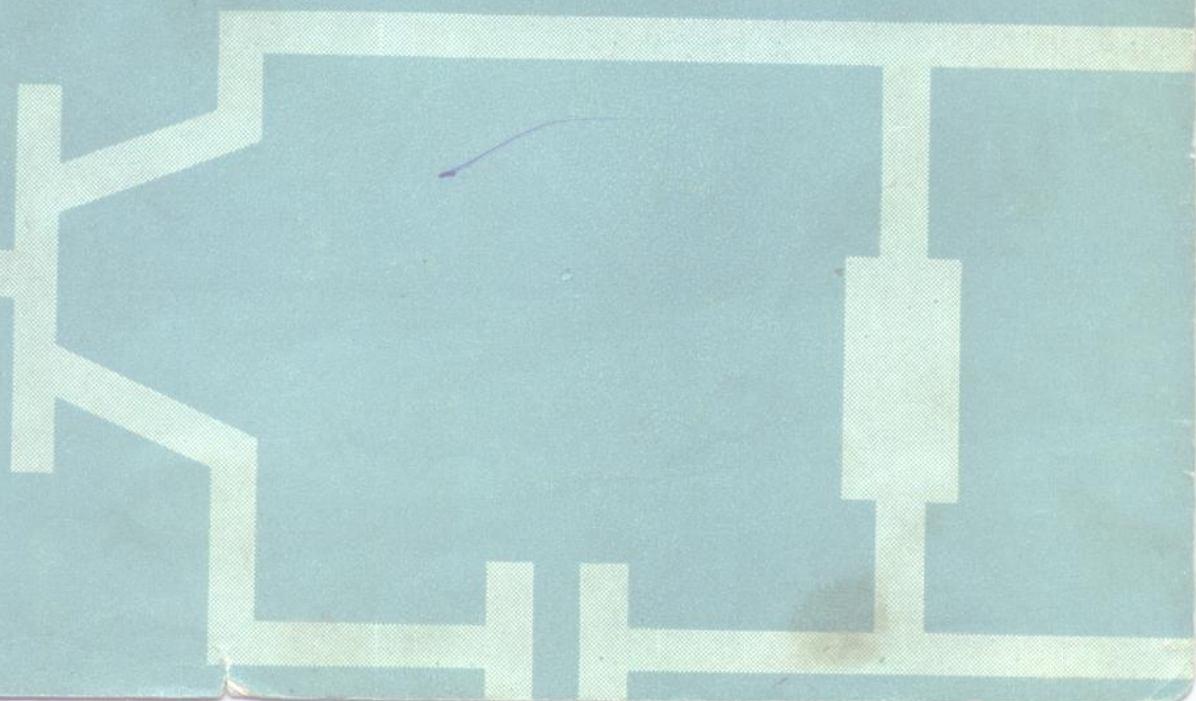


北京航空航天大学出版社

模拟电子技术基础

陈知今 李永柏 编
戴辅仁 唐汝元



15.01
608

模 拟 电 子 技 术 基 础

陈知今 李永柏
戴辅仁 唐汝元 编

北京航空航天大学出版社

(京)新登字 166 号

内 容 简 介

本书内容包括:半导体二极管和三极管,放大电路基础,放大电路中的反馈,功率放大器,集成运算放大器,正弦波振荡器,直流稳压电源,场效应管放大器,电子管放大器等九章。

本教材在编写中力求通俗易懂,阐明分析方法,每节之后有基本概念题和基本计算题,每章之后有综合性习题,利于学生预习和自学。本书可作为理工科中专、大专及职业大学电专业(电力、电气工业自动化、无线电仪表、热工仪表、计算机)的教材,也可供电大师生及从事电子技术工作的工程技术人员参考。

DS78/50
12

模 拟 电 子 技 术 基 础

MONI DIANZI JISHU JICHU

编 者 陈知今 李永柏

戴辅仁 唐汝元

责任编辑 肖之中

北京航空航天大学出版社出版

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经销

朝阳科普印刷厂印装

787×1092 1/16 印张:19.75 字数:505千字;

1993年7月第一版 1993年7月第一次印刷 印数:4000册

ISBN 7-81012-329-7/TN·019 定价:5.15元

2000.1.1

前 言

《模拟电子技术基础》是电专业的一门重要的专业基础课,这门课程的主要特点是理论性和实践性都较强。学生在学好理论课的基础上,必须经过实践环节的严格训练,才有可能牢固掌握课程的基本内容。为培养“应用型,工艺型”人材,我们将原《模拟电子技术基础》课程分为三门课程,即《模拟电子技术基础》(理论部分),《模拟电子技术实验》,《模拟电子技术课程设计》。三本教材自成体系,配套使用,独立开课,单独考核,改变以往重理论轻实践的倾向。

在编写本教材理论部分时,注意到中专学生知识面窄的特点,教材内容尽量作到通俗易懂,由浅入深,每章都编有适当数量的例题,给学生以示范。

对于基本的常用电路,以定性分析和工程计算为主,力图多用物理概念阐明问题本质,避免大量的公式推导。在分析一个电路时,注意抓主要矛盾,忽略一些次要因素,这样可以使分析简化,概念清楚,对工程实用而言已有足够的计算准确度。

为加强对学生能力培养,编写中尽量阐明各章的分析方法,学生掌握之后,能够抓住问题的本质,利于预习和自学。

考虑到目前电子技术飞速发展的特点,适当加强新技术的内容,在内容安排上拓宽了集成运算放大器的应用范围。为了扩大学生眼界,增加知识面,书中还安排了一些带“*”号的内容,可供大专生学习,根据学时的多少,也可作为中专生选学内容。

为了使学生更好地掌握课堂内容,每节之后编有基本概念型习题和计算型习题。为提高学生的综合分析能力,每章还编写了一些综合型和提高型的习题。

《模拟电子技术基础》(理论部分)教学时数为 120 学时左右。

本教材一、二、三章由西安航专陈知今同志编写,四、七、八章由西安航专李永柏同志编写,六、九章由湖南大庸航校戴辅仁同志编写,第五章 § 5-1~§ 5-8 由西安航专陈知今和大庸航校唐汝元同志合编,§ 5-9 由西安航专李永柏同志编写。本教材由西安航专陈知今同志担任主编。

参加本教材编写大纲讨论的还有成都航校赵世云同志。参加本教材定稿会议的还有西安航专电气系电子教研室魏超杰、安琪、鄢云三位同志。

本教材的主审由梁怀壁副教授担任。

在此,对编写过程中给予我们热情帮助和大力支持的同志们表示诚挚的谢意。

由于我们水平有限,教材中难免存在一些错误和不妥之处,恳请读者给予批评指正。

编者 1991 年 1 月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	1	第二章 基本放大电路	35
§ 1-1 半导体的基本知识	1	§ 2-1 概述	35
一、半导体的原子结构和共价键	1	§ 2-2 共射放大电路的组成	35
二、本征半导体	2	一、电路中各元件的作用	35
三、掺杂半导体	3	二、放大电路的静态及直流通路	36
练习题	4	三、放大电路的动态及交流通路	37
§ 1-2 PN 结	4	四、放大电路的组成原则	37
一、PN 结的形成	4	练习题	38
二、PN 结的导电特性	5	§ 2-3 放大电路的基本分析方法	38
三、PN 结的击穿	7	一、估算法分析静态工作点	39
* 四、PN 结的等效电容	8	二、图解分析法	40
练习题	8	三、微变等效电路分析法	48
§ 1-3 晶体二极管	9	练习题	53
一、二极管的结构	9	§ 2-4 静态工作点的稳定问题	56
二、二极管的伏安特性	10	一、静态工作点不稳定的原因	56
三、二极管的主要参数及温度影响	11	二、基极分压式工作点稳定电路	57
四、特种二极管	13	三、其它工作点稳定电路	59
练习题	15	练习题	61
§ 1-4 晶体三极管	16	§ 2-5 共集电极电路和共基极电路	61
一、三极管的结构及分类	16	一、共集电极放大电路	62
二、三极管的放大条件	18	* 二、带有自举电路的射极输出器	65
三、三极管的电流	19	三、共基极放大电路	66
四、三极管的伏安特性	21	四、三种基本放大电路的比较	67
五、关于 PNP 三极管	24	练习题	69
六、三极管的主要参数	24	§ 2-6 差动放大电路	70
七、温度对三极管参数的影响	27	一、引言	70
练习题	28	二、基本差动放大电路	71
§ 1-5 半导体器件型号命名方法	30	三、典型差动放大电路	73
一、半导体器件的型号由五部分组成	30	四、恒流源差动放大电路	77
二、型号组成部分的符号及其意义	31	练习题	79
本章小结	31	§ 2-7 放大器的频率特性	81
思考题与习题	32	一、放大器频率特性的概念	81
		二、单级阻容耦合放大器的频率特性	83

练习题	90	一、对功率放大器的要求	133
§ 2-8 多级放大电路	91	二、放大器工作点的分类	134
一、多级放大电路的耦合方式	91	三、功率放大器的分析方法	135
二、多级放大电路的电压放大倍数,输入和 输出电阻	92	§ 4-2 单电源互补对称电路	136
三、多级放大电路的频率特性	93	一、工作原理	136
练习题	94	二、功率的估算	137
本章小结	96	三、复合管互补对称电路	138
思考题与习题	97	练习题	143
第三章 放大电路中的反馈	101	§ 4-3 双电源互补对称电路	143
§ 3-1 反馈的基本概念	101	一、电路组成及器件作用	143
一、反馈的框图表示	101	二、工作原理	144
二、反馈的分类	102	三、性能分析	144
三、反馈类型的判别方法	104	* § 4-4 BTL 功率放大器	146
练习题	107	一、电路组成及元器件作用	146
§ 3-2 负反馈放大电路的基本关系式	110	二、工作原理	147
一、基本关系式的推导	110	三、输出功率	147
二、反馈深度	110	本章小结	147
三、反馈电路中 A 、 F 及 A_f 的含义	111	思考题与习题	147
练习题	112	第五章 集成运算放大器	152
§ 3-3 负反馈对放大电路性能的影响	112	§ 5-1 集成电路概述	152
一、负反馈提高了放大电路的稳定性	112	§ 5-2 集成运放的基本单元电路	153
二、负反馈减小非线性失真和抑制干扰	114	一、偏置电路	153
三、负反馈扩展通频带	114	二、输入级电路	155
四、负反馈改变输入和输出电阻	116	三、中间级电路	156
练习题	119	四、输出级电路	156
§ 3-4 深度负反馈放大电路	120	练习题	157
一、深度负反馈的概念	120	§ 5-3 集成运放 F007 的电路及工作原理	159
二、深度负反馈放大倍数的近似估算	121	练习题	160
三、深度负反馈放大电路的输入和输出 电阻	123	§ 5-4 集成运放的主要技术参数	161
练习题	123	练习题	162
* § 3-5 负反馈放大电路的方框图算法	124	§ 5-5 集成运放的基本放大电路	163
本章小结	128	一、理想集成运放	163
思考题与习题	128	二、集成运放应用电路的分析方法	163
第四章 功率放大器	133	三、反相输入放大电路	165
§ 4-1 概述	133	四、同相输入放大电路	165
		五、差动输入放大电路	166
		练习题	167
		§ 5-6 应用集成运放实现数学运算	167
		一、加法、减法运算	167
		二、微分、积分运算	168
		三、对数、反对数运算	169

* 四、乘法、除法运算	171	第七章 直流稳压电源	221
* 五、非理想集成运放的误差分析	173	§ 7-1 单相整流电路	222
练习题	174	一、单相半波整流电路	222
§ 5-7 应用集成运放实现电压比较与波形发生	176	二、单相全波整流电路	223
一、电压比较器	176	三、单相桥式整流电路	224
* 二、方波信号发生器	180	四、倍压整流电路	226
练习题	181	练习题	227
§ 5-8 应用集成运放实现有源滤波	183	§ 7-2 滤波电路	228
一、基本概念	183	一、电容滤波电路	230
二、一阶有源滤波器	184	二、电感滤波电路	233
* 三、二阶低通有源滤波器	185	三、复式滤波电路	233
四、带通和带阻滤波器	186	四、有源滤波电路	235
练习题	187	练习题	236
§ 5-9 集成功率放大器	188	§ 7-3 稳压管稳压电路	236
一、5G37 集成组件	188	一、稳压电源的质量指标	237
二、集成功率放大器	188	二、稳压管稳压电路	237
本章小结	190	三、稳压管	239
思考题与习题	191	练习题	239
第六章 正弦波振荡器	197	§ 7-4 串联型稳压电路	240
§ 6-1 振荡的基本概念	197	一、串联型稳压电源的基本型式	240
一、产生正弦波振荡的条件	197	二、具有放大环节的稳压电源	241
二、振荡的建立与稳定	198	练习题	246
三、正弦波振荡器的组成和分析方法	199	§ 7-5 串联稳压电路的改进	247
练习题	200	一、提高输出电压稳定度	247
§ 6-2 RC 正弦波振荡器	200	二、提高温度稳定性	249
一、移相式振荡器	201	三、扩大输出电压调节范围	250
二、串并联网络振荡器	203	§ 7-6 稳压电路的过载保护	251
练习题	207	一、二极管限流型保护电路	251
§ 6-3 LC 正弦波振荡器	208	二、三极管截流型保护电路	251
一、变压器反馈式振荡器	208	练习题	252
二、电感反馈式振荡器	209	§ 7-7 集成稳压电路	253
三、电容反馈式振荡器	210	一、输出电压可调式稳压器	253
练习题	213	二、输出电压固定式稳压器	255
§ 6-4 晶体振荡器	213	* 三、开关稳压电源	257
一、石英谐振器	213	本章小结	262
二、晶体振荡电路	215	思考题与习题	263
练习题	217	附录	266
本章小结	217	第八章 场效应管放大器	267
思考题与习题	218	§ 8-1 结型场效应管	267
		一、结型场效应管的结构和符号	267

二、工作原理	268	§ 9-2 电子管的工作原理	286
三、结型场效应管的特性曲线	270	一、电子管的阴极	286
练习题	271	二、真空二极管	287
§ 8-2 绝缘栅场效应管	271	三、真空三极管	289
一、 P 沟道增强型绝缘栅场效应管	271	四、真空多极管	293
二、 N 沟道耗尽型场效应管	273	五、电子管与晶体管的比较	296
三、场效应管的主要参数	276	练习题	297
四、使用注意事项	276	§ 9-3 电子管放大器	297
练习题	277	一、真空三极管放大器	297
§ 8-3 场效应管放大电路	277	二、真空五极管阴极输出器	300
一、共源极放大电路	277	练习题	302
二、共漏放大器	281	本章小结	302
本章小结	283	思考题与习题	303
思考题与习题	283	本书常用符号说明	304
第九章 电子管通讯基本放大电路	286	参考文献	308
§ 9-1 概述	286		

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是近代电子学的重要组成部分,是电子技术课程的基础。半导体器件具有体积小,重量轻,使用寿命长等优点而得到广泛的应用。本章先介绍半导体的基本知识,接着讨论半导体二极管和三极管的结构,工作原理,特性曲线和主要参数。书中对于器件内部的微观物理过程,只作简单介绍,而把讨论的重点放在器件的外部性能上。

§ 1-1 半导体的基本知识

一、 半导体的原子结构和共价键

自然界的各种物质,按导电能力大小,可分为导体,半导体和绝缘体。金、银、铜、铝等金属导电能力很好,它们是导体。橡胶、石英、陶瓷等物质导电能力很差,它们属于绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,硅、锗、硒等物质属于半导体。从电阻率来分,大致如下:

金属导体	$\rho < 10^{-3}$	$\Omega \cdot \text{cm}$
半导体	$10^{-3} < \rho < 10^{13}$	$\Omega \cdot \text{cm}$
绝缘体	$\rho > 10^{13}$	$\Omega \cdot \text{cm}$

为什么导电性能会有这么大的差别呢?可以用原子结构来解释。从化学元素周期表可知,金属原子中外层电子数小于4个。通常称外层电子为价电子,金属原子外层电子受原子核束缚力最小,价电子很容易从原子中脱离出来,成为带有负电荷的自由电子。物质内部运载电荷的粒子,称为载流子,自由电子是载流子,物质的导电能力,决定于载流子的数量和运动速度。因此金属导电能力很强。在绝缘体中,核外电子数大于4个,不易失去电子,因而载流子数量很少,因此导电能力很差。

硅和锗位于元素周期的IV族,原子结构如图1-1(a)和(c)。为了更方便的研究价电子的作

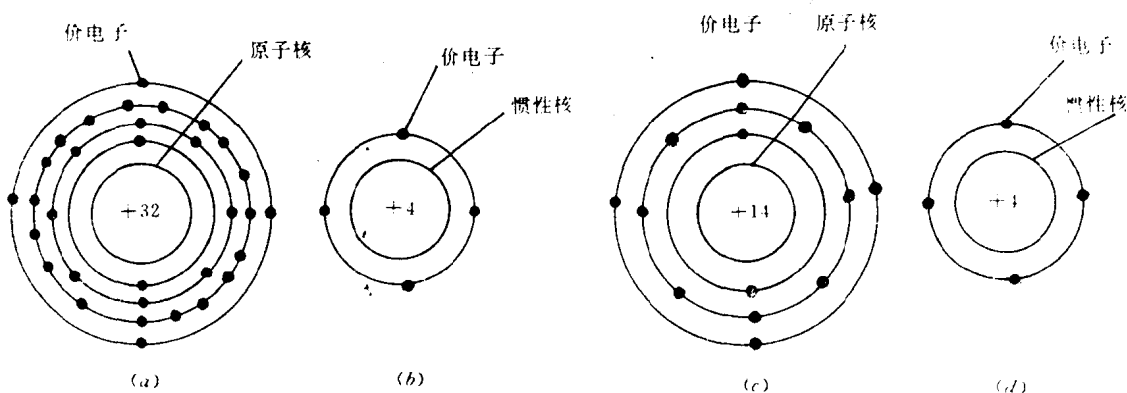


图 1-1 锗和硅原子结构模型

(a) 锗原子 (b) 锗原子简化模型 (c) 硅原子 (d) 硅原子简化模型

9410068

用,常把原子核和内层电子看作一个整体,称为惯性核,于是硅和锗原子的简化模型如图 1-1(b)和(d)。硅和锗原子外层有 4 个价电子,在组成晶体后,原子之间靠得很近,每个原子的价电子不仅受自身原子核的束缚,还受相邻原子的影响,致使价电子轨道交迭。每个价电子有时绕自身原子核运动,有时也出现在相邻原子所属的轨道上,它已成为两个原子所“共有”,这种现象叫做共有化运动。共有化运动使晶体中的原子紧紧地连接成一个整体,形成了晶体中的共价键结构,图 1-2 为硅或锗构成共价键结构的平面示意图。这些价电子受两个原子核引力的约束,通常要有足够的能量,才能从原子中挣脱出来,成为自由电子,因此半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

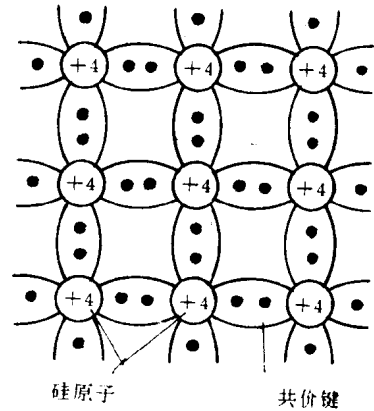


图 1-2 硅或锗的共价键结构

二、 本征半导体

近代电子器件生产中,用得最多的半导体材料是硅,其次是锗。它们不仅是半导体,而且还是晶体。经过提纯以后的硅晶体,由许多晶粒组成。虽然每一晶粒中的原子很有规则地排列着,但整块晶体中各晶粒的取向是杂乱的,这种晶体称为多晶。经过适当加工,使晶粒取向一致,于是整块晶体中的原子便按一定规则整齐的排列着,这就是单晶。本征半导体就是非常纯净的半导体单晶。当本征半导体受到光照或加热,共价键中的束缚电子得到能量跳出共价键称为本征激发,本征激发产生了自由电子,自由电子带负电,可以自由移动,而此时共价键中留下一个空位,称之为空穴。带有空穴的原子因失去一个电子而带正电,我们把这个正电看成是空穴所带的正电荷量。空穴也能移动,如图 1-3 所示。共价键 A 处,有一个电子,由于得到能量而跳出,成为自由电子, A 处留下一个空位,附近共价键 B 处的价电子便可能过来填补这个空位, A 处空穴消失, B 处出现空穴,如同空穴从 A 移到了 B。共价键 C 处的价电子又来填补 B 处的空穴,空穴便从 B 移到了 C,这个过程中,电子从 $C \rightarrow B \rightarrow A$,而空穴则从 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。空穴运动的实质是束缚电子从一种束缚状态转到另一种束缚状态的运动。所以空穴也是一种带正电荷的载流子,也能起导电作用。在同一电场作用下,自由电子和空穴两种载流子运动方向相反。在本征半导体中,自由电子和空穴受热激发总是成对地产生。它们相遇复合时也总是成对地消失,因此本征半导体中电子浓度与空穴浓度总是相等的。

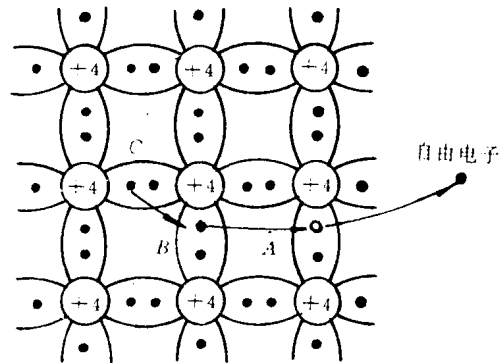


图 1-3 本征激发产生电子空穴对

本征半导体的导电特点如下:

1. 本征半导体的导电能力随着温度的改变而发生显著的变化,例如,纯净的硅在绝对零

度(-273℃)是绝缘体,而当温度升高,共价键中的束缚电子得到能量被激发出来,成为自由电子,导电性能会大大提高。人们利用这一热敏效应制成自动控制中常用的热敏电阻,这一特性称之为热敏性。

2. 当有光线照射到半导体时,不但导电能力增强,还可以产生电动势,人们利用这种光敏效应制成光敏电阻和光电池,这一特性称为光敏性。

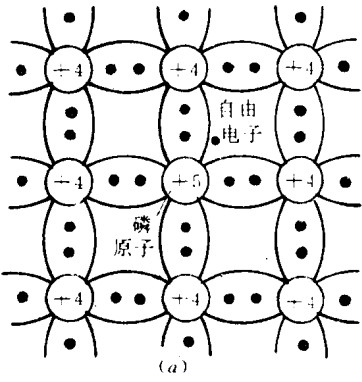
3. 本征半导体的导电能力,还随着掺入微量的有用杂质而发生明显地改变,例如,纯净的锗中掺入一亿分之一的杂质,导电能力增加十二倍。这一特性称为掺杂性,人们利用这一特性,制成了各种晶体管,使得电子工业得到飞速发展。

三、 掺杂半导体

本征半导体不能用来制造半导体器件,因为在常温下,载流子数目不多,导电能力很差。在本征半导体中掺入微量杂质,导电性能会发生显著的变化,因掺入杂质的化合价不同,掺杂半导体可以分为 N 型半导体(电子型半导体)和 P 型半导体(空穴型半导体)。

1. N 型半导体

在本征半导体中加入微量的五价元素形成 N 型半导体。例如,在本征半导体硅中加入一亿分之一的磷元素,晶体结构中某些位置上的硅原子被磷原子所代替,硅原子与磷原子组成共价键结构,如图 1-4 所示。图(a)中,磷原子有 5 个价电子,其中 4 个与硅原子以共价键结合,多出一个价电子,它不受共价键的束缚,只受磷原子核的吸引,只要较小的能量便可成为自由电子。在常温下,掺入的每个磷原子都贡献出一个自由电子,但同时并不产生空穴,而且这种情况不随温度而变。掺入的五价磷原子少了一个电子,成为一个正离子,留在所占位置的空格上,正离子与空穴一样带有正电荷,但它不能移动,不是载流子。在 N 型半导体中电子浓度远大于空穴浓度,电子是多数载流子,简称多子。空穴是少数载流子,简称少子。所掺的 5 价杂质给出电子,称为施主杂质, N 型半导体简化图示于图 1-4(b)。



2. P 型半导体

在本征半导体中加入微量的三价元素,得到 P 型半导体。如图 1-5(a)所示。例如,在本征硅中加入微量的硼元素,硼原子与相邻的 4 个硅原子组成共价键,还缺少一个电子,在共价键上产生了一个空穴,但同时并不产生电子,只是原来的硅晶体本身受热或光照仍会产生少量的电子空穴对,所以在 P 型半导体中,空穴载流子数目远大于电子数目,空穴为多数载流子,电子为少数载流子。空穴可以接受电子,所掺的三价杂质称为受主杂质。 P 型半导体简化图如图 1-5(b)所示。

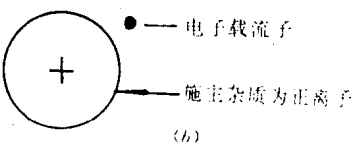


图 1-4 硅中掺磷形成 N 型半导体
(a) N 型半导体共价键结构
(b) N 型半导体简化图

不管是 N 型半导体还是 P 型半导体,在掺入杂质后,载流子数目都有相当程度的增加。若每个施主杂质都能产生一个自由电子。或者受主杂质都能产生一个空穴,那么尽管杂质含量甚

微。但它们对半导体的导电能力将有很大影响。掺入百万分之一的杂质,载流子浓度将比本征半导体增加一百万倍。如果在半导体中既掺入施主杂质,又掺入受主杂质,它将成为哪种半导体呢?这要看施主杂质和受主杂质哪个浓度大来决定。若五价元素浓度大,则为 N 型半导体,反之为 P 型半导体。由此可见,采用适当的掺杂可使 N 型半导体、 P 型半导体互相转化。

应该注意, N 型和 P 型半导体都不是带电体,对外不显电性,因为在掺杂过程中,既不丧失电荷,也不从外界得到电荷。

练习题

1-1.1 填空

(1) 金属导体中的载流子是_____,半导体中的载流子是_____。

(2) 本征半导体中加入微量五价元素磷将产生_____,形成_____型半导体。磷原子称为_____杂质。

(3) 在本征半导体中掺入_____价元素将产生空穴,形成_____型半导体。

(4) 空穴运动的实质是_____。

(5) 本征半导体中加入 $\frac{1}{10^6}$ 的硼,形成_____半导体,再加入 $\frac{1}{10^5}$ 的磷形成_____半导体。

(6) 半导体中的少数载流子浓度由_____决定,多数载流子浓度由_____决定。

1-1.2 画出 N 型半导体和 P 型半导体的简化模型,其中正离子带正电荷,负离子带负电荷,它们是否为载流子?为什么?

1-1.3 N 型半导体中多子和少子是什么? P 型半导体中多子和少子是什么?

1-1.4 本征半导体的导电特点是什么?

1-1.5 N 型半导体中的多子(自由电子)是怎样产生的? N 型半导体中有空穴吗?如果有是怎样产生的?

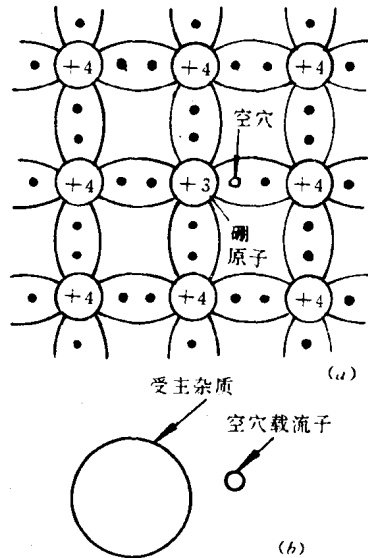


图 1-5 硅中掺硼形成 P 型半导体

(a) P 型半导体共价键结构 (b) P 型半导体简化图

§ 1-2 PN 结

在一块完整的本征半导体内,利用不同的掺杂,制成一边是 N 型区,另一边是 P 型区,在 P 型区与 N 型区的交界处形成一个具有特殊性能的 PN 结,它是构成各种半导体器件的基础,下面进行详细讨论。

一、 PN 结的形成

P 型半导体中,空穴为多数载流子,电子为少数载流子。 N 型半导体中,电子为多数载流

子,空穴为少数载流子。当两种半导体结合在一起时,在交界处有很大的载流子浓度差,这种浓度差异使得多子将越过交界面向另一侧扩散,如图 1-6 所示,扩散到对方的载流子很快被对方多子复合掉,扩散的结果在交界面附近破坏了原来 P 区和 N 区的电中性, P 区失去空穴,留下带负电的受主杂质离子, N 区失去电子,留下带正电的施主杂质离子。接触面形成正负离子组成很薄的空间电荷区,这就是 PN 结,如图 1-7 所示。在这个区域内,多数载流子扩散到对方,

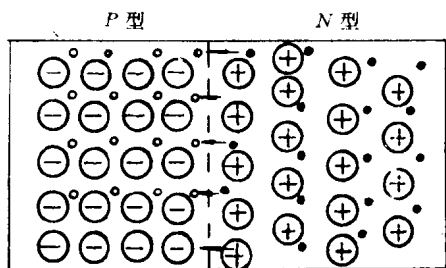


图 1-6 扩散运动

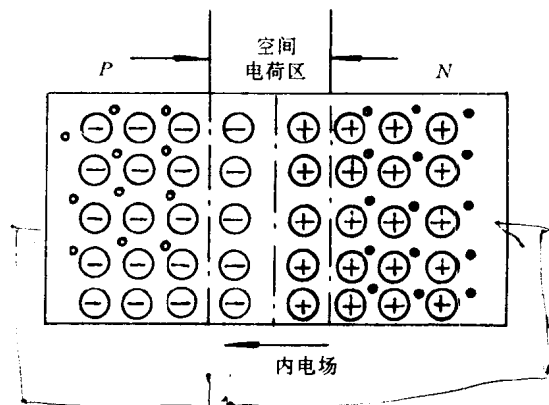


图 1-7 PN 结的形成

并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区又称为耗尽层。扩散越强,空间电荷区越宽,这个区域电阻越大,因为正、负离子虽然也带电,但它们不能任意移动。空间电荷区也称为自建电场,其方向由 N 区指向 P 区,在自建电场作用下,阻碍多子继续扩散,因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反,所以空间电荷区又称为阻挡层。

另一方面,自建电场有利于 P 区的少子(电子)向 N 区运动,也有利于 N 区的少子(空穴)向 P 区运动,这种在电场力的作用下载流子的定向运动称为漂移运动。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区失去的空穴,而从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子,这就使空间电荷减少。因此,漂移运动的结果使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

由此可见,扩散运动和漂移运动是互相连系又互相矛盾的,扩散使空间电荷区加宽,内电场增强,于是扩散的阻力增大,漂移运动使空间电荷区变窄,内电场减弱,又使扩散容易进行。当扩散运动和漂移运动的作用相等时,就达到了动态平衡。这时两边载流子尽管还有往来,但是扩散过去多少载流子,便会有同样数量的载流子漂移过来,于是在交界面附近形成了稳定的空间电荷区, PN 结就形成了。

内电场的大小由材料决定,硅材料制成的 PN 结内建电场为 $0.6V \sim 0.8V$ 左右,锗材料制成的 PN 结内建电场为 $0.2V \sim 0.3V$ 左右。

二、 PN 结的导电特性

上面所讨论的 PN 结空间电荷区,使得它有一种独特的性能,即单向导电性。它的电阻大小与外加电压的极性有关,例如在图 1-8 电路中,当电源的正极接 P 区,负极接 N 区,则灯泡亮;当电源的正极接 N 区,负极接 P 区,则灯泡不亮。由此可见, PN 结具有单向导电性,起到

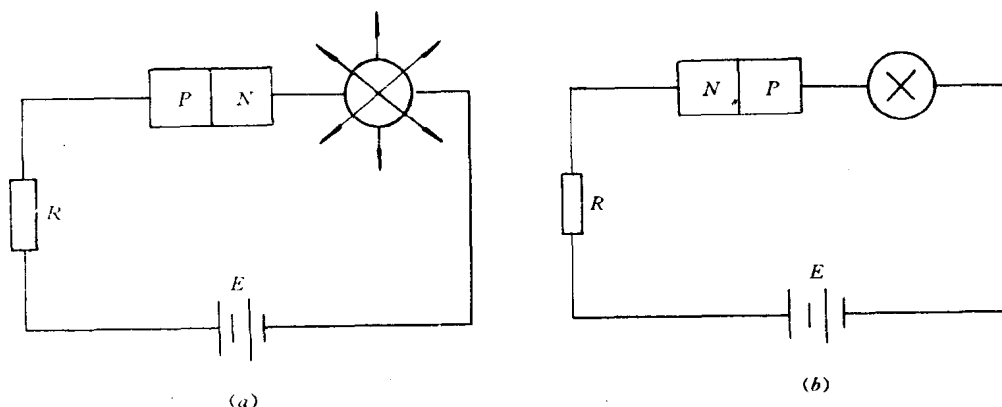


图 1-8 PN 结的单向导电
(a)灯泡亮 (b)灯泡不亮

了一个开关的作用,下面我们将分析 PN 结为什么具有单向导电性。

1. PN 结外加正向电压

PN 结外加正向电压是指 P 型半导体端较 N 型半导体端为正(即 P 正 N 负),如图 1-9 所示。这种情况称为正向偏置,简称正偏。此时外电场与内电场方向相反。在外电场作用下,PN 结的动态平衡被打破,内电场被削弱,空间电荷区变窄,有利于多子的扩散运动,不利于少子的漂移运动,于是扩散运动增强,扩散电流增大,PN 结处于导通状态,呈现一个很小的电阻,如同一个开关处于接通状态。这个电流称为 PN 结的正向电流,用 I_F 表示。当外加电压升高,内电场进一步减弱,扩散电流随之增加,但它们之间不是线性的。

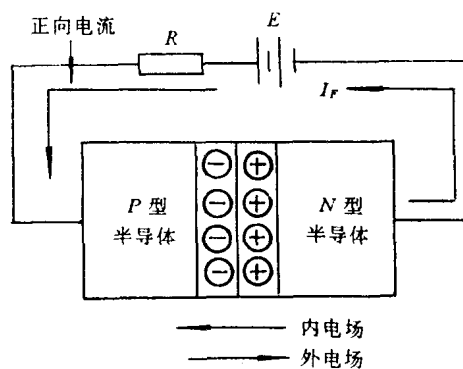


图 1-9 PN 结外加正向电压

2. PN 结外加反向电压

图 1-10 表示 PN 结外加反向电压的情况,这时 P 端较 N 端为负(即 P 负 N 正),也称为反向偏置。此时外电场与内电场方向相同,在外电场作用下,空间电荷区加宽,结电阻增大,阻碍多子的扩散运动,因此,扩散

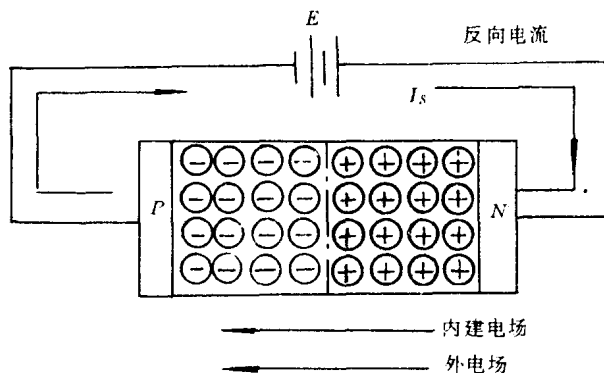


图 1-10 PN 结外加反向电压

电流趋近于零。而外电场的作用有利于少子的漂移运动,PN 结内的电流主要是漂移电流,漂移电流的方向与扩散电流的方向相反。由于少数载流子的浓度很小,PN 结形成后,其数值决定于温度,而几乎与外加电压无关,成恒流状态,好象电流是饱和了,所以称为反向饱和电流,用 I_s 表示。反向饱和电流的数值很小,硅材料制成的 PN 结, I_s 通常在 $1\mu\text{A}$ 以下;锗材料制成的 PN 结 I_s 比硅材料制成的 I_s 要大。

由于反偏时 I_s 很小,可以认为 PN 结基本上是不导电的,PN 结呈现一个很大的电阻,如同一个开关打开时,此时 PN 结处于截止状态。

三、PN 结的击穿

上述 PN 结外加反向电压增加到一定数值时,反向电流突然急剧增加,如图 1-11 所示。这种反向电流剧增的现象称为 PN 结的反向击穿。发生反向击穿的电压称为反向击穿电压,用 $V_{(BR)}$ 表示。

PN 结的反向击穿分为三类:

1. 雪崩击穿

当反向电压较高时,结内电场很强,而结层又有一定的宽度,在结内作漂移运动的少数载流子,受强电场的加速作用获得很大的能量。它与结内原子碰撞时,使原子的价电子摆脱束缚状态,而形成电子空穴对。新生的电子和空穴在强电场的作用下再去碰撞其它原子,产生更多的电子空穴对,如此链锁反应,使耗尽层中载流子的数量急剧增加,反向电流迅速增大,如同在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样,这种载流子的倍增现象就是雪崩击穿。显然击穿的物理本质是碰撞电离。

2. 齐纳击穿

当耗尽层中电场强度很大时,它可以把束缚电子直接从共价键中拉出来,形成电子空穴对,而产生大量的载流子,出现了击穿。这种击穿的本质是场致激发。这种击穿现象首先由齐纳提出,所以称为齐纳击穿。

雪崩击穿发生在掺杂浓度较低的 PN 结中。由于浓度低,空间电荷区较宽,少子通过空间电荷区与原子碰撞的机会多。齐纳击穿通常出现在掺杂浓度很高的 PN 结中,因为杂质浓度高,耗尽层宽度比一般情况小的多,即使外接电压并不高,耗尽层中的电场强度达到非常高的数值,以致出现齐纳击穿。

实践表明,齐纳击穿电压一般低于 5V。雪崩击穿电压可以控制在 8V~1000V 以上。5V~8V 之间,两种击穿可能同时发生。这两种击穿只要限制电流在一定范围,其性能是可逆的,将反向电压降低到击穿电压以下,PN 结重新恢复到反向高阻状态。

3. 热击穿

反向击穿后,电流增大,消耗在 PN 结上的功率也增大,引起结温升高,结温升高引起反向电流更加增大,而电流的增大又使结温进一步升高,若不加以限制,很快就把 PN 结烧毁,这种击穿称为热击穿。

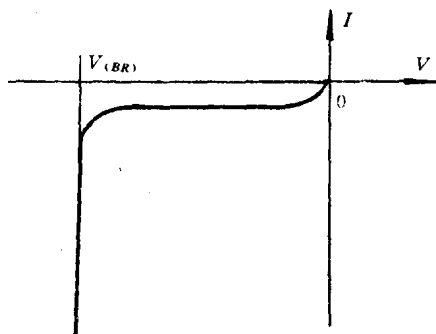


图 1-11 PN 结的击穿特性

齐纳击穿与雪崩击穿属于电击穿,电击穿经常被人们利用,而热击穿是破坏性击穿,一定要设法避免。正向电流过大也会发生热击穿。

四、PN 结的等效电容

电容是存储电荷的容器。两个导体之间隔着绝缘体就构成电容器。 P 区和 N 区载流子多,充当了两个导体,空间电荷区缺载流子充当绝缘体, PN 结的结构恰是一个电容器,这一电容是由势垒电容和扩散电容两部分组成。

1. 势垒电容 C_B

PN 结空间电荷区,又称为势垒区,这个区域存储着一定数量的空间电荷,当外加电压改变时,就会引起存储在 PN 结内的空间电荷量改变,显示了 PN 结的电容效应。这个电容称为空间电荷电容,又称势垒电容。

PN 结空间电荷区的宽度和电荷量是随外加电压变化的,当外加正向电压,外电场把多数载流子推向耗尽层,使耗尽层变窄,电荷量减小,相当于势垒电容“放电”,如图 1-12 所示。反之,外加反向电压,耗尽层中的电荷量增加,宽度加大,相当于“充电”。可见势垒电容与普通平行板电容相似。可以用下式表示:

$$C_B = \frac{\epsilon S}{L}$$

S 表示 PN 结的面积, L 对应耗尽层的宽度。 ϵ 为介电常数。

2. 扩散电容 C_D

PN 结两侧积累的载流子数量,随着外加电压的改变而改变,表现出电容效应。当外加正向电压增加时,扩散到 N 区的空穴浓度加大,扩散到 P 区的电子浓度加大,在 N 区空穴的积累加多,在 P 区电子的积累加多。当正向电压减小,积累在 N 区的空穴与 P 区的电子数量都减少。表明在正向电压变化时,有载流子的“充入”和“放出”。可等效为在 PN 结上并了一个电容。因为这一电容是由载流子在扩散中产生的积累引起的,所以称为扩散电容。

图 1-13 为 PN 结高频等效电路, r 为结电阻, C 为结电容, $C=C_B+C_D$ 。 C 的大小与本身的结构和工艺有关,还与外加电压有关。当 PN 结处于正向偏置时, r 为正向电阻,其数值很小,结电容较大,此时主要是扩散电容起作用。当 PN 结处于反向偏置时 r 为反向电阻,其数值较大,结电容较小,此时主要是势垒电容起作用。

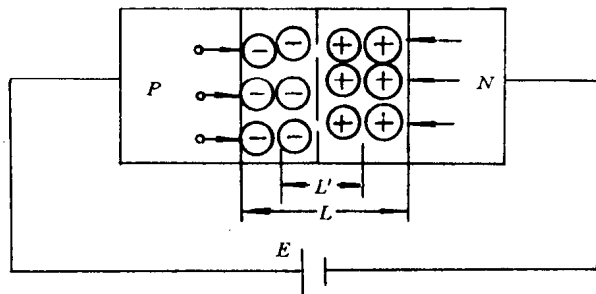


图 1-12 外加正向电压势垒电容放电

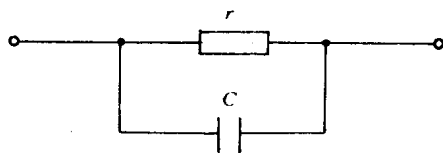


图 1-13 PN 结高频等效电路

练习题

1-2.1 选词填空

(1) P 型和 N 型半导体用特殊工艺相接触,由于_____扩散运动的结果,在交界处形

成一个_____这个区域有利于_____运动,不利于_____运动。

(多子,少子,正电荷区,负电荷区,正负电荷区,扩散,漂移)

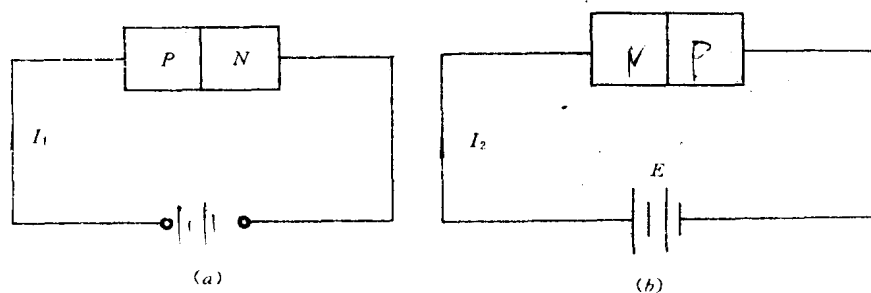
(2) PN 结外加正向电压,呈现电流 火,电阻 小,此时为 导通 状态,这个电流是 扩散 电流。(大,小,导通,截止,扩散,漂移。)

(3) PN 结外加反向电压,空间电荷区变 宽 阻止 多数载流子 运动。由 少数载流子 形成反向电流。(宽,窄,扩散,漂移,多子,少子。)

(4) 扩散电流的大小由_____决定,漂移电流的大小由_____决定。(电子,空穴,掺杂浓度,温度。)

(5) PN 结在正向偏置时_____起主要作用,反向偏置时_____起重要作用。(扩散电容,势垒电容。)

1-2.2 下图中 $I_1 \gg I_2$ 标出 P 区, N 区或电源 E 的方向。



题图 1-2·2

1-2.3. 理想的导电特性是什么?

1-2.4 简述 PN 结形成过程。

1-2.5 为什么 PN 结称为阻挡层? 又称为耗尽层?

1-2.6 PN 结的击穿分为几种? 物理本质是什么?

§ 1-3 晶体二极管

一、二极管的结构

晶体二极管的主要部分就是一个 PN 结,在 PN 结的两端引出两个电极, P 型端为阳极, N 型端为阴极,外壳用玻璃或塑料封装。图 1-14(a)为二极管的内部连接图,图 1-14(b)为二极管的符号表示法。三角形箭头的方向为导通方向。“ a ”为正极,“ k ”为负极。

二极管按材料不同分为硅管和锗管两类。硅管是指用本征硅掺杂制成,锗管是指用本征锗掺杂制成。

二极管按 PN 结的构造来分有点接触型和面结合型两类。点接触型二极管是由一根细的金属触丝(三价)和一块 N 型半导体(例如锗)的表面接触,然后在正方向通过很大的瞬时电流,使触丝和半导体牢固地熔接在一起,构成 PN 结,引出两个电极,外加管壳,密封而成,如