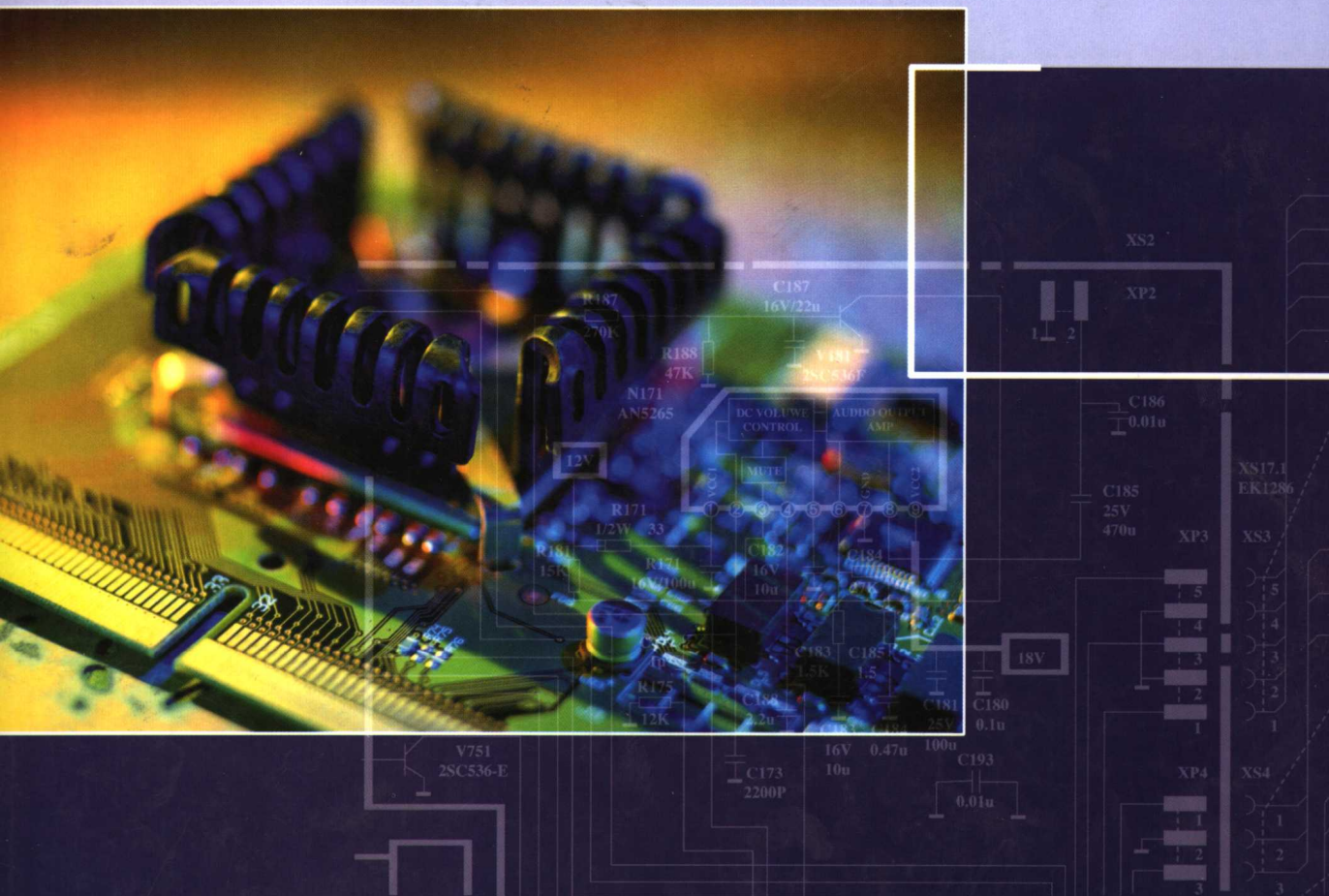


高等学校机电类规划教材

<http://www.phei.com.cn>

电子技术 基础与应用

戈素贞 主编 杜群羊 崔国玮 钮王杰 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等学校机电类规划教材

电子技术基础与应用

戈素贞 主 编
杜群羊 崔国玮 钮王杰 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书旨在适应电子技术的飞速发展和满足应用型人才培养的需求,既有一定的理论深度,又有一定的应用实例,这些实例搭建了从理论到应用的桥梁。全书共分16章,内容由浅入深,系统介绍了模拟电子技术、现代电力电子技术、数字电子技术的基础及应用,是编者多年教学经验的积累。

本书可作为大学本科、专科非电类专业电子技术课程的教材,也可作为电子爱好者自学和实践的指导性参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础与应用 / 戈素贞主编. —北京: 电子工业出版社, 2007. 11
高等学校机电类规划教材
ISBN 978-7-121-04365-9

I. 电… II. 戈… III. 电子技术—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139099 号

策划编辑: 田领红

责任编辑: 张燕虹 特约编辑: 叶皓彤

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 26.5 字数: 678 千字

印 次: 2007 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

由于电子技术课程是非电类专业的专业技术基础课,因此编写一本简练且有一定理论深度,又有应用实例的书很重要。本书的实例搭建了理论与应用的桥梁。本书的特点是:保证基础,适度深化,注重应用,强调集成。

为了适应电子技术的飞速发展,满足应用型人才培养的需求,使电子技术教材更具可读性、实用性、前瞻性,本书编排了 16 章。第 1 章介绍半导体二极管及基本电路,第 2 章介绍 BJT(双极结型三极管)及放大电路,第 3 章介绍场效应三极管及放大电路,第 4 章介绍集成运算放大器,第 5 章介绍负反馈放大电路,第 6 章介绍信号的运算与处理,第 7 章介绍直流稳压电源,第 8 章介绍现代电力电子技术,第 9 章介绍数制与编码,第 10 章介绍组合逻辑电路,第 11 章介绍时序逻辑电路,第 12 章介绍信号产生电路,第 13 章介绍存储器和可编程逻辑器件,第 14 章介绍模/数与数/模转换器,第 15 章介绍电子技术应用举例,第 16 章是 EDA 技术简介。

本书由戈素贞任主编,由杜群羊、崔国玮、钮王杰任副主编。第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章由戈素贞编写,第 4 章由崔国玮编写,第 7 章、第 15 章由杜群羊编写,第 8 章由乔晓利编写,第 9 章、第 10 章由陈丽敏编写,第 11 章、第 12 章和第 13 章由朱铭琳编写,第 14 章由钮王杰编写,第 16 章由吴海青编写。

由于时间仓促,加之作者能力有限,书中内容不妥之处,恳请读者不吝指出,以便于我们修正提高。

在此向本书引用和参考资料的编者表示深深的感谢,向对本书出版有过帮助的所有朋友表示衷心的感谢。

编 者

目 录

第 1 章 半导体二极管及基本电路	(1)
1.1 半导体的基本知识	(1)
1.1.1 半导体的共价键结构	(1)
1.1.2 杂质半导体	(3)
1.2 PN 结的形成及特性	(3)
1.2.1 PN 结的形成	(4)
1.2.2 PN 结的单向导电性	(5)
1.2.3 PN 结的反向击穿	(7)
1.2.4 PN 结的电容效应	(7)
1.3 半导体二极管	(8)
1.3.1 半导体二极管的结构	(8)
1.3.2 二极管的伏安特性	(9)
1.3.3 二极管的主要参数	(10)
1.3.4 半导体分立器件型号命名方法	(10)
1.4 二极管基本电路分析方法	(11)
1.4.1 二极管正向伏安特性的建模	(11)
1.4.2 模型分析法应用举例	(13)
1.5 特殊二极管	(15)
1.5.1 齐纳二极管(稳压管)	(15)
1.5.2 变容二极管	(17)
1.5.3 光电二极管	(17)
1.5.4 发光二极管	(17)
小结	(17)
习题	(18)
部分习题答案	(22)
第 2 章 BJT(双极结型三极管)及放大电路	(23)
2.1 BJT 的基本知识	(23)
2.1.1 BJT 的结构简介	(23)
2.1.2 BJT 的放大原理	(24)
2.1.3 BJT 的特性曲线	(27)
2.1.4 BJT 的主要参数	(29)
2.2 共射极基本放大电路	(30)
2.2.1 放大电路的分析方法	(30)
2.2.2 BJT 的小信号模型	(33)
2.2.3 共射极基本放大电路	(36)

2.3	分压式共射极放大电路	(41)
2.3.1	放大电路的静态工作点稳定问题	(41)
2.3.2	分压式共射极放大电路	(42)
2.4	三种基本组态放大电路的比较	(45)
2.5	多级放大电路和组合放大电路	(46)
2.5.1	BJT 多级放大电路	(46)
2.5.2	BJT 组合放大电路	(49)
2.6	放大电路的频率响应	(51)
	小结	(52)
	习题	(53)
	部分习题答案	(60)
第 3 章	场效应三极管及放大电路	(62)
3.1	半导体场效应管	(62)
3.1.1	N 沟道增强型 MOSFET	(62)
3.1.2	N 沟道耗尽型 MOSFET	(66)
3.1.3	P 沟道 MOSFET	(67)
3.2	FET 的主要参数	(68)
3.3	FET 放大电路分析	(69)
3.3.1	FET 的交流小信号线性化模型	(69)
3.3.2	FET 放大电路分析	(70)
3.4	FET 三极管的应用实例	(73)
	小结	(75)
	习题	(75)
	部分习题答案	(79)
第 4 章	集成运算放大器	(80)
4.1	集成运放的输入级	(81)
4.1.1	直接耦合放大电路的零点漂移现象及其产生的原因	(81)
4.1.2	差分放大电路	(81)
4.1.3	差分放大电路的动态分析	(83)
4.1.4	差分放大电路的输入/输出方式	(84)
4.2	集成运放的输出级	(88)
4.2.1	互补对称功率放大电路	(88)
4.2.2	甲乙类互补对称功率放大电路	(90)
4.2.3	采用复合管的准互补对称功率放大电路	(92)
4.3	集成运算放大器简介	(92)
4.3.1	集成运放的工作原理	(92)
4.3.2	集成运放的主要参数	(93)
	小结	(95)
	习题	(95)

部分习题答案	(97)
第5章 负反馈放大电路	(100)
5.1 反馈的类型与判别方法	(100)
5.1.1 反馈的概念	(100)
5.1.2 反馈的分类	(100)
5.2 负反馈放大电路的四种组态	(104)
5.3 深度负反馈放大电路的分析方法	(108)
5.3.1 负反馈放大电路增益的一般表达式	(108)
5.3.2 深度负反馈条件下的近似计算	(108)
小结	(111)
习题	(112)
部分习题答案	(115)
第6章 信号的运算与处理	(117)
6.1 运算电路	(117)
6.1.1 常用运算放大器简介	(117)
6.1.2 基本运算电路	(120)
6.2 信号处理电路	(127)
6.2.1 滤波器的概念与分类	(127)
6.2.2 一阶低通有源滤波器	(128)
6.2.3 二阶有源滤波器	(129)
6.3 电压比较器	(133)
6.3.1 单门限电压比较器	(134)
6.3.2 滞回比较器	(135)
6.3.3 窗口比较器	(136)
6.3.4 集成比较器	(136)
6.4 集成运放应用实例	(138)
6.5 集成运放应用中的实际问题	(141)
小结	(144)
习题	(144)
部分习题答案	(149)
第7章 直流稳压电源	(151)
7.1 单相整流电路	(151)
7.1.1 单相桥式整流电路	(151)
7.1.2 整流电路的主要参数	(152)
7.2 滤波电路	(153)
7.3 稳压电路	(154)
7.3.1 硅稳压管稳压电路	(154)
7.3.2 串联型直流稳压电路	(156)
7.3.3 三端集成稳压器及其应用	(157)

7.3.4 开关型稳压电路	(159)
小结	(162)
习题	(163)
部分习题答案	(165)
第8章 现代电力电子技术	(166)
8.1 电力电子器件	(166)
8.1.1 电力电子器件概述	(166)
8.1.2 晶闸管	(167)
8.1.3 典型全控型器件	(169)
8.1.4 主要电力电子器件的特性比较与应用	(172)
8.2 电力电子器件触发电路及驱动电路	(174)
8.2.1 电力电子器件触发电路	(174)
8.2.2 典型全控器件的驱动电路	(175)
8.3 电力电子器件的保护	(176)
8.3.1 过电压的产生及过电压保护	(176)
8.3.2 过电流保护	(177)
8.4 可控桥式整流电路	(178)
8.4.1 单相半波可控整流电路	(178)
8.4.2 单相桥式全控整流电路	(180)
8.5 调压、逆变和斩波技术	(181)
8.5.1 交流调压电路	(181)
8.5.2 逆变电路	(183)
8.5.3 斩波电路	(186)
小结	(187)
习题	(188)
部分习题答案	(188)
第9章 数制与编码	(189)
9.1 概述	(189)
9.1.1 数字信号和数字电路	(189)
9.1.2 数字电路的特点	(189)
9.1.3 数字电路的分类	(190)
9.2 数制	(190)
9.2.1 数制的种类	(190)
9.2.2 数制的转换	(192)
9.3 编码	(193)
9.3.1 二—十进制编码	(193)
9.3.2 可靠性编码	(194)
小结	(195)
习题	(195)

部分习题答案	(195)
第 10 章 组合逻辑电路	(197)
10.1 逻辑门电路	(197)
10.1.1 基本门电路	(197)
10.2 逻辑代数	(202)
10.2.1 逻辑函数	(202)
10.2.2 逻辑函数与逻辑图	(204)
10.3 组合逻辑电路分析与设计	(209)
10.3.1 组合逻辑电路的分析	(209)
10.3.2 组合逻辑电路的设计	(210)
10.4 常用组合逻辑功能器件与应用	(214)
10.4.1 编码器及其应用	(214)
10.4.2 译码器及其应用	(217)
10.4.3 加法器及其应用	(221)
10.4.4 比较器及其应用	(224)
10.4.5 数据选择器及其应用	(228)
10.4.6 数据分配器及其应用	(229)
10.4.7 用功能部件进行组合电路设计	(229)
小结	(231)
习题	(232)
部分习题答案	(234)
第 11 章 时序逻辑电路	(236)
11.1 触发器	(236)
11.1.1 常见触发器电路结构及工作原理	(236)
11.1.2 触发器逻辑功能的转换	(244)
11.2 时序逻辑电路的分析和设计	(246)
11.2.1 概述	(246)
11.2.2 时序逻辑电路的分析方法	(247)
11.2.3 寄存器	(250)
11.2.4 计数器	(252)
11.2.5 时序逻辑电路的设计	(264)
小结	(268)
习题	(268)
部分习题答案	(274)
第 12 章 信号产生电路	(277)
12.1 正弦信号产生电路	(277)
12.1.1 正弦波产生的条件	(277)
12.1.2 RC 正弦波振荡电路	(278)
12.1.3 LC 正弦波振荡电路	(281)

12.1.4	石英晶体振荡电路	(286)
12.2	非正弦信号产生电路	(289)
12.2.1	方波发生器	(289)
12.2.2	三角波发生器	(290)
12.2.3	锯齿波发生器	(292)
12.3	脉冲信号的产生与整形	(293)
12.3.1	555 定时器的结构和工作原理	(293)
12.3.2	单稳态触发器	(295)
12.3.3	多谐振荡器	(296)
12.3.4	施密特触发器	(298)
小结		(302)
习题		(303)
部分习题答案		(307)
第 13 章	存储器和可编程逻辑器件	(308)
13.1	只读存储器	(308)
13.1.1	掩膜只读存储器	(309)
13.1.2	可编程只读存储器 (PROM)	(311)
13.1.3	可擦除的可编程只读存储器	(312)
13.1.4	集成只读存储器	(314)
13.1.5	只读存储器的应用	(315)
13.2	随机存储器	(318)
13.2.1	静态随机存储器 (SRAM)	(318)
13.2.2	集成 RAM 简介	(321)
13.2.3	RAM/ROM 容量扩展	(322)
13.3	可编程逻辑器件 (PLD)	(324)
13.3.1	基本结构	(325)
13.3.2	表示方法	(325)
13.3.3	分类和特点	(326)
13.3.4	可编程逻辑阵列 PLA	(327)
13.3.5	可编程阵列逻辑 PAL	(330)
13.3.6	GAL 与 HDPLD 简介	(334)
小结		(336)
习题		(337)
部分习题答案		(338)
第 14 章	数/模与模/数转换器	(340)
14.1	D/A 转换器	(340)
14.1.1	权电阻网络 D/A 转换器	(341)
14.1.2	倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	(342)
14.1.3	集成 D/A 转换器	(343)

14.1.4 D/A 转换器的技术指标	(345)
14.2 A/D 转换器	(346)
14.2.1 A/D 转换的基本原理	(346)
14.2.2 直接 A/D 转换器	(349)
14.2.3 间接 A/D 转换器	(353)
14.2.4 典型集成 A/D 转换器	(355)
14.2.5 A/D 转换器的主要技术指标	(359)
小结	(359)
习题	(360)
部分习题答案	(362)
第 15 章 电子技术应用举例	(363)
15.1 函数发生器设计	(363)
15.1.1 函数发生器的组成	(363)
15.1.2 函数发生器设计举例	(366)
思考题	(367)
15.2 温度控制器设计	(367)
15.2.1 温度控制器组成与原理	(368)
15.2.2 水温控制器放大电路设计举例	(371)
思考题	(372)
15.3 数字时钟电路设计	(372)
15.3.1 数字时钟基本原理	(372)
15.3.2 数字时钟各功能电路的设计	(373)
15.3.3 数字时钟设计制作中的要点	(375)
小结	(376)
思考题	(376)
第 16 章 EDA 技术简介	(377)
16.1 Multisim	(377)
16.1.1 Multisim 的特点	(378)
16.1.2 启动	(378)
16.1.3 工作窗口	(378)
16.1.4 电路图的绘制	(383)
16.1.5 虚拟仪器的使用	(385)
16.1.6 仿真分析法	(390)
16.1.7 Multisim 应用实例	(396)
16.2 Quartus II	(401)
16.2.1 设计输入	(401)
16.2.2 设计项目编译	(407)
16.2.3 设计项目的仿真实验	(408)
16.2.4 器件编程	(410)
小结	(411)
思考题	(411)
参考文献	(412)

第 1 章 半导体二极管及基本电路

本章主要介绍半导体的基本知识，PN 结，半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线、主要参数，半导体二极管基本电路、分析方法以及应用实例。

1.1 半导体的基本知识

物体根据导电性分成导体、半导体、绝缘体，半导体的导电性介于导体与绝缘体之间。

1. 电子技术中常用的半导体材料

(1) 元素半导体：硅 (Si)、锗 (Ge) 等，其原子结构如图 1.1 所示，最外层的 4 个电子称为价电子，它决定物体的化学性质和导电性。

(2) 化合物半导体：砷化镓 (GaAs) 等。

(3) 可掺杂或制成其他化合物半导体的材料：硼 (B)、磷 (P)、铝 (Al) 等。

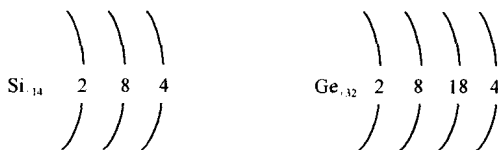


图 1.1 硅 (Si)、锗 (Ge) 的原子结构

2. 半导体材料的特点

(1) 受外界光和热的刺激，导电能力显著变化。

(2) 掺杂后，其导电能力也显著变化。

这些特点是由半导体的结构决定的，下面介绍半导体的结构。

1.1.1 半导体的共价键结构

在电子技术中使用的 Si、Ge 均是晶体形式，称为单晶硅和单晶锗，也称为本征半导体，它们是由自然界中固态的硅、锗经过一个复杂的提纯过程得到的。单晶硅、单晶锗的结构是正四面体，每个原子处于同等地位。图 1.2 是单晶硅的立体结构图，图 1.3 是单晶硅的平面示意图和共价键。

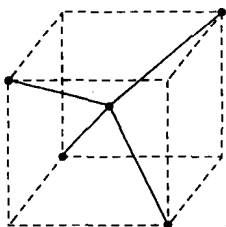


图 1.2 单晶硅的立体结构图

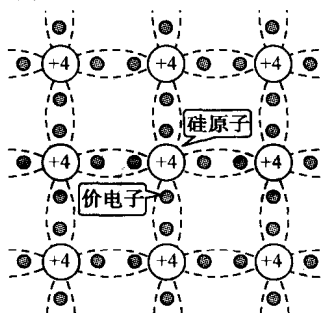


图 1.3 单晶硅的平面示意图和共价键

由于晶体内各原子处于同等地位且各原子之间靠得很近，相邻的原子相互影响，使原来分属于每个原子的价电子成为两个原子共有，形成共价键（如图 1.3 所示），共价键内的两个电子称为束缚电子。

共价键中的电子受两个原子核引力的约束，只有在激发时，少数电子获得一定的动能挣脱共价键的束缚成为自由电子。在原共价键中留下一个空位，称为空穴。在本征半导体中，自由电子与空穴是成对出现的，称为电子—空穴对。

当电子得到足够的能量挣脱共价键的束缚，成为自由电子的现象称为激发。

在自由电子和空穴的产生过程中，同时还存在自由电子和空穴的复合，自由电子在热运动过程中和空穴相遇，自由电子填补空穴称为复合，复合释放能量，电子—空穴对消失。

可以自由运动的带电粒子称为载流子，包括自由电子和空穴。自由电子带负电 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ，空穴带同样多的正电。空穴参与导电是半导体区别于导体的一个重要特点。

在一定温度下，本征激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到动态平衡。用 n_i 和 p_i 分别表示一定温度下本征半导体中自由电子和空穴的热平衡浓度，有

$$n_i = p_i \quad (1-1)$$

理论和实验均证明，它们与温度 T 的关系为

$$n_i(T) = p_i(T) = A \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1-2)$$

式中， T 是热力学温度； k 是玻耳兹曼常量 $1.383 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； A 是与半导体材料、载流子有效质量以及有效能级密度有关的常量。对于硅， $A = 3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ；对于锗， $A = 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ 。 E_g 表示 $T=0\text{K}$ 时破坏共价键所需的能量，又称禁带宽度，单位为 eV （电子伏特）。对于硅， $E_g = 1.21 \text{eV}$ ；对于锗， $E_g = 0.785 \text{eV}$ 。由式（1-2）可以得知，在一定温度下，半导体内有一定浓度的电子和空穴。在半导体两侧外加电压，自由电子做定向运动，空穴也做相对运动（以下直接称为空穴运动），当自由电子和空穴的浓度足够时，就会形成电流。

1. 半导体的特性之一

在半导体中，当温度 $T \uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变，但电流 $\uparrow$ ，即 $T \uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增加。利用该特性可制成半导体热敏元件，但该特性又造成半导体器件的温度稳定性差。

2. 半导体的特性之二

在半导体中, 当光照 $\uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变, 但电流 $\uparrow$, 即光照 $\uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增加。利用该特性可制成半导体光敏元件。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入微量元素作为杂质, 可使半导体的导电性发生显著变化, 这是半导体的另一个特性。掺入的杂质主要是三价或五价元素, 掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

1. N型半导体 (电子型半导体)

在本征半导体中掺入五价元素磷 P_{+15} 或砷 As_{+33} 、锑 Sb_{+51} , 掺杂后, 由于磷原子周围都是 Si 原子, 其外层的 4 个价电子形成共价键, 多余的一个价电子受核的引力比共价键的束缚弱得多, 所以较小的能量就使其挣脱磷原子的吸引成为自由电子——称为电离; 因为掺入一个磷原子, 给出了一个自由电子, 所以磷为施主杂质 (施主原子) (N 型杂质)。自由电子带负电 (Negative electricity), 英文首字母为 N, 称为 N 型半导体。在 N 型半导体中,

载流子	{	自由电子数	{	掺杂原子数	多子
				激发产生的自由电子	
		空穴数由激发产生		少子	

所以自由电子数远大于空穴数, 自由电子称为多数载流子 (多子), 空穴称为少数载流子 (少子)。

2. P型半导体 (空穴型半导体)

在半导体中掺入微量三价元素 (如 Al_{+13} 、 Ga_{+31}), 由于 Al 外层三个价电子与周围四个 Si 原子形成共价键时, 因缺少一个电子, 在晶体中便产生一个空位, 当相邻共价键上的电子获得足够的能量时, 有可能填补这个空位, 原来硅原子的共价键则因为缺少一个电子形成了空穴 (称为电离)。空穴带正电 (Positive electricity), 英文字母为 P, 故称为 P 型半导体。P 型半导体中,

载流子	{	空穴数	{	掺杂原子数	多子
				激发产生的空穴	
		自由电子数		由激发产生	

空穴为多子, 主要由掺杂形成, 自由电子为少子, 由热激发形成, 空穴很容易俘获电子, 使杂质原子成为负离子, 三价杂质因而也称为受主杂质, 用 Al 掺杂时, Al 为受主杂质。

1.2 PN 结的形成及特性

本节学习四个问题: PN 结的形成、PN 结的单向导电性、PN 结的反向击穿、PN 结的

电容效应。

1.2.1 PN 结的形成

1. PN 结的形成

N 型半导体中：

自由电子数量 $\gg$ 空穴数量
(多子) (少子)

P 型半导体中：

空穴浓度 $\gg$ 自由电子浓度
(多子) (少子)

但应强调：无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，半导体中的正负电荷数是相等的。因此呈现电中性（激发和复合是一个动态平衡）。

当 N 型半导体与 P 型半导体结合后，由于 N 型半导体电子浓度大，P 型半导体空穴浓度大，于是出现扩散（扩散是一种自然现象），电子和空穴都要从浓度较高的地方向浓度较低的地方扩散，如图 1.4 所示。P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。

当 N 区的电子越过界面，遇到的首先是界面附近的空穴。于是补充这个空穴即复合。

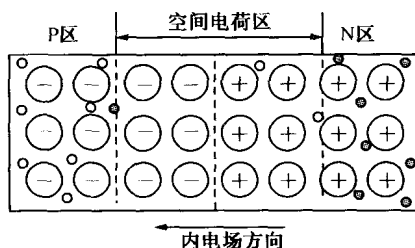


图 1.4 PN 结的形成分析

注：示意图中只画出了带电粒子，电子、空穴和离子，未画出原子。

当电子与界面附近的空穴复合后，则界面附近的载流子用尽了，于是 P 型半导体和 N 型半导体的界面处形成了只有不能移动的正、负杂质离子（空间电荷），这一区域称为空间电荷区。

因为在空间电荷区载流子被耗尽了，故称为耗尽层。又因耗尽层处于 P 型半导体和 N 型半导体的交界处（结合的位置），故称为 PN 结。

2. PN 结的作用

电子、空穴扩散，必经 PN 结，而 PN 结形成内电场（由于该电场是由半导体内载流子的扩散运动形成的，故称为内电场），内电场对多子的扩散起阻碍作用，如图 1.5 所示，所以，PN 结又称阻挡层。

内电场促使 P 区的少子电子向 N 区运动，N 区的少子空穴向 P 区运动，这种运动称为漂移。

总之，PN 结的作用是阻碍多子的扩散，促进少子的漂移。

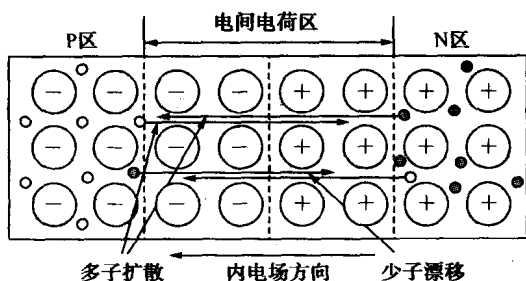


图 1.5 PN 结的作用

当 P 型半导体与 N 型半导体结合时，P 区空穴向 N 区扩散，N 区电子向 P 区扩散，并伴随着复合。一段时间后，当扩散和漂移达到动态平衡时，就形成了 PN 结，其厚度一定，且杂质掺杂越多，则空间电荷区越薄；反之，越厚。如果 P 区、N 区的掺杂浓度不一样，则界面两边的 PN 结的厚度也不一样。PN 结形成后，存在两个动态平衡：

- (1) 多子的扩散运动与少子的漂移运动形成的动态平衡。
- (2) P 区和 N 区内激发与复合也处于动态平衡，而且整个 P 区和 N 区呈现电中性。

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结外加正向电压（或正向偏置电压）

如图 1.6 所示，P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为 PN 结外加正向电压或 PN 结正向偏置。由于半导体本身的体电阻 $\ll$ PN 结上的电阻，外加的电压几乎全部降在 PN 结上，产生的外电场与内电场方向相反，即削弱内电场，多子的扩散能力增加，与部分空间电荷离子中和，使 PN 结变窄，打破了原来的动态平衡，使扩散电流 $i_{\text{扩}} \uparrow$ ，漂移电流 $i_{\text{漂}} \downarrow$ ，正向电流 $i_{\text{f}} = i_{\text{扩}} - i_{\text{漂}}$ ，由于可供漂移的少子 $\ll$ 可供扩散的多子， $i_{\text{扩}}$ 占主要地位， $i_{\text{漂}}$ 微不足道，故

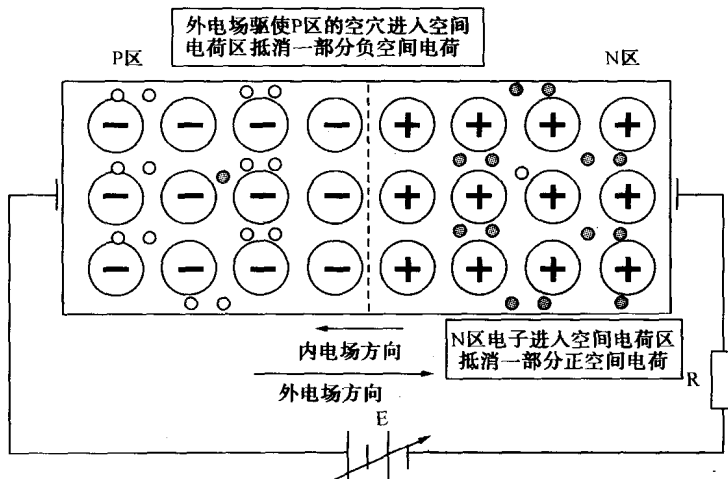


图 1.6 PN 结的单向导电性

$$i_{\text{f}} = i_{\text{扩}} - i_{\text{漂}} \approx i_{\text{扩}} \text{ (正向扩散电流)}$$

总之，PN 结外加正向电压时：

(1) 使 PN 结变窄, 使 $i_F > i_{\text{漂}}$, 从而外电路中形成的正向电流 $i_F \approx i_F$, 称为正向导通, 并且外加正向电压增加, i_F 增加。

(2) PN 结处于导通状态时, 由于空间电荷区载流子较多, 所以导通电阻很小。

2. PN 结外加反向电压 (PN 结反向偏置)

当 PN 结外加反向电压时, 外电场与内电场方向相同, 使 P 区和 N 区的多子进一步离开 PN 结, 使空间电荷区变宽, 使扩散能力下降, 即 i_F 趋于零, 使漂移能力增加, 而 $i_{\text{漂}}$ 的增加是微弱的 (由激发产生的少子的浓度极小), 但是整个效果仍然是以漂移为主, 反向电流 $i_R \approx i_{\text{漂}}$, 并且 i_R 随外加电压的增加, 基本不变且很小, 硅 nA (10^{-9}A), 锗 μA (10^{-6}A)——故用 I_s 表示, 称为反向饱和电流。

总之, PN 结反向偏置时:

(1) 外电场与内电场方向相同, 使 PN 结增厚, 使 i_F 趋于零, 反向电流 $i_R = I_s = i_{\text{漂}}$ 。

(2) PN 结反向电阻很大, 称为反向截止。

因为 $i_{\text{漂}}$ 的大小取决于少子的浓度, 而少子的浓度又取决于激发, 而激发又取决于温度, 所以, 当外加电压 = Const (常数), $T \uparrow \rightarrow I_s \uparrow$, 这一点值得注意。

3. PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性 (又称为 V-I 特性) 如图 1.7 所示。 U_{th} 为死区电压或门坎电压, 当 $u_D > U_{\text{th}}$ 时, 二极管中的电流迅速增加, U_{BR} 为反向击穿电压, 当外加电压小于 U_{BR} 时, 反向电流迅速增加。

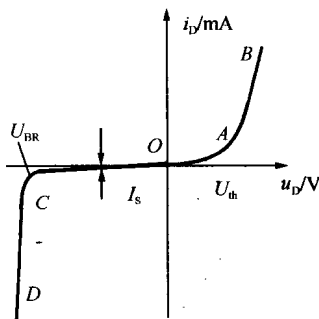


图 1.7 PN 结的伏安特性

PN 结正向伏安特性的表达式为:

$$i_D = I_s (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \quad (1-3)$$

式中, i_D 、 u_D ——流过 PN 结的电流和加在 PN 结两端的电压。

I_s ——反向饱和电流, 分立元件典型值: $10^{-14} \sim 10^{-8}\text{A}$ 。

U_T ——温度的电压当量, $U_T = kT/q$ 。 (1-4)

T ——热力学温度 (K)。

q ——电子电荷 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ 。

当 $T = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$ 时, 由式 (1-4) 得 $U_T = 26\text{mV}$ 。