

电工电子系列教材

模拟电子技术

Analog

刘润华 刘立山 主编

石油大学出版社

电工电子系列教材

模拟电子技术

主 编 刘润华 刘立山
副主编 李震梅 郝宁眉 吴贞焕

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/刘润华等编. —东营:石油大学出版社, 2001. 8

电工电子系列教材

ISBN 7-5636-1400-1

I. 模… II. 刘… III. 模拟电路-电子技术-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 20436 号

电工电子系列教材

模 拟 电 子 技 术

刘润华 刘立山 主编

责任编辑:宋秀勇(电话 0546—8396155)

封面设计:孟卫东

出 版 者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://suncetr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱: upcpress@mail.hdpu.edu.cn

印 刷 者:青岛经济技术开发区华信包装印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392139)

开 本: 787×960 1/16 印张: 22.5 字数: 460 千字
版 次: 2001 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—5000 册
定 价: 27.00 元

前 言

电子技术是电类各专业的一门技术基础课,它是研究各种半导体器件、电路及其应用的学科。

电子技术分为模拟电子技术和数字电子技术。随着电子技术的飞速发展和计算机的广泛应用,在世纪之交的前夕,又出现了电子设计自动化(Electronics Design Automation,简称 EDA),为电子技术领域增添了新的内容。根据当前电子技术发展的趋势和 21 世纪对人才培养的要求,结合我们多年教学改革的经验,组织编写了《模拟电子技术》、《数字电子技术》和《电子设计自动化》等系列教材。

本书为模拟电子技术部分。在编写过程中,依据 1995 年原国家教委颁发的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》,面对学时越来越少,内容越来越多,要求越来越高的矛盾和提高大学生创新能力的要求,我们本着以下原则:精选内容,删简分立元件电路,加强集成电路,增加新内容;讲清概念和电路的工作原理及分析方法;电路归类,便于类比讲解;主要技术指标的计算采用工程近似法,而全面的严谨计算用 EDA 软件解决。

在安排教材内容上考虑了以下几点:

1. 分立电子器件集中在一章。考虑到分立电子器件有许多共性问题,再加上模拟集成电路和数字集成电路都是以分立器件为基础,所以把所有的分立器件特别是场效应管均放在第一章集中介绍。

2. 把场效应管放大电路归并到基本放大电路。晶体管放大电路的三种组态(共射、共集、共基)和场效应管放大电路的三种组态(共源、共漏、共栅)都是一一对应的,具有相同的特点,将它们归结为三类通用放大器,即反相放大器、电压跟随器、电流跟随器,有利于基本放大器的分析与综合,节省授课时间,便于读者理解。

3. 加强集成电路概念。把差分放大电路、恒流源电路作为集成运算放大器的单元电路,把基准电压源电路作为三端集成稳压器的单

2008/10

元电路,并且简化了这些电路的定量计算。

4. 增加了最新内容,如在系统可编程模拟器件(ispPAC)、开关电容滤波器、无工频开关电源、电流模型运算放大器、绝缘栅功率晶体(IGBT)等,以适应新技术发展的需要。

5. 对于难点部分,增加了大量例题,便于读者理解和自学。

参加本书编写的有:石油大学的刘润华(第2、8、9章);莱阳农学院的刘立山(第1、7章);山东理工大学的李震梅(第5、6章);石油大学的郝宁眉(第4章),吴贞焕(第3章)。刘润华教授为本书主编,负责本书的策划、组织和定稿。

在本书的编写过程中,得到了成谢锋、董传岱、单亦先、于云华、任旭虎等同志和其他许多老师的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中一定有不少错误和不足之处,恳请读者批评、指正,并提出修改意见。

编 者

2001年7月

目 录

第 1 章 常用半导体器件	(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	(3)
1.2 PN 结及其单向导电性	(5)
1.2.1 PN 结的形成	(5)
1.2.2 PN 结的单向导电性	(6)
1.2.3 PN 结的反向击穿特性	(8)
1.2.4 PN 结的电容效应	(9)
1.3 半导体二极管	(10)
1.3.1 二极管的结构	(10)
1.3.2 二极管的伏安特性	(11)
1.3.3 二极管的主要参数	(12)
1.3.4 二极管的模型	(14)
1.3.5 特殊二极管	(15)
1.4 半导体三极管	(19)
1.4.1 三极管的结构	(19)
1.4.2 三极管的电流分配与放大原理	(20)
1.4.3 三极管的特性曲线	(26)
1.4.4 三极管的主要参数	(29)
1.5 场效应管	(33)
1.5.1 绝缘栅型场效应管	(33)
1.5.2 结型场效应管	(37)
1.5.3 场效应管的主要参数	(40)
1.5.4 场效应管与晶体管的比较及特点	(44)
习 题	(45)
第 2 章 基本放大电路	(48)
2.1 放大电路的基本概念及其性能指标	(48)
2.1.1 放大电路的基本概念	(48)
2.1.2 放大电路的性能指标	(49)
2.2 单管共发射极放大电路	(53)

2.2.1 单管共发射极放大电路的组成	(53)
2.2.2 单管共射极放大电路的工作原理	(54)
2.3 放大电路的图解分析法	(56)
2.3.1 放大电路的静态分析	(56)
2.3.2 放大电路的动态分析	(58)
2.4 放大电路的小信号模型分析法	(62)
2.4.1 BJT的 H 参数小信号模型	(62)
2.4.2 单管共射放大电路的小信号模型法分析	(66)
2.5 共集电极和共基极放大电路	(73)
2.5.1 共集电极放大电路(射极输出器)	(73)
2.5.2 共基极放大电路	(76)
2.6 场效应管放大电路	(78)
2.6.1 场效应管放大电路的静态偏置及静态分析	(78)
2.6.2 场效应管的小信号模型	(80)
2.6.3 场效应管放大电路的小信号模型分析	(81)
2.6.4 放大电路的总结	(85)
2.7 多级放大电路	(86)
2.7.1 多级放大电路的耦合方式	(86)
2.7.2 多级放大电路的分析	(89)
2.8 放大电路的频率响应	(93)
2.8.1 无源 RC 电路的频率响应	(93)
2.8.2 BJT 的混合 π 模型	(97)
2.8.3 共射放大电路的频率响应	(101)
习 题	(111)
第3章 集成运算放大器	(122)
3.1 集成运算放大器的组成	(122)
3.2 集成运算放大器的单元电路	(123)
3.2.1 差动放大电路	(123)
3.2.2 电流源电路	(130)
3.3 集成运算放大器介绍	(133)
3.3.1 BJT 通用型运算放大器 $\mu A741$	(133)
3.3.2 MOS 通用型运算放大器 ICL7614	(136)
3.4 集成运算放大器的主要参数	(138)
3.4.1 输入失调参数	(138)
3.4.2 差模特性参数	(139)

3.4.3 共模特性参数	(139)
3.4.4 动态参数	(140)
3.4.5 电源特性参数	(140)
3.5 集成运算放大器的传输特性和理想模型	(140)
3.5.1 集成运算放大器的电压传输特性	(140)
3.5.2 运放的理想模型	(141)
3.6 特殊集成运算放大器	(143)
习 题	(150)
第4章 负反馈放大电路	(154)
4.1 反馈的基本概念与增益的一般表达式	(154)
4.1.1 反馈的概念	(154)
4.1.2 反馈放大电路的分类及判别	(155)
4.1.3 反馈放大电路增益的一般表达式	(158)
4.2 负反馈放大电路的四种组态	(159)
4.2.1 电压串联负反馈	(159)
4.2.2 电流并联负反馈	(161)
4.2.3 电压并联负反馈	(163)
4.2.4 电流串联负反馈	(164)
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	(166)
4.3.1 提高放大倍数的稳定性	(166)
4.3.2 改善放大电路的非线性失真	(167)
4.3.3 扩展放大电路的通频带	(167)
4.3.4 对输入电阻和输出电阻的影响	(169)
4.4 负反馈放大电路的近似计算	(172)
4.4.1 估算的依据	(173)
4.4.2 深度负反馈放大电路估算举例	(173)
4.5 负反馈放大电路的稳定条件和措施	(180)
4.5.1 产生自激振荡的原因及条件	(180)
4.5.2 稳定判据及稳定裕度	(181)
4.5.3 负反馈放大电路的稳定性分析	(183)
4.5.4 频率补偿方法	(184)
习 题	(187)
第5章 信号的运算与处理电路	(193)
5.1 比例运算电路	(193)
5.1.1 反相比例运算电路	(193)

5.1.2 同相比例运算电路	(194)
5.2 加减法运算电路	(195)
5.2.1 加法运算电路	(195)
5.2.2 减法运算电路	(197)
5.3 积分和微分运算电路	(199)
5.3.1 积分电路	(199)
5.3.2 微分电路	(201)
5.4 对数、指数与乘法运算电路	(202)
5.4.1 对数运算电路	(202)
5.4.2 指数运算电路	(203)
*5.4.3 对数指数型模拟乘法器	(203)
*5.4.4 变跨导式模拟乘法器	(204)
5.4.5 模拟乘法器的应用	(205)
5.5 电压电流转换器	(208)
5.5.1 电压/电流转换器	(208)
5.5.2 电流/电压转换器	(209)
5.6 有源滤波器	(210)
5.6.1 滤波器的功能和分类	(210)
5.6.2 低通滤波器	(211)
5.6.3 高通滤波器	(213)
*5.6.4 开关电容滤波器	(215)
*5.7 实际集成运放的模型	(218)
5.7.1 A_{od} 和 r_{id} 为有限值的情况	(218)
5.7.2 共模抑制比 K_{CMR} 为有限值的情况	(219)
5.7.3 U_{IO} 、 I_{IO} 和 I_{IB} 不为 0 的情况	(220)
习 题	(222)
第 6 章 波形的产生与变换电路	(229)
6.1 正弦波振荡器的基本原理	(229)
6.1.1 自激振荡的条件	(229)
6.1.2 正弦波振荡器的起振过程	(230)
6.1.3 正弦波振荡电路的组成与分类	(231)
6.1.4 正弦波振荡电路的分析步骤	(232)
6.2 RC 正弦波振荡电路	(232)
6.2.1 RC 串并联网络的选频特性	(233)
6.2.2 RC 桥式振荡电路的工作原理	(234)

6.2.3 其他 RC 振荡电路	(236)
6.3 LC 振荡电路	(239)
6.3.1 LC 并联谐振回路的选频特性	(239)
6.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	(240)
6.3.3 三点式 LC 振荡电路	(242)
6.4 石英晶体振荡电路	(246)
6.4.1 石英晶体振荡器	(246)
6.4.2 石英晶体振荡电路	(248)
6.5 电压比较器	(250)
6.5.1 单门限比较器	(250)
6.5.2 迟滞比较器	(253)
6.5.3 集成电压比较器	(254)
6.6 方波发生器	(256)
6.6.1 电路结构及工作原理	(256)
6.6.2 输出幅度和振荡周期	(257)
6.7 三角波发生器及锯齿波发生器	(258)
6.7.1 三角波发生器	(258)
6.7.2 锯齿波发生器	(260)
6.8 集成函数发生器 ICL8038	(261)
6.8.1 ICL8038 的组成框图及基本工作原理	(261)
6.8.2 ICL8038 封装外形及管脚功能说明	(263)
6.8.3 应用举例	(264)
习 题	(267)
第 7 章 功率放大电路	(275)
7.1 功率放大电路的一般问题	(275)
7.1.1 对功率放大电路的要求	(275)
7.1.2 功率放大电路的分类	(276)
7.2 互补对称功率放大电路	(277)
7.2.1 乙类互补对称功率放大电路	(277)
7.2.2 甲乙类互补对称功率放大电路	(282)
7.3 集成功率放大电路	(287)
7.3.1 LM386 通用型集成功率放大电路	(288)
7.3.2 专用型集成功率放大电路	(289)
7.3.3 CD4100 音频放大电路	(289)
7.4 功率器件	(290)

7.4.1 功率晶体管(GTR)	(290)
7.4.2 功率场效应管(P-MOSFET)	(291)
7.4.3 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	(292)
习 题	(294)
第8章 直流电源	(297)
8.1 概 述	(297)
8.2 单相整流滤波电路	(298)
8.2.1 单相桥式整流电路	(298)
8.2.2 滤波电路	(300)
8.3 串联型线性集成稳压电路	(304)
8.3.1 稳压电路的质量指标	(304)
8.3.2 串联型线性集成稳压电路的工作原理	(305)
8.3.3 串联型线性集成稳压器的单元电路	(306)
8.3.4 三端固定式输出集成稳压器及其应用	(310)
8.3.5 三端可调式集成稳压器及其应用	(312)
8.4 开关型稳压电路	(314)
8.4.1 串联型开关稳压电路的工作原理	(314)
8.4.2 集成开关型稳压电路实例	(315)
8.4.3 无工频变压器开关电源	(318)
习 题	(323)
第9章 在系统可编程模拟电路	(328)
9.1 ispPAC 的结构	(328)
9.1.1 ispPAC10 的结构	(328)
9.1.2 ispPAC20 的结构	(331)
9.2 PAC 块的结构与工作原理	(335)
9.2.1 PAC 块的内部结构	(335)
9.2.2 PAC 块的工作原理	(336)
9.3 PAC 的接口电路和缓冲电路	(337)
9.3.1 输入接口电路	(337)
9.3.2 输出接口电路	(338)
9.3.3 缓冲电路	(338)
9.4 PAC 的增益设置方法	(339)
习 题	(341)
部分习题参考答案	(343)
参 考 文 献	(348)

第1章 常用半导体器件

半导体器件是近代电子学的重要组成部分,由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。本章首先介绍半导体的基本知识,然后介绍PN结的形成和单向导电原理,半导体二极管的伏安特性、参数及基本电路分析,最后介绍双极型三极管和场效应三极管的工作原理、特性和参数。

1.1 半导体基本知识

在自然界中,存在着许多不同的物质,有的物质很容易传导电流,称为导体,如铜、铝等金属。也有的物质几乎不传导电流,称为绝缘体,如橡皮、陶瓷、塑料和木头等。此外还有一类物质,它的导电性能介于导体和绝缘体之间,我们称它为半导体,如锗、硅、砷化镓和氧化物等。在近代电子学中,用得最多的半导体是锗和硅,在它们的原子结构中,最外层都有4个电子,所以硅和锗都是四价元素,其简化模型如图1.1.1所示。外层电子受原子核束缚力最小,称为价电子。电子器件所用的半导体具有晶体结构,所以有时把半导体叫做晶体。



图 1.1.1 锗和硅原子的结构简化模型

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的共价键结构

纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。硅或锗原子组成晶体后,原子之间靠的很近,原来分属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响,而使价电子为两个原子所“共有”,这样每个价电子个别的轨道就变成两个相邻原子之间两个价电子的公共轨道,形成了晶体中的共价键结构。图1.1.2表示硅和锗晶体构成共价键的示意图,图中用 $\oplus 4$ 表示原子核除最外层价电子外的内层电子所组成的惯性核心电荷。由图可见,共价键中的两个电子是由相邻原子

各用一个价电子组成的,把它们称为**束缚电子**。因此共价键是表示两个共有价电子所形成的束缚作用。由于共价键有很强的结合力,使各原子在晶体中按一定形式排列,形成点阵。而共价键中的电子受两个原子核引力的约束,不易脱离公共轨道,因此在绝对零度(即 $T=0\text{K}$)和无外界激发时,硅或锗晶体中由于没有传导电流的导电粒子存在,所以不能导电。

2. 本征半导体的导电机理

当价电子受到一定能量的外界激发(如受热或受光)时,由于动能增强,就能使束缚电子挣脱共价键的束缚成为自由电子,并在原来价电子的位置留下一个空位,这个空位叫做**空穴**,如图 1.1.3 所示。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

在外加电场的作用下,本征硅或锗半导体受激发产生的自由电子在电场力的作用下发生定向移动,形成一部分电流,同时共价键中的价电子也受到电场力的作用,邻近共价键中的价电子就可能填补这个失掉电子的空穴,而在这个价电子原来的位置上又留下新的空穴,以后其他价电子又可转移到这个新的空穴,这样就出现一定的电荷迁移而形成另一部分电流。我们可

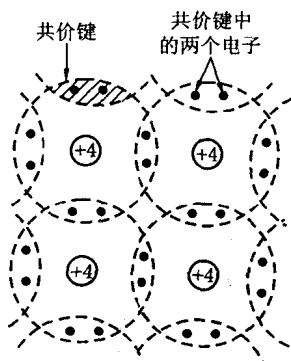


图 1.1.2 硅和锗的共价键结构

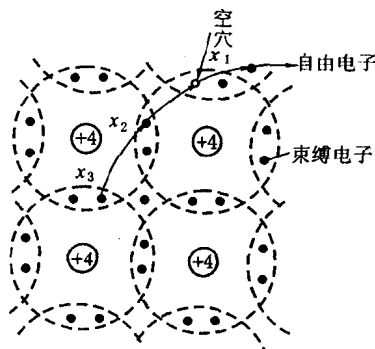


图 1.1.3 电子和空穴的移动

以从共价键结构图上具体地看到空穴和电子的移动。在图 1.1.3 中,如果在 x_1 处有一个价电子被激发成为自由电子,就产生一个空穴, x_2 处的价电子便可以填补到这个空穴,从而使空穴由 x_1 移到 x_2 。接着 x_3 处的电子又填补到 x_2 处的空穴,这样空穴又由 x_2 移到了 x_3 处,在这个过程中,价电子由 x_3 移到 x_1 ,仍处于束缚状态,而空穴由 x_1 移到 x_3 ,就是说空穴的移动方向和价电子移动的方向是相反的。因而可用空穴移动产生的电流来代表价电子移动产生的电流。由此可见,在外加电场的作用下,本征半导体中形成的电流由两部分载流子组成,即自由电子和空穴。空穴或束缚电子移动产生电流的根本原因是由于共价键中出现的空穴,只有当共价键中出现了空穴以后,它才开始导电。而且空穴又是失去电子以后留下的空位,因此在分析时用空穴的运动来代替束缚电子的运动就更加方便。在这里可把空穴看成是一个带正电的粒子,它所带的电量与电子所带的电量相等,符号相反,在外加电场作用下,可以自由地在晶体中运动,从而和自由

电子一样可以参与导电。空穴越多,越有利于价电子的移动,形成的电流愈大,它是与空穴的数量成正比的。

3. 电子与空穴的产生与复合

在本征半导体中,由于晶体本身原子的热运动而不断使价电子激发,而成对地产生自由电子和空穴。另一方面,自由电子在运动过程中又有可能返回共价键,这就是电子与空穴的复合。在动态平衡情况下,载流子的产生率与复合率相等,因此半导体内具有确定数目的自由电子和空穴。载流子浓度随温度的增加按指数规律增大。由于导电能力决定于载流子数目,因此半导体的导电能力将随温度的增加而显著增加。

本征半导体具有下列特性:

(1) 本征半导体对价电子的束缚较弱,当受到外界光和热的激发时,便释放价电子成为自由电子,从而使导电能力发生显著的变化,利用这种特性可制成各种光敏元件和热敏元件。

(2) 本征半导体中的价电子被激发后,同时在共价键中出现空穴,自由电子和空穴都能在外加电场作用下定向运动形成电流。

(3) 在本征半导体内自由电子和空穴总是成对出现的,因此本征半导体的自由电子和空穴数总是相等的。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,便形成杂质半导体。掺入杂质后,半导体的导电性能显著增强。在杂质半导体中,因掺入杂质性质的不同,可分为N型半导体(电子型半导体)和P型半导体(空穴型半导体)两大类。

1. N型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入少量五价元素杂质,如磷或锑等,则晶体点阵中某些位置上的硅原子将被磷原子所代替。磷原子有五个价电子,它用四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后,必定还多余一个价电子,如图1.1.4所示。这个多余的价电子虽不受共价键的束缚,但仍受磷原子核的正电荷吸引而只能在磷原子的周围活动,不过它所受磷原子的吸引力终究要比共价键中的束缚作用微弱得多,只需要较

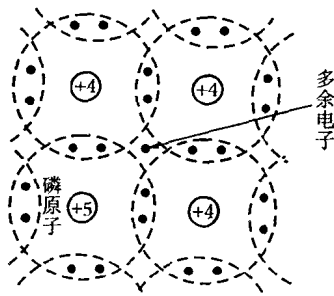


图 1.1.4 N型半导体的共价键结构

小的能量就能挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。因此在室温下,几乎所有杂质上的电子都能成为自由电子。由于磷原子在硅晶体中给出一个多余的电子,故称磷为施主杂质,或 N 型杂质。当磷原子给出多余的价电子后,磷原子本身即因失去电子而成为正离子。但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴,这是不同于本征半导体的。除了杂质给出的自由电子外,原晶体本身也会受激发产生少量的电子空穴对,但是由于掺杂增加了许多额外的自由电子,因此在 N 型半导体中,自由电子数远大于空穴数。这种半导体将以自由电子导电为主,所以自由电子称为多数载流子(简称多子),而空穴称为少数载流子(简称少子)。

2. P 型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入少量三价元素杂质,如硼或镓等,因硼原子只有三个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便产生一个空穴,如图 1.1.5 所示。当相邻共价键上的价电子受到热激发或其他激发时,就有可能填补这个空穴;这种补充空穴所需能量较少,所以在室温下,价电子便能填补所有硼原子的空穴,因而在外加电场的作用下形成空穴电流。

由于硼原子在硅晶体中能接受电子,故称硼为受主杂质,或 P 型杂质。当硼原子

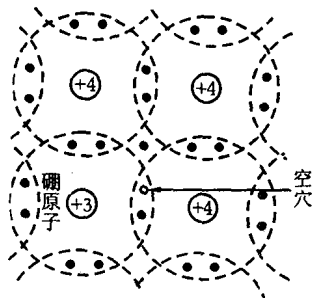


图 1.1.5 P 型半导体的共价键结构

子在晶体中接受了相邻位置的一个价电子后,硼原子多了一个电子而成为负离子,同时在晶体中产生了一个空穴。在产生空穴的同时并不产生新的自由电子,但是原来的硅晶体本身仍会产生少量的电子空穴对。通过控制掺入杂质的多少,便可控制多余的空穴数。在 P 型半导体中,空穴数远大于自由电子数,这种半导体以空穴导电为主,故空穴为多数载流子,而自由电子为少数载流子。

由此可见,在掺入杂质后,载流子的数量大大增加。若每个施主杂质原子都能产生一个自由电子,或者每个受主杂质原子都能产生一个空穴,那么,尽管杂质含量很微小,但它们对半导体的导电能力却有很大的影响。因此要提高半导体的导电能力,最有效的方法是在半导体内掺入微量的杂质。

应该注意到,掺杂后半导体中的正负电荷数仍是相等的,因此仍保持电中性状态。

1.2 PN结及其单向导电性

1.2.1 PN结的形成

我们知道,N型半导体中含有大量电子(多子)和少量空穴(少子);而P型半导体中含有大量空穴(多子)和少量电子(少子)。在P型半导体和N型半导体结合后,在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别,N型区内电子很多而空穴很少,P型区内空穴很多而电子很少。这样,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此有一些电子要从N型区向P型区扩散,也有一些空穴要从P型区向N型区扩散,扩散的结果就使P区和N区中原来的电中性条件破坏了。P区一边失去空穴,留下了带负电的杂质离子;N区一边失去电子,留下了带正电的杂质离子。这些杂质离子虽然也带电,但由于物质结构的关系,它们不能任意移动,因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子集中在P、N型半导体的交界面附近形成了一个很薄的空间电荷区,这就是我们所说的PN结。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,因此空间电荷区又称为耗尽层,它的电阻率很高。扩散越强,空间电荷区越宽。

在出现了空间电荷区以后,由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区就形成了一个电场,其方向是从带正电荷的N区指向带负电荷的P区,由于这个电场是由载流子扩散运动即由内部形成的,而不是外加电压形成的,故称为内电场。显然,该内电场将阻止扩散的进一步进行,因为该电场的方向与载流子扩散运动的方向相反。这样,带正电的空穴向N区扩散就要受到这个电场的阻力,同样自由电子向P区扩散也要受到这个电场的阻力。从这个意义上看,空间电荷区又可看作是一个阻挡层,它对多数载流子的扩散有阻挡作用。另一方面,根据电场的方向和电子、空穴的带电极性还可以看出,这个电场将使N区的少数载流子空穴向P区漂移,使P区的少数载流子电子向N区漂移,漂移运动的方向与扩散运动的方向相反。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,使空间电荷减少。因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,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联系又互相矛盾的,扩散使空间电荷区变宽,电场增强,对多数载流子扩散的阻力增大,但使少数载流子的漂移增强;而漂移使空间电荷区变窄,电场减弱,又使扩散容易进行。开始时,扩散运动占优势,但随着电子和空穴的扩散,空间电荷区变宽,电场不断增强,于是漂移运动

也不断增强。当漂移运动和扩散运动达到动态平衡时,两边的电子和空穴尽管还是有来有往,但扩散过去多少电子或空穴,便会有同样数量的电子或空穴漂移回来,空间电荷区不再发生变化,于是便形成了稳定的 PN 结。如图 1.2.1 所示。

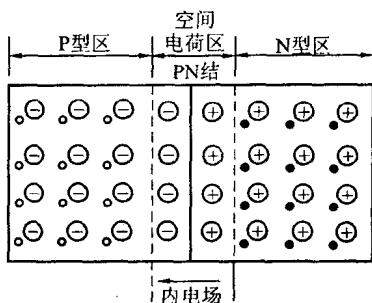


图 1.2.1 PN 结的形成

1.2.2 PN 结的单向导电性

上面讨论的 PN 结是在没有外加电压时的平衡状态,称为平衡 PN 结。PN 结的基本特性——单向导电性只有在外加电压时才显示出来。

1. 外加正向电压

在图 1.2.2(a)中,当 PN 结加上正向电压(也称正向偏置电压) U_F 时,即 U_F 的正端接 P 区,负端接 N 区,外加电场与 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,当 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 区的电子进入 PN 结后,中和了部分正离子,使 N 区的空间电荷量减少,结果使 PN 结变窄,阻挡层变薄(从未加电时的 $11'$ 变到 $22'$),因而电阻减小。外加正向电压

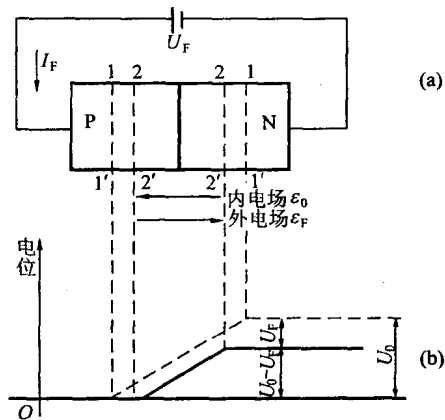


图 1.2.2 外加正向电压时的 PN 结

(a) 电路接法; (b) 电位分布

将集中降落在 PN 结上,并使 PN 结的电场由 ϵ_0 减小到 $\epsilon_0 - \epsilon_F$ 。电位分布如图 1.2.2(b)所示。这样 P 区和 N 区中能越过这个势垒的多数载流子大大增加,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。外加正向电压时,PN 结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定,在外电路上形成一个流入 P 区的电流,称为正向电流 I_F 。外加电压升高,PN 结电场便进一步减弱,扩散电流随之增加。这样,正向的 PN 结表现