



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课规划教材

Analog Electronic Technology
(Second Edition)

模拟电子技术基础 (第二版)

韩学军 王义军 主编

研究型



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课规划教材

模拟电子技术基础

(第二版)

主编 韩学军 王义军
编写 邢晓敏 张光烈 王 冰 解东光
主审 刘连光 陆 达 谢志远



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分为9章，涵盖了模拟电子技术的全部主要的基础知识内容。在内容编排上，力求做到入门容易、思路连贯、由浅入深、难点分散。本书由半导体基础知识讲起，逐渐过渡到电子元器件的构成，再从信号放大的基础知识，逐渐过渡到放大电路的组成原理；由分立元件基本放大电路逐渐过渡到集成放大电路；最后讲述了模拟电子电路所用的正弦波信号源和直流稳压电源。

本书可作为高等院校电气信息类及相关专业的教材，也可作为研究生考试的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/韩学军，王义军主编. —2版. —北京：中国电力出版社，2012.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3372-7

I. ①模… II. ①韩… ②王… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 180885 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年1月第一版

2013年2月第二版 2013年2月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 469千字

定价 35.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

电子技术的发展代表了现代化的进程。为了适应电子科学技术的高度、快速发展，使模拟电子技术的课堂教学与实践，更好地满足国家“十二五”发展计划要求。我们在第一版“模拟电子技术基础”的基础上，重新编写了该教材。

在编写过程中，仍然按课程教学大纲要求，保留了第一版主要内容的编排，遵循入门容易、思路连贯、由浅入深、难点分散的原则，对部分内容做了适当调整。将第一版的10章压缩为9章。在第7章运放应用内容中，增加了有源滤波电路。在第8章信号波形产生电路内容中，增加了非正弦波信号产生电路。作为附录内容，增加了在电子电路分析和设计中，如何使用Multisim9仿真软件EDA的内容。同时对部分非基础或陈旧的内容进行了删减，增减和修改了部分习题。

本书的重新编写仍力争做到加强基础、结合实际、突出重点、培养能力。每节都有复习要点，每章都有小结，以求在学习本教材时，能抓住重点，很好地理解难点。对各章配备的习题进行了认真的筛选，使习题更紧密地结合内容，通过练习加深对内容的理解。

全书由东北电力大学韩学军教授、王义军教授主编，邢晓敏副教授、王冰副教授、张光烈副教授、解东光副教授参加了各章的编写，李辉、李晓丽老师也参与了本书的编写工作。周军教授、刘晓峰高级实验师对本书内容如何与电子实验环节相结合提出了宝贵意见。张丽高级实验师担任了本书的文字及绘图工作。本书在编写中参考了一些相关文献，在此一并表示感谢。

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

模拟电子技术基础是高等院校电气信息类专业的重要专业基础课程。为了适应现代电子技术的发展，满足教学、科研和工程设计等方面的需求，编者在多年本科模拟电子技术教学基础上编写了本书。

本书立足于加强基础，结合实际、突出重点、培养能力，并以此为基础，做一些探索和改革。全书共分为10章，涵盖了模拟电子技术的全部主要的基础知识内容。在内容编排上，力求做到入门容易、思路连贯、由浅入深、难点分散。

本书由半导体基础知识讲起，逐渐过渡到电子元器件的构成，再从信号放大的基础知识，逐渐过渡到放大电路的组成原理；由分立元件基本放大电路逐渐过渡到集成放大电路；最后讲述了模拟电子电路所用的正弦波信号源和直流稳压电源。通过对本书的学习，将掌握电子技术的完整、系统的基础知识，为进一步学习现代电子专业技术打下坚实的基础。为便于课堂教学和学生课后复习，本书各章均由概述开始，到主要内容，再到小节、习题，并在本书最后附有部分习题解答。

全书由东北电力大学韩学军教授主编，第2、3、4、9章由韩学军教授编写，第1、8章由王冰副教授编写，第7、10章由张光烈副教授编写，第5章及前5章习题解答由邢晓敏老师编写，第6章及后5章习题解答由解东光老师编写。

全书由华北电力大学刘连光教授和厦门大学陆达教授主审，大纲由华北电力大学谢志远教授审阅。在本书的编写过程中得到了东北电力大学周军教授、王义军副教授、石磊老师、李辉老师、李晓丽老师、张丽老师及赵欣、王鸿昌同志的友情帮助。本书在编写过程中参考了一些文献。在此一并感谢。

符 号 说 明

一、电压、电流符号表示采用的基本原则（以 BJT 基极电流为例）

I_B : 大写字母、大写下标, 表示直流量

i_B : 小写字母、大写下标, 表示包含直流量的瞬时值

i_b : 小写字母、小写下标, 表示交流量或变化量的瞬时值

I_b : 大写字母、小写下标, 表示交流有效值

\dot{I}_b : 大写字母带上标点、小写下标, 表示交流复数值

ΔI_b : 电流变化量

二、下标符号

i: 输入量

o: 输出量

s: 信号源量

u: 与电压有关的量

i: 与电流有关的量

m: 最大值

L: 负载

th: 开启

on: 导通

REF: 参考量

BR: 反向击穿

P: 夹断

D: 二极管有关量

Z: 稳压管有关量

id: 差模输入量

ic: 共模输入量

f: 反馈量

三、半导体器件及参数

VD: 二极管

VT: 三极管

VDZ: 稳压二极管

β : BJT 电流放大系数

$r_{bb'}$: BJT 基区体电阻

r_e : BJT 发射结导通电阻

g_m : BJT 高频跨导、FET 跨导

f_T : BJT 特征频率

Q: 静态工作点

四、频率、功率和增益

f_L : 放大电路下限截止频率

f_H : 放大电路上限截止频率

f_0 : 振荡电路振荡频率

滤波电路特征频率

f_p : 有源滤波电路通带截止频率

BW: 通频带

P_{om} : 最大输出功率

A_{od} : 运放开环差模电压增益

\dot{A}_u : 放大电路电压增益

\dot{A}_{us} : 对信号源的电压增益

\dot{A}_i : 电流增益

\dot{A}_r : 互阻增益

\dot{A}_g : 互导增益

P_V : 直流电源供给功率	\dot{A}_f : 有反馈时的增益
P_{V_m} : 直流电源供给最大功率	\dot{A}_{uf} : 电压串联负反馈电压增益
P_T : BJT 管耗功率	\dot{A}_{if} : 电流并联负反馈电流增益
P_{T_m} : BJT 最大管耗功率	\dot{F} : 反馈系数通用符号
A : 增益通用符号	\dot{F}_v : 电压串联负反馈反馈系数
\dot{A}_{rf} : 电压并联负反馈互阻增益	\dot{F}_i : 电流并联负反馈反馈系数
\dot{A}_{gf} : 电流串联负反馈互导增益	\dot{F}_r : 电流串联负反馈反馈系数
A_{ud} : 差模电压增益	\dot{F}_g : 电压并联负反馈反馈系数
A_{uc} : 共模电压增益	

五、直流电源

V_{CC} : BJT 电路集电极回路电源
 V_{EE} : BJT 电路发射极回路电源
 V_{BB} : BJT 电路基极回路电源
 V_{DD} : FET 电路漏极回路电源
 V_{SS} : FET 电路源极回路电源
 V_{GG} : FET 电路栅极回路电源

六、英文缩写

A: Amplifier 放大器
BJT: Bipolar Junction Transistor 双极结型三极管
FET: Field Effect Transistor 场效应三极管
JFET: Junction Field Effect Transistor 结型场效应三极管
MOSFET: Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
金属-氧化物-半导体场效应三极管
OCL: Output Capacitorless Circuit 无输出电容功率放大电路
OTL: Output Transformerless Circuit 无输出变压器功率放大电路
LED: Light Emit Diode 发光二极管
PA: Pointer A 电流指示法
PV: Pointer Voltig 电压指示法
LPF: Low Pass Filter 低通滤波器
HPF: High Pass Filter 高通滤波器
BPF: Band Pass Filter 带通滤波器
BEF: Band Elimination Filter 带阻滤波器

目 录

前言

第一版前言

符号说明

第 1 章 半导体及双极型半导体器件	1
1.1 半导体基础	1
1.2 PN 结及其特性	4
1.3 半导体二极管	8
1.4 特殊用途半导体二极管	13
1.5 双极结型半导体三极管	16
1.6 光电三极管	23
本章小结	24
习题	25
第 2 章 单管放大电路	29
2.1 放大电路的基本概念	29
2.2 共射组态单管放大电路	35
2.3 共射放大电路的频率特性	49
2.4 静态工作点稳定共射放大电路	59
2.5 共基组态单管放大电路	66
2.6 共集组态单管放大电路	70
2.7 三种组态放大电路的性能比较	74
本章小结	75
习题	76
第 3 章 多管放大电路	84
3.1 采用电容耦合方式的多管放大电路	84
3.2 采用直接耦合方式的多管放大电路	89
3.3 差分式放大电路	93
3.4 乙类双电源互补对称电路	101
3.5 典型直接耦合放大电路分析	103
本章小结	104
习题	105

第 4 章 场效应三极管及其放大电路	109
4.1 结型场效应三极管 (JFET)	109
4.2 金属-氧化物-半导体场效应管 (MOSFET)	113
4.3 FET 小信号线性等效模型	116
4.4 FET 放大电路分析	119
本章小结	128
习题	128
第 5 章 集成运放及功率放大电路	132
5.1 集成运放的特点及电路构成	132
5.2 集成运放各部分电路分析	134
5.3 FET 集成运算放大器	140
5.4 理想集成运算放大器	142
5.5 功率放大电路	145
本章小结	152
习题	153
第 6 章 放大电路中的负反馈	156
6.1 反馈的基本概念与分类	156
6.2 负反馈放大电路的方框图及增益的一般表达式	159
6.3 深度负反馈放大电路增益的估算	163
6.4 负反馈对放大电路性能的影响	169
6.5 负反馈放大电路的稳定性	173
6.6 集成负反馈放大器	175
本章小结	178
习题	178
第 7 章 信号运算和有源滤波电路	184
7.1 运算放大器在线性运用时的基本特征	184
7.2 比例运算电路	185
7.3 加法电路	188
7.4 减法电路	190
7.5 积分和微分电路	192
7.6 指数和对数运算电路	196
7.7 乘法和除法运算电路	198
7.8 模拟乘法器及其应用	199
7.9 有源滤波电路	201
本章小结	211
习题	211

第 8 章 信号波形产生电路	217
8.1 正弦波振荡电路的构成和振荡条件	217
8.2 RC 正弦波振荡电路	219
8.3 LC 正弦波振荡电路	223
8.4 矩形波产生电路	229
8.5 三角波产生电路	232
本章小结	235
习题	235
第 9 章 直流稳压电源	239
9.1 直流稳压电源的组成	239
9.2 单相整流电路	239
9.3 滤波电路	246
9.4 稳压电路	248
9.5 集成电路三端稳压器及应用	254
本章小结	256
习题	256
附录 A Multisim9 仿真软件在模拟电子电路中的应用	260
A.1 Multisim9 简介	260
A.2 Multisim9 的分析仿真功能	265
A.3 Multisim9 应用举例	269
A.4 小结	277
部分习题解答	278
参考文献	297

第 1 章 半导体及双极型半导体器件

电子器件所使用的材料多数为半导体材料，因此电子器件又称为半导体器件，电子技术又称为半导体技术。本章将从介绍半导体材料的特性入手，学习和掌握最常用的半导体器件二极管、三极管的构成原理。

半导体分为本征半导体和杂质半导体。杂质半导体又分为电子型（N 型）半导体和空穴型（P 型）半导体。PN 结是由这两种类型的杂质半导体材料所构成的一种物理结构。PN 结具有单向导电特性，是构成电子器件（如半导体二极管、三极管以及集成电路）的基础。三极管内包含了两个 PN 结，通过 PN 结内两种载流子的运动，三极管成为一种电流—电流控制器件，从而可作为放大电路的基本元件。

1.1 半导体基础

1.1.1 物质材料的导电性能分析

物质材料根据其导电能力分为导体、绝缘体和半导体。导体的导电能力最强，其电阻率 $\rho < 10^4 \Omega/\text{m}$ ；绝缘体的导电能力最弱，其电阻率 $\rho > 10^9 \Omega/\text{m}$ ；而半导体的电阻率介于两者之间，因此其导电能力低于导体，高于绝缘体。

物质材料的导电性能由构成该物质的原子结构决定。在原子结构中，原子核最外层的电子称为价电子，价电子的数量是决定物质导电能力的关键。导体一般由低价元素构成，由于价电子数量少，受原子核束缚力小，在外电场作用下，可以脱离原子核束缚成为自由电子，自由电子定向移动，从而形成电流，这体现了其导电的性能。

而绝缘体一般由高价元素构成，由于价电子数量多，受原子核的束缚力很强，即使在外加电场的作用下，也很难脱离原子核成为自由电子。由于没有可移动的电子，不能形成电流，体现了其绝缘的性能。

而半导体材料通常是由四价元素构成的，其原子核的价电子数量多于导体，少于绝缘体，所以在外力的作用下，有一部分价电子能脱离原子核的束缚，成为自由电子，但其数量少，不能形成大电流，所以其导电能力小于导体，然而它又不是绝缘体，因此定义为半导体。在现代半导体器件制造中，使用最多的半导体材料有两类，一类称为单一元素半导体，如硅（Si）和锗（Ge）。另一类属于化合物半导体，如砷化镓（GaAs）。

1.1.2 半导体的内部原子结构

硅和锗的原子系数分别为 14 和 32，其原子结构如图 1-1（a）和图 1-1（b）所示，它们均属于四价元素。

为方便起见，在半导体特性分析时，一般采用其简化原子模型如图 1-1（c）所示。由于原子呈中性，四价元素原子核与内层电子形成的原子，用带圈的 +4 符号表示，在外层轨道上，分布有 4 个带负电的价电子。

半导体原子间的结合为共价键结构。在共价键结构中，相邻原子的价电子不但各自围绕

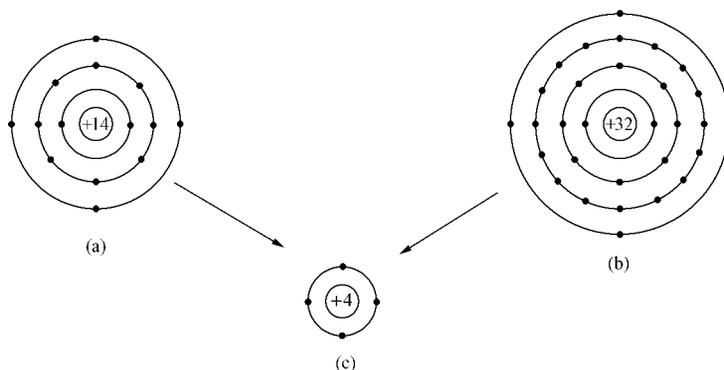


图 1-1 硅、锆原子结构及简化原子模型

(a) 硅原子；(b) 锆原子；(c) 硅、锆简化原子模型

自身的原子核运动，而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为相邻原子间的共有电子，靠一对共有价电子与两个原子核之间的吸引作用，把原子与原子束缚在一起，这种结合方式称为共价键。如共价键结合在一起的硅原子或锆原子的平面结构如图 1-2 (a) 所示。硅原子或锆原子按一定规则排列成整齐对称的点阵，这种结构称为晶格，因此，半导体又常称为晶体。

1.1.3 本征半导体及其导电性能

由纯净的四价元素组成的半导体，称为本征半导体，图 1-2 (a) 就是本征半导体的平面结构图。

在本征半导体中，相邻原子间的距离很小，共价键具有很强的结合力。由于每一个原子的价电子均被共价键束缚，在没有热激发的条件下，即在绝对温度 $T=0\text{K}$ 时，价电子不会脱离原子核束缚而形成自由电子。因此，本征半导体是不导电的。

在常温下，即绝对温度 $T=300\text{K}$ 时，由于半导体共价键内的电子并不像绝缘体束缚得那样紧，会有少数价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，如图 1-2 (b) 所示。

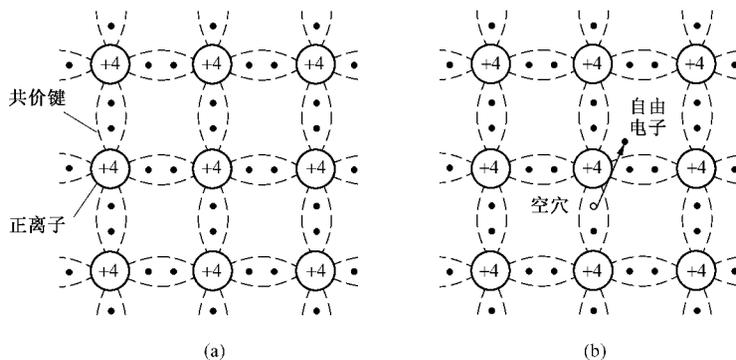


图 1-2 硅和锆的简化原子模型及其共价键结构图

(a) 平面结构；(b) 本征激发下的平面结构

这种常温下在本征半导体内出现自由电子的现象称为本征激发。通常把能运载电荷的粒子称为载流子，因此自由电子是带负电的载流子。

本征激发的结果不仅会产生自由电子，同时在共价键内出现了一个价电子的空位，这个空位叫做空穴。原子因为失去一个价电子而带正电，因此也可以把空穴看成是带正电的粒子。本征激发的结果是在本征半导体中产生电子空穴对。

空穴也可以看成是一种带正电的载流子，这是因为在半导体中如果有空穴存在，在外电场的作用下，价电子将按照电场的方向依次填补空穴，相对可以看成是空穴的定向移动形成了空穴电流，由于空穴带正电，因此空穴可以看成是带正电的载流子。这样在本征半导体中有两种载流子存在。由于出现了载流子，在外电场的作用下，载流子定向移动形成电流，本征半导体开始具有了导电能力。

在本征半导体中，受到热激发产生的电子和空穴成对数量很少，因此在常温下，本征半导体虽然导电，但导电能力很弱。当温度继续升高时，由于本征半导体内的载流子浓度将近似按指数规律升高，因此本征半导体对温度有较高的敏感性。这一特性使得半导体器件温度稳定性较差。但也同样可以利用这一特性制作半导体热敏器件。

1.1.4 杂质半导体及其导电性能

从1.1.3节看到，由纯四价元素构成的本征半导体，只有受到热激发，才产生少量的自由电子和空穴。由于载流子数量少，其导电能力很弱，且其导电性能只受环境温度变化的影响而不能进行有效控制。

要用半导体制造成半导体器件，一是要加强本征半导体的导电能力，二是要对其导电性能进行有效控制，为此设计产生了杂质半导体。所谓杂质半导体，就是在由纯四价元素构成的本征半导体中，掺入了少量的三价或五价元素，掺入三价元素的称为P型半导体，掺入五价元素的称为N型半导体。

1. N型半导体

通过扩散工艺，在纯四价元素构成的本征半导体中，掺入少量五价元素，如磷（P），就得到了杂质半导体，这种类型的杂质半导体称为N型半导体。在N型杂质半导体中，磷原子在某些位置取代硅原子，与周围原子组成共价键。在结合中多出了一个价电子，这个多余的价电子就留在了共价键之外，成为不受共价键控制的自由电子。所以即使在没有受到热激发，绝对温度 $T=0\text{K}$ 时，在杂质半导体中也出现了自由电子，如图1-3（a）所示。掺入的磷原子的数量决定了留在共价键外自由电子的数量。在常温下，N型杂质半导体中的自由电子包括掺入五价元素所形成的自由电子和受到热激发产生的自由电子，自由电子的数目大于空穴的数目，因此在N型半导体中，电子是多数载流子，简称多子，而空穴是少数载流子，简称少子。N型半导体导电以电子为主，所以N型半导体称为电子型半导体（N表示电子带负电）。

2. P型半导体

在本征半导体中加入少量三价元素，如硼（B）得到的杂质半导体称为P型半导体。在P型半导体中，硼原子在某些位置取代硅原子，与周围硅原子组成共价键，在结合中因为缺少一个价电子，在共价键里产生了一个空穴。所以即使在没有受到热激发，绝对温度 $T=0\text{K}$ 时，在杂质半导体中也出现了空穴，如图1-3（b）所示。这些空穴和本征激发产生的空穴加在一起，形成了P型半导体的多数载流子，而本征激发产生的电子是P型半导体中的少数载流子。P型半导体导电以空穴电流为主，所以P型半导体又称为空穴型半导体（P代表空穴带正电）。

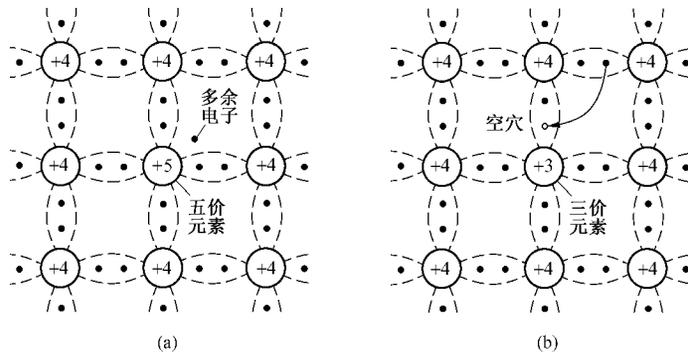


图 1-3 半导体晶体结构
(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

复习要点

- (1) 什么是本征半导体? 什么是杂质半导体? 什么是 N 型半导体? 什么是 P 型半导体?
- (2) 本征半导体在未受到热激发时是否导电? 为什么?
- (3) 本征半导体在室温下是否导电, 导电能力如何?
- (4) N 型半导体主要靠哪种载流子导电? P 型半导体主要靠哪种载流子导电?
- (5) 在 N 型半导体中, 哪种载流子是多子? 哪种载流子是少子?

1.2 PN 结及其特性

1.2.1 PN 结的形成

采用不同的掺杂工艺, 将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块基片上, 在两种半导体的交界面形成了一个特殊区域, 这个特殊的区域叫做 PN 结, 如图 1-4 (a) 所示, PN 结的形成是因为 P 型半导体 (P 区) 和 N 型半导体 (N 区) 存在电子和空穴的浓度差, 根据物理学原理, 浓度差的存在将引起运动。N 型区内电子是多子而空穴是少子, 即电子浓度很高, 而在 P 型区内则相反, 空穴是多子而电子是少子, 即空穴浓度很高。这样, 电子和空穴都要从浓度高的本区向浓度低的对方区域做运动, 从而使 N 区中靠近边缘的电子进入 P 区, 而 P 区中靠近边缘的空穴要进入 N 型区。这种由于浓度差而产生的载流子运动称为扩散运动。扩散运动的进程使进入对方区域的电子和空穴在交界面被复合。P 区一边因为失去空穴, 留下了不能移动带负电的离子; 同样, 在 N 区一边因为失去电子, 留下了不能移动带正电的离子。离子虽然也带电, 但由于不能移动, 因此并不参与导电。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷, 它们集中在 P 区和 N 区交界面附近, 形成了一个很薄的空间电荷区, 这个区域就称为 PN 结。在空间电荷区内, 多数载流子已扩散到对方并复合掉了, 或者说消耗尽了, 因此空间电荷区又称为耗尽区或耗尽层, 它有很高的电阻率。多数载流子浓度越高, 扩散运动越强, 则空间电荷区越宽。

在出现了空间电荷区以后, 由于正、负电荷之间的相互作用, 在空间电荷区中就形成了

一个电场 E_0 ，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 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 E_0 称为 PN 结内电场。内电场 E_0 随着扩散的进行不断加强。但同时，因为内电场 E_0 的方向与多数载流子扩散运动的方向相反，它对扩散运动是起阻碍作用的。内电场 E_0 的作用是将 P 区的少子电子送回 N 区，而将 N 区的少子空穴送回 P 区，这种在电场力的作用下，少数载流子的运动称为漂移运动。在 PN 结刚开始形成时，空间电荷区内离子数量少，内电场弱，扩散运动强于漂移运动。但随着扩散的进行，内电场不断加强，漂移运动也随之加强。当扩散运动搬运多子的能力与漂移运动搬运少子的能力相等（实质处于一种动态平衡状态）时，空间电荷区离子的数量将不再变化，从而空间电荷区的宽度也不再变化，形成了一个具有一定厚度的 PN 结，如图 1-4 (b) 所示。

在图 1-4 (b) 所示的 PN 结中，其 P 区和 N 区的杂质浓度相等，PN 结内的正、负离子的数量也相等，这样形成的 PN 结称为对称结，而当两边杂质浓度不同时，所形成的 PN 结称为不对称结，两种 PN 结有相同的外部特性。

1.2.2 PN 结的单向导电特性

为检测 PN 结的导电特性，需要给 PN 结外加电压。当 PN 结接入外加电压后，原来的平衡状态将被破坏。加到 PN 结两端的电压叫做偏置电压。当 PN 结 P 端电位高于 N 端电位时，称 PN 结为正向偏置；反之，当 PN 结 N 端电位高于 P 端电位时，称 PN 结为反向偏置。PN 结正向偏置和反向偏置有不同的导电特性。

1. PN 结的正向偏置特性

如图 1-5 所示，PN 结的正向偏置就是在 P 型半导体一侧接外加直流电源电压 V 的正极，而 N 型半导体一侧接 V 的负极。在正向偏置下，P 区的空穴，N 区的电子被推向空间电荷区，使空间电荷数量变少，PN 结变薄，PN 结内电场 E_0 被削弱，有利于多数载流子的通过，从而使扩散运动得到了加强。在外加电场的的作用下，N 区的多数载流子电子流入 P 区，P 区内的多数载流子空穴流入 N 区，它们的运动在外电路形成了电流，电流方向在半导体内是由 P 区流向 N 区。因为在外加电压的作用下，有电流流过，此时称 PN 结处于正向导通状态。PN 结正向导通时，由于 PN 结电阻率很低，其两端电压降很小，只有零点几伏，在电路分析时，有时可近似为零。

2. PN 结的反向偏置特性

与正向偏置相反，PN 结的反向偏置是在 P 型半导体一侧接外加直流电源电压 V 的负极，而 N 型半导体一侧接 V 的正极，如图 1-6 所示。

PN 结在反向偏置电压的作用下，使空间电荷的数量增加，加强了内电场，PN 结变厚，如图 1-6 所示。由于内电场得到了加强，载流子的移动以漂移运动为主，漂移运动在外电路产生了由 N 区流向 P 区的反向电流。漂移电流由少数载流子形成，由于少子的浓度很低，即使所有的少子都参与漂移运动，反向电流也很小，在电路分析时，常将它忽略不计。因

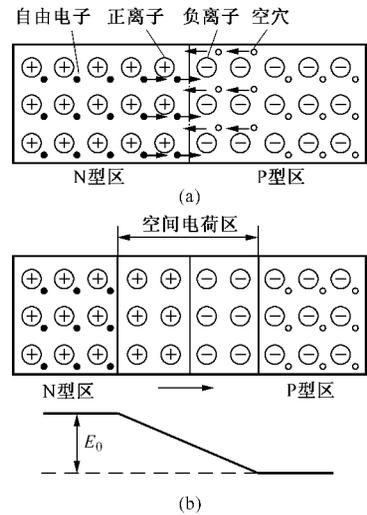


图 1-4 PN 结的形成
(a) 形成过程；(b) 形成 PN 结

此, 在反向偏置下, 可以认为 PN 结处于截止状态。

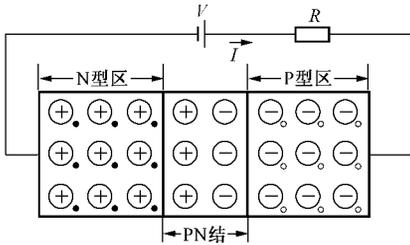


图 1-5 PN 结正向偏置

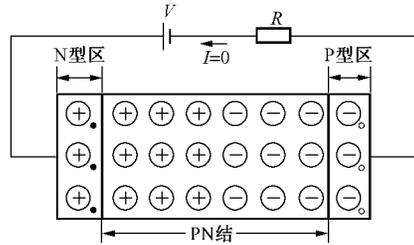


图 1-6 PN 结的反向偏置

由于 PN 结在正向偏置时, 处于导通状态, 而反向偏置时, 处于截止状态, 即电流只能从一个方向 (P 区流向 N 区) 流过 PN 结, 这个特性称为 PN 结的单向导电性。

1.2.3 PN 结的电流方程及伏安特性

1. PN 结的电流方程

由半导体理论分析可知, PN 结所加偏置电压 u 与流过它的电流 i 的关系, 可用公式表达为

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

式中: u 为 PN 结两端的外加电压; U_T 为温度的电压当量, 在常温 (绝对温度为 300K) 下, $U_T = 26\text{mV}$; I_S 为反向饱和电流, 其数值很小 (为 $10^{-8} \sim 10^{-2} \mu\text{A}$), 而且在温度一定时, 反向饱和电流是一个常数, 它不随外加电压的大小而变化。

对式 (1-1) 所示的 PN 结的电流方程可分析归纳如下:

(1) 当 PN 结两端加正向电压时, u 为正值, 当 $|u|$ 比 U_T 大几倍时, 电流方程中的指数项 e^{u/U_T} 远大于 1, 式 (1-1) 中 1 可以忽略不计, 这样流过 PN 结的电流 i 与其两端正向偏置电压 u 成指数关系。

(2) 当 PN 结两端加反向电压时, u 为负值, 当 $|u|$ 比 U_T 大几倍时, 电流方程中的指数项 e^{u/U_T} 趋近于零, 这样流过 PN 结的电流 $i = -I_S$ 。可见, 当温度不变化时, 在反向偏置电压的作用下, 流过 PN 结的电流是一个常数, 不随外加反向电压的变化而变化。这是因为当 PN 结外加反向电压时, 流过 PN 结的电流是由少数载流子所引起的漂移电流, 少数载流子的浓度在温度不变时是固定的。当温度发生改变时, I_S 会相应发生改变。

2. PN 结的伏安特性

将 1.2.2 节讨论的流过 PN 结的电流随其两端电压的变化用特性曲线来表示, 得到了

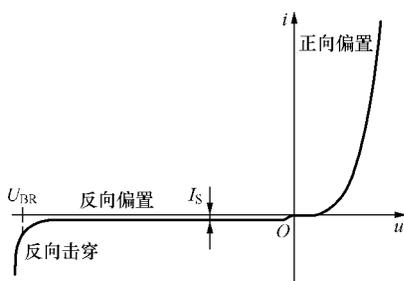


图 1-7 PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性, 如图 1-7 所示。

在坐标系的第一象限, 表达的是 PN 结的正向偏置伏安特性, 当 PN 结两端的电压大于零后, 流过 PN 结的电流 i 开始按近似指数规律随电压 u 的增加而增加。在坐标系的第三象限, 表达的是 PN 结的反向偏置伏安特性, 流过 PN 结的电流 i 基本不随反向电压的增加而变化, 是一个常数, 其大小等于反向饱和电流 I_S 。

在反向偏置伏安特性中,当反向偏置电压大于某一值 U_{BR} 后,流过 PN 结的反向电流急剧增加,此特性代表 PN 结的反向击穿特性, U_{BR} 称为 PN 结的反向击穿电压。 U_{BR} 的大小与 PN 结的制造参数有关。

PN 结的反向击穿特性是半导体物理的一个重要特性,其击穿原因分为两种不同情况,一种称为雪崩击穿,另外一种称为齐纳击穿。两种击穿的物理过程完全不同,但它们都属于电击穿,其击穿过程通常是可逆的。但是,电击穿往往伴随热击穿,如果反向电流和击穿电压的乘积超过了 PN 结容许的耗散功率,就会导致热量散发不出去而使 PN 结的温度上升,直到过热使其物理结构改变而烧毁。热击穿是不可逆的。

1.2.4 PN 结的电容效应

在一定条件下,PN 结存在电容效应,根据产生的不同原因,可分为两种不同的电容效应,分别称为扩散电容和势垒电容。

1. 势垒电容 C_b

PN 结是一个空间电荷区,当外加电压变化时,空间电荷区的宽度将随之改变,即空间电荷区内的电荷量随外加电压的变化而增加或减少,这种现象与电容器的充放电过程相同,此时,可以认为 PN 结存在一个等效电容。这种由空间电荷区宽窄变化所引起的等效电容称为 PN 结的势垒电容 C_b 。 C_b 具有非线性,当 PN 结正向偏置时, C_b 较小,而当 PN 结反向偏置时, C_b 随外加电压的变化有很大的变化。

2. 扩散电容 C_d

当 PN 结处于正向偏置时, P 区的空穴将向 N 区扩散,而 N 区的电子向 P 区扩散,造成了电子和空穴在 PN 结边缘处的积累。当外加正向电压一定时,在 P 区靠近 PN 结的界面电子的浓度高,而在 N 区靠近 PN 结的界面空穴的浓度高。当外加电压增加时,靠近界面的载流子浓度增加,反之,当外电压减小时,靠近界面的载流子浓度也减小,这种在界面附近电荷的积累和释放过程与电容器充放电过程相同,这种电容效应可认为 PN 结存在扩散电容 C_d 。在反向偏置时,由于越过 PN 结载流子的数量很少,因此所引起的扩散电容 C_d 很小。

3. 结电容

PN 结的结电容效应是扩散电容与势垒电容之和,即

$$C_j = C_b + C_d \quad (1-2)$$

结电容是一种电容效应,一般都很小,它和结面积有关,结面积小的, C_j 在 1pF 左右,结面积大的,在几十皮法至几百皮法。由于在 PN 结的等效电路中,PN 结电容是与 PN 结电阻并联,所以对低频信号,PN 结电容的影响很小,其作用可以忽略,只有在信号频率很高时,才考虑结电容的影响。



复习要点

- (1) PN 结是由不能移动的空间电荷组成的,当 PN 结变宽时其电阻率是增加还是减小?
- (2) PN 结正向偏置时,为什么能流过电流,反向偏置时,为什么不能流过电流?
- (3) 当 PN 结正向导通时,流过外电路的电流是由于载流子的扩散运动还是由于载流子的漂移运动所引起的?
- (4) 扩散运动和漂移运动哪一种是由浓度差所引起的,哪一种是由电场力引起的?