, 而仅受到杂质原子核吸引力的价电子, 它在室温下, 足以获得热能挣脱杂质原子核的吸引力而成为自由电子, 同时也不产生相应的空穴, 如图 1.1.4 所示。因五价元素(杂质)提供电子, 故称其为施主杂质, 它是受晶格束缚的正离子, 不能运动, 不起导电作用。这样与本

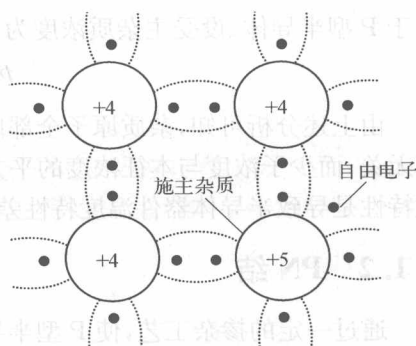


图 1.1.4 N 型半导体示意图

征激发(因在室温下, 本征激发始终存在)的浓度相比, N 型半导体的自由电子浓度大大增加, 而空穴因与自由电子相遇而复合的机会也增加, 其浓度反而更小了。因此, 把 N 型半导体中的自由电子称为多数载流子(简称多子), 把空穴称为少数载流子(简称少子)。

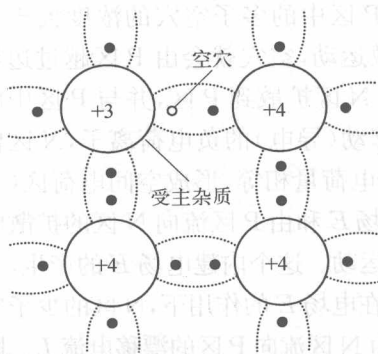


图 1.1.5 P 型半导体示意图

2. P 型半导体

在本征硅半导体中掺入微量的三价元素(如硼、铝、镓等), 能使晶体中的空穴浓度大大增加, 故称这种杂质半导体为 P(空穴)型半导体。掺入三价元素(杂质)原子的 3 个价电子与相邻的 4 个硅原子构成的共价键中必然缺少 1 个价电子而形成 1 个空穴, 此空穴不是释放价电子形成的, 它不会同时产生自由电子, 如图 1.1.5 所示。因此, 在 P 型半导体中空穴是多子, 自由电子是少子(同样比本征激发的浓度还小)。由于三价杂质原子接受价电子, 所以被称为受主杂质, 它是一个带 1 个电子电荷量

的负离子,同样受晶格束缚,不能运动,不起导电作用。

3. 杂质半导体中的载流子浓度

在杂质半导体(N型或P型)中,掺杂越多,多子数目越多,少子数目越少,两种载流子的浓度必定满足两个条件。

首先是满足热平衡条件(质量作用定律):即在温度一定时,两种热平衡载流子浓度之积恒等于本征载流子浓度的平方。对于N型半导体,以 n_n 和 p_n 分别表示电子(多子)和空穴(少子)的浓度,则

$$n_n \times p_n = n_i^2 \quad (1.1.2)$$

对于P型半导体,以 p_p 和 n_p 分别表示空穴(多子)和电子(少子)的浓度,则

$$p_p \times n_p = n_i^2 \quad (1.1.3)$$

其次是满足电中性条件:即整块半导体中的正电荷量恒等于负电荷量。对于N型半导体,设施主杂质浓度为 N_d (正离子),则

$$n_n = N_d + p_n \approx N_d \quad (1.1.4)$$

对于P型半导体,设受主杂质浓度为 N_a (负离子),则

$$p_p = N_a + n_p \approx N_a \quad (1.1.5)$$

由上述分析可知,杂质原子全部电离,杂质半导体的多子浓度近似等于掺杂浓度,与温度无关;而少子浓度与本征浓度的平方成正比,随温度上升而迅速增多。少子浓度的这种温度特性是导致半导体器件温度特性差的主要因素。

1.1.2 PN结

通过一定的掺杂工艺,使P型半导体和N型半导体有机地结合在一起,则在它们的界面处便自然形成了PN结。PN结是构造晶体二极管、晶体三极管等半导体器件的基本单元。

1.1.2.1 PN结形成原理

当P型半导体和N型半导体有机相结合的瞬间,会自然产生载流子的两种运动。首先产生的是由于两边载流子浓度差所引起的扩散运动。因P区中的多子空穴的浓度大于N区,N区中的多子电子浓度大于P区,所以它们将产生扩散运动,空穴就会由P区越过边界面扩散到N区,并与N区中的电子相遇而复合,电子会由N区扩散到P区,并与P区中的空穴相遇而复合。这样就在界面处附近的P区留下不能移动(导电)的负电荷离子,N区留下了不能移动(导电)的正电荷离子,并且两侧的正、负离子电荷量相等,形成空间电荷区(又称耗尽层、阻挡层),同时产生了从N侧指向P侧的内建电场 E 和由P区流向N区的扩散电流 I_d 。其次是在内建电场 E 的作用下,载流子会产生漂移运动。这个内建电场 E 的产生,一方面阻止多子的扩散运动,另一方面产生少子的漂移运动。在电场 E 的作用下,N区的少子空穴漂移到P区,P区的少子电子漂移到N区,它们共同形成由N区流向P区的漂移电流 I_i 。随着扩散运动的进行,电场 E 增强,结果使多子的扩散运动减弱,少子的漂移运动增强,最终使漂

移和扩散两种运动达到动态平衡($I_d = I_t$), 因 I_d 和 I_t 方向相反, 所以通过空间电荷区的总电流为零, 即通过 PN 结的净电流为零。此时, PN 结就形成了, 如图 1.1.6 所示。

当 PN 结达到动态平衡时, 由内建电场 E 产生的电位差称为内建电位差(又称为接触电位差), 用 U_B 表示, 其值与掺杂浓度和半导体材料有关

$$U_B \approx U_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (1.1.6)$$

式中, U_T 是温度电压当量(又称热电压), 其值为

$$U_T \approx \frac{kT}{q} \quad (1.1.7)$$

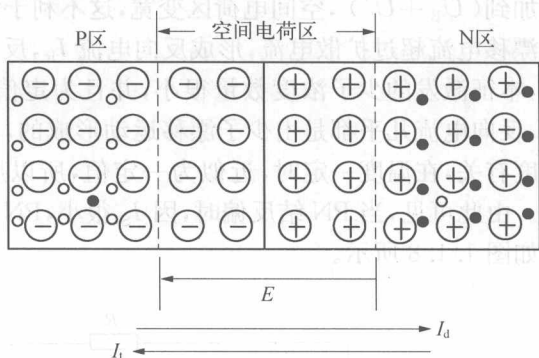


图 1.1.6 PN 结形成原理图

在室温 $T = 300 \text{ K}$ 时, $U_T \approx 26 \text{ mV}$, 而 U_B 的大小一般为零点几伏, 如硅的 U_B 为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$, 锗的 U_B 为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。由式(1.1.6)可知, 温度上升, U_B 减小; 掺杂浓度增高, U_B 增大。

1.1.2.2 PN 结的单向导电性

当 PN 结外加正向电压 U (也称为 PN 结正向偏置, 简称正偏), 即外加电源的正极接 P 区、负极接 N 区。此时, 在外电场的作用下, PN 结的动态平衡被打破, 外电场削弱内建电场, 空间电荷区变窄, 两端的电位差由 U_B 减小到 $(U_B - U')$, 这有利于多子的扩散运动, 不利于少子的漂移运动。因此, 当 PN 结正偏时, 正向电流 I 主要是扩散电流, 并且随外加电压的增加而迅速增大, 正向 PN 结呈现一个很小的电阻。PN 结的正向特性如图 1.1.7 所示。

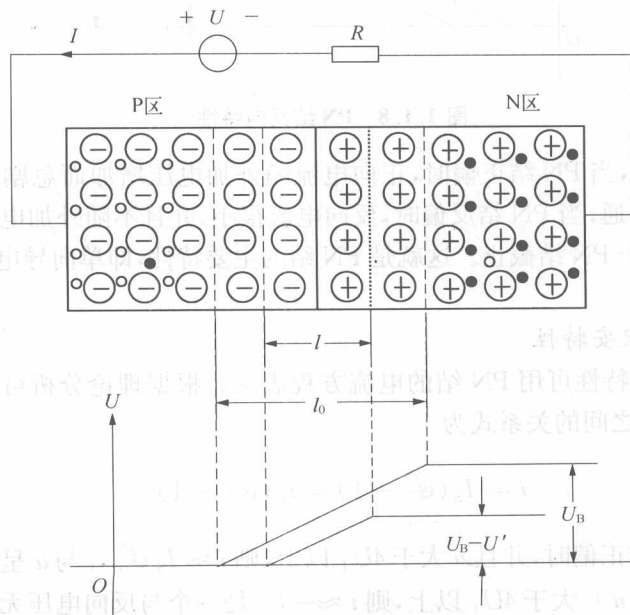


图 1.1.7 PN 结正向特性

当PN结外加反向电压 U (也称为PN结反向偏置,简称反偏),即外加电源的负极接P区、正极接N区。此时,外电场的方向与内建电场方向一致,空间电荷区两端的电位差由 U_B 增加到 $(U_B + U')$,空间电荷区变宽,这不利于多子的扩散运动,有利于少子的漂移运动,并且漂移电流超过扩散电流,形成反向电流 I_R ,反向电流 I_R 主要是少子漂移电流,在温度一定时,本征激发的少子浓度数量很小,并且为定值。因此,当PN结反偏时,扩散运动可以忽略,反向电流几乎都是由少子漂移运动形成的,其值几乎与外加反向电压的大小无关,只与温度有关,在温度一定时,近似为一定值,所以反向电流 I_R 又称为反向饱和电流,用 I_S 表示。由此可见,当PN结反偏时,因 I_S 很小,PN结呈现为一个很大的电阻。PN结的反向特性如图1.1.8所示。

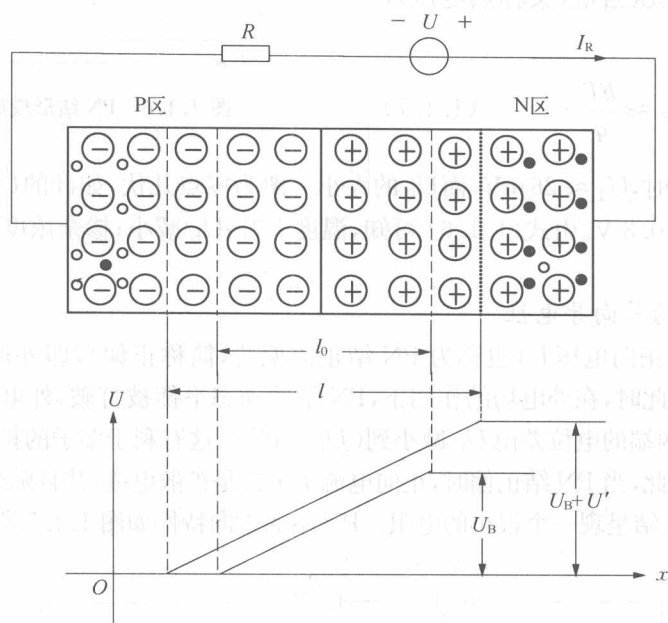


图 1.1.8 PN 结反向特性

由上述分析可知,当PN结正偏时,正向电流随外加电压增加而急剧增大,呈现的电阻很小,PN结相当于导通;当PN结反偏时,反向电流很小,并且不随外加电压变化而变化,呈现的电阻很大,相当于PN结截止。这就是PN结的主要特性,即单向导电特性。

1.1.2.3 PN 结的伏安特性

PN结的正、反向特性可用PN结的电流方程表示。根据理论分析可知,流过PN结的电流 i 与外加电压 u 之间的关系式为

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.1.8)$$

由上式可知,在PN结正偏时,并且 u 大于 $4U_T$ 以上,则 $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, i 与 u 呈指数规律变化;在PN结反偏时,并且 $|u|$ 大于 $4U_T$ 以上,则 $i \approx -I_S$,是一个与反向电压无关的常数,并且数值很小(锗材料PN结的 I_S 在微安量级,而硅材料PN结的 I_S 在皮可安量级以下)。PN结的伏

安特性曲线如图 1.1.9 所示。

由图可知,当正向电压较小时,流过 PN 结的电流几乎为零,只有当正向电压超过某一个数值时,正向电流才明显增加。一般在工程分析时,称这个电压为 PN 结的导通电压,用 $U_{(on)}$ 表示。通常硅 PN 结的 $U_{(on)}$ 约为 0.7 V,锗 PN 结 $U_{(on)}$ 约为 0.2 V。

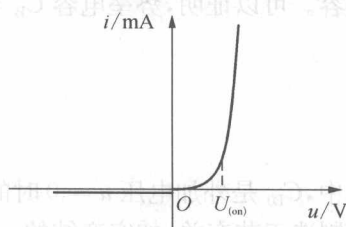


图 1.1.9 PN 结伏安特性曲线

1.1.2.4 PN 结的反向击穿特性

通常,PN 结的反向电流与反偏电压无关。但当反偏电压增加到一定数值时,反向电流会突然急剧增大,这种现象称为 PN 结的反向击穿。反向电流开始急剧增大时所对应的反向电压称为击穿电压,用 $U_{(BR)}$ 表示。图 1.1.10 所示为考虑反向击穿特性时 PN 结的伏安特性曲线。由图可知,PN 结一旦击穿,反向电压几乎不变,近似等于 $U_{(BR)}$ 。PN 结的击穿机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

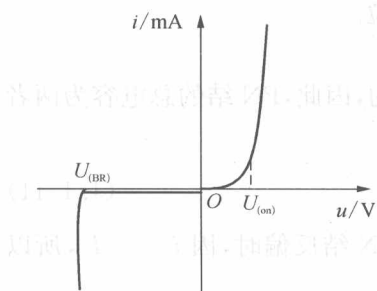


图 1.1.10 考虑击穿时的 PN 结伏安特性曲线

1. 雪崩击穿

雪崩击穿通常发生在低掺杂浓度的 PN 结中。因阻挡层较宽,当外加反偏电压增大时,阻挡层内部的电场增强,漂移的少子获得加速,动能增加;当反偏电压增大到载流子的动能足以把束缚在共价键中的价电子碰撞出来,产生新的电子-空穴对时,便发生了碰撞电离。新产生的电子在强电场的作用下,再去碰撞其他的中性原子,又产生新的电子-空穴对,如此连锁反应使反向电流像雪崩一样急剧增加,故称之为雪崩击穿。雪崩击穿的击穿电压一般比较高,如硅材料的 PN 结在 7 V 以上,并且具

有正温度系数。

2. 齐纳击穿

齐纳击穿通常发生在高掺杂浓度的 PN 结中。因阻挡层较窄,只要外加不太大的反偏电压,就会产生很强的电场,足以把阻挡层内的中性原子的价电子直接从共价键中拉出来,产生新的电子-空穴对,使反向电流急剧增大,呈现击穿现象。齐纳击穿的击穿电压一般较低,如硅材料的 PN 结在 4 V 以上,并且具有负温度系数。

雪崩击穿和齐纳击穿都属于电击穿,只要限制 PN 结的反向电流,使其不产生过热而损坏 PN 结,则击穿是可逆的,并可以利用击穿特性制成稳压器件。

1.1.2.5 PN 结的电容特性

所有 PN 结都具有电荷量随外加电压变化的电容效应。产生 PN 结电容效应的机理有势垒电容和扩散电容两种。

1. 势垒电容 C_B (Barrier Capacitance)

PN 结的阻挡层相当于平板电容器,它的交界面两侧存储着数量相等,极性相反的离子电荷,其值随着外加电压变化而变化。在 PN 结反偏时,增大反偏电压,阻挡层变宽,正、负电荷量增加;减小反偏电压,阻挡层变窄,正、负电荷量减少,从而产生的电容效应称为势垒