



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

(第二版)

赵世平 主编

王小海 杨世成 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

(第二版)

主 编 赵世平
编 写 郭亚军 向远红
主 审 王小海 杨世成



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书共分十章，主要内容包括半导体器件基础、基本放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大器、集成运算放大器的线性应用、集成放大器的非线性应用、放大电路中的负反馈、正弦波振荡电路、功率放大电路和直流电源。本书在选材和内容编排上力求体现该课程与工程实践的紧密联系，突出其工程技术属性。为了帮助读者加深对课堂教学内容的理解，每章后均附有小结和习题。

本书主要作为普通高等院校电气信息类专业教材，也可作为高职高专有关专业教材，同时还可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/赵世平主编. —2 版. —北京:
中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-8407-8

I. 模… II. 赵… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 015981 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 8 月第一版

2009 年 4 月第二版 2009 年 4 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 494 千字

定价 32.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

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

本书第一版为普通高等教育“十五”规划教材，于2004年8月出版。现第二版被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

根据几年来本书在教学实践中的应用情况和任课教师、学生的宝贵建议和意见，第二版在维持第一版教材内容及体系基本不变的基础上，对第一版教材进行了局部调整和完善，删减了部分冗余内容，以附录的形式增加了电子仿真软件 Electronic Workbench 的介绍和模拟电子电路虚拟实验练习，使之更适应各高校师生的教学需要。

本书由山西大学工程学院赵世平担任主编，并负责修改第一、二、三、七章和全书统稿，郭亚军老师修改第四、五、六、九章，向远红老师修改第八、十章，附录由赵世平编写。

本书由浙江大学王小海和北京科技大学杨世成担任主审，并中肯地提出许多建设性的意见，借此机会向两位老师表示衷心感谢。同时再版过程中得到许多人士和出版社编辑的关心与支持，也在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2008年12月



第一版前言

本书是根据普通高等教育“十五”规划教材的编写原则和编写要求来编写的。

模拟电子技术基础与数字电子技术基础是电力工程类专业重要的技术基础课,是研究各种模拟电子器件的特性、电路及其应用的学科。在编写过程中,编者注意总结多年来的教学实践经验,注重基本概念、基本分析方法和各种电路工作原理的阐述,遵循从实际出发,由浅入深,侧重物理概念的理解,从感性上升到理性等原则来组织内容,并力求能够反映电子技术的发展,联系工程实际,通过对各种半导体器件及其电路的分析来阐明电子技术中的基本原理和基本规律。为了加深对课堂教学内容的理解,每章后均附有小结,精选了一定数量的例题、思考题和习题。书中带*号的选修内容,使用者可以根据具体情况决定取舍。

本书共十章,第一章为半导体的基本知识,本书中涉及的分立半导体器件集中在本章介绍,同时对于目前应用广泛的稳压二极管、发光二极管、VMOS 功率场效应管也有介绍。第二章为基本放大电路,模拟电子技术中的许多基本概念、主要理论、基本分析方法是本章的主要内容。第三章是放大电路的频率响应,第四章介绍集成运算放大器的组成单元和运放实例。第五章和第六章按集成运算放大器的线性应用和非线性应用分别介绍了各种信号运算电路及处理电路。第七章是放大电路中的负反馈。第八章是正弦波振荡电路。第九章是功率放大电路。第十章是直流电源电路,除了介绍基本的整流、滤波电路和线性集成稳压电路外,还加入了已成为电源变换电路应用,主流的开关稳压电路的内容。考虑到集成电路的广泛应用,本书在第四章之后,电路形式基本上以集成电路组成的单元电路为主。

本书由山西大学工程学院赵世平主编,第一、二章由赵世平编写,第三、四、五、六、九章由郭亚军编写,第七、八章由向远红编写,第十章由向远红和赵世平共同完成。北京科技大学杨世成教授为本书的主审,屈文老师参与了审稿工作,他们对本书提出了详细的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

本书所用符号说明

一、基本符号

u 、 U 电压

i 、 I 电流

p 、 P 功率

η 效率

r 、 R 电阻

L 电感

C 电容

M 互感

X 电抗

Z 阻抗

g 电导

A 放大倍数

F 反馈系数

f 频率

t 时间

ω 角频率

K 绝对温度

T 温度、周期

T 变压器

Q 静态工作点

VD 二极管

VZ 稳压二极管

VT 三极管

G 石英晶体

二、电压、电流、电源电动势

$u(i)$ 小写下标 交流电压（电流）分量
瞬时值

$U(I)$ 大写下标 直流电压（电流）值

$u(i)$ 大写下标 含有直流的电压（电
流）总瞬时值

$U(I)$ 小写下标 正弦交流电压（电流）
有效值

$\dot{U}(\dot{I})$ 正弦交流电压（电流）相量

V_{BB} 基极电源电位

V_{CC} 集电极电源电位

V_{EE} 发射极电源电位

V_{GG} 栅极电源电位

V_{DD} 漏极电源电位

V_{SS} 源极电源电位

U_{BEQ} 基极—发射极的静态电压

$U_i(I_i)$ 输入电压（电流）

$U_o(I_o)$ 输出电压（电流）

$U_s(I_s)$ 信号源电压（电流）

$U_f(I_f)$ 反馈电压（电流）

$U_d(I_d)$ 净输入电压（电流）

$U_+(I_+)$ 集成运放同相输入端的电压
（电流）

$U_-(I_-)$ 集成运放反相输入端的电压
（电流）

$U_{O(AV)}$ 输出电压平均值

U_{om} 最大输出电压

U_{REF} 参考电压

U_T 温度的电压当量

I_{BQ} 基极静态电流

I_{REF} 基准电流

三、电阻

R 电路中外接电阻、电路的等效电阻

r 器件的等效电阻

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_o 输出电阻

R_{if} 有反馈时电路的输入电阻

R_{of} 有反馈时电路的输出电阻

四、放大倍数

$\dot{A}_u$ 电压放大倍数

$\dot{A}_{us}$ 源电压放大倍数

$\dot{A}_i$ 电流放大倍数

$\dot{A}_r$ 互阻放大倍数

$\dot{A}_g$ 互导放大倍数

$\dot{A}_f$ 闭环放大倍数

$\dot{A}_{uf}$ 闭环电压放大倍数

A_m 中频放大倍数

A_{um} 中频电压放大倍数

A_L 低频放大倍数

A_H 高频放大倍数

A_d 差模电压放大倍数

A_c 共模电压放大倍数

五、功率

P_{om} 最大输出功率

P_V 电源提供的功率

六、频率

f_L 下限频率

f_H 上限频率

f_{Lf} 有反馈时放大电路的下限频率

f_{Hf} 有反馈时放大电路的上限频率

BW 通频带

BW_f 有反馈时放大电路的通频带

f_0 谐振回路固有振荡频率

七、有关器件参数符号

1. 二极管

I_p 空穴电流

I_n 自由电子电流

I_R 反向电流

U_F 正向电压

U_{th} 门槛电压、死区电压

U_{BR} 反向击穿电压

i_D 二极管电流

u_D 二极管两端的外加电压

I_S 二极管的反向饱和电流

I_F 最大整流电流

U_R 最高反向工作电压

U_Z 稳压管稳定电压

I_Z 稳压管稳定电流

P_M 稳压管最大耗散功率

r_Z 稳压管动态电阻

2. 晶体三极管

b 基极

c 集电极

e 发射极

I_b 基极电流

I_c 集电极电流

I_e 发射极电流

U_{BE} 基极与发射极间电压

U_{CE} 集电极与发射极间电压

α 共基极交流电流放大系数

β 共发射极交流电流放大系数

$\bar{\alpha}$ 共基直流电流放大系数

$\bar{\beta}$ 共射直流电流放大系数

I_{CBO} 集电极—基极反向饱和电流

I_{CEO} 集电极—发射极反向饱和电流
(穿透电流)

I_{CM} 集电极最大允许电流

BV_{CEO} 基极开路时, 集电极与发射极之间的反向击穿电压

BV_{CER} b—e 之间接一电阻时的集电极和发射极之间的反向击穿电压

BV_{CES} 短接 b—e 时的集电极与发射极之间的反向击穿电压

P_{CM} 最大允许集电极耗散功率

$r_{bb'}$ 基区体电阻

$r_{b'e}$ 发射结动态电阻

r_{be} 三极管基极—发射极之间的等效电阻

f_β 共射截止频率

f_α 共基截止频率

f_T 特征频率

3. 场效应三极管 (FET)

g 栅极

d 漏极

s 源极

U_T 增强型 FET 开启电压

U_P 耗尽型 FET 夹断电压

I_D 漏极电流

U_{GS} 栅源电压
 U_{DS} 漏源电压
 I_{DSS} 漏极饱和电流
 BU_{DS} 最大漏源电压
 BU_{GS} 最大栅源电压
 R_{GS} JFET 直流输入电阻
 g_m 低频跨导 (互导)
 r_d FET 输出电阻
 r_{gs} 栅源之间输入电阻
 f_{ds} 漏极输出电阻
4. 集成运放
 A_{od} 开环差模电压增益
 K_{CMR} 共模抑制比
 R_{id} 差模输入电阻

U_{io} 输入失调电压
 A_{uio} 输入失调电压温漂
 I_{io} 输入失调电流
 A_{iio} 输入失调电流温漂
 I_{IB} 输入偏置电流
 U_{icm} 最大共模输入电压
 U_{idm} 最大差模输入电压
 BW_G 单位增益带宽
 S_R 转换速率
八、其他符号
 γ 非线性失真系数
 K 波耳兹曼常数
 q 一个电子的电荷量

目 录

前言

第一版前言

本书所用符号说明

第一章 半导体器件基础	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 半导体二极管	7
第三节 半导体三极管	17
第四节 场效应三极管	27
本章小结	41
习题	42
第二章 基本放大电路	47
第一节 放大电路基本概念	47
第二节 共发射极放大电路	52
第三节 放大电路的静态分析	54
第四节 放大电路的动态分析	56
第五节 微变等效电路分析法	63
第六节 静态工作点的稳定问题	70
第七节 共集电极电路和共基极电路	74
第八节 场效应管放大电路	79
第九节 多级放大电路	86
本章小结	92
习题	93
第三章 放大电路的频率响应	104
第一节 频率响应的基本概念	104
第二节 三极管的频率参数	108
第三节 放大电路的频率响应	112
本章小结	117
习题	118
第四章 集成运算放大器	120
第一节 概述	120
第二节 集成运放的基本组成及基本电路	121
第三节 集成运放的典型电路	136
第四节 集成运放的主要技术指标	140
第五节 理想集成运放	142
第六节 集成运放的发展概况	144
第七节 集成运放应用中的实际问题	145

本章小结	148
习题	149
第五章 集成运算放大器的线性应用	153
第一节 基本运算电路	153
第二节 积分与微分运算电路	161
第三节 对数与指数运算电路	163
第四节 乘法和除法运算电路	164
第五节 有源滤波电路	168
本章小结	174
习题	175
第六章 集成放大器的非线性应用	179
第一节 电压比较器	179
第二节 非正弦波发生电路	185
本章小结	190
习题	191
第七章 放大电路中的负反馈	195
第一节 反馈的基本概念	195
第二节 负反馈电路的一般表达式和组态	198
第三节 负反馈对放大电路性能的影响	212
第四节 闭环电压放大倍数的近似计算	219
第五节 负反馈放大电路的自激振荡	223
本章小结	227
习题	228
第八章 正弦波振荡电路	233
第一节 正弦波振荡电路的一般问题	233
第二节 RC 正弦波振荡电路	235
第三节 LC 正弦波振荡电路	241
第四节 石英晶体振荡电路	248
本章小结	251
习题	251
第九章 功率放大电路	257
第一节 功率放大电路的主要特点	257
第二节 功率放大电路的技术指标分析	258
第三节 实际的互补对称功率放大电路	262
第四节 集成功率放大电路	264
本章小结	266
习题	266
第十章 直流电源	269
第一节 单相整流与滤波电路	269
第二节 稳压电路	279
第三节 集成稳压器	286

第四节 开关稳压电源	289
本章小结	297
习题	298
附录 电路的仿真分析	302
参考文献	312

第一章 半导体器件基础

半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先介绍半导体的基本知识、组成半导体器件的核心——PN 结；然后介绍半导体二极管、双极型三极管和场效应三极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数；同时，对目前广泛使用的稳压二极管、发光二极管也做了简略介绍。

第一节 半导体的基本知识

一、半导体材料

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一大类物质的总称。在自然界的各种物质中，按导电能力可分为导体、绝缘体和半导体。衡量导电能力的一个指标是电阻率，导体的电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ，绝缘体的电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在两者之间的是半导体材料。常用的半导体材料有硅（Silicon，元素符号 Si）、锗（Germanium，元素符号 Ge）和化合物半导体如砷化镓（GaAs）等，硅是目前最常用的半导体材料。

半导体材料之所以有用，并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是它具有其他物质所没有的下列特性：①半导体材料的导电能力随温度的升高会迅速增强。以硅为例，当温度从 20°C 增加到 30°C 时，电阻率减小 1 倍，而导体或绝缘体即使温度增加到 100°C ，电阻率也不会有太大的变化。②半导体的导电能力在光线（包括各种射线）照射其表面或有电场、磁场作用时，会有显著的变化。③在半导体中掺入微量的其他元素（称为杂质），其导电能力也会显著增加。利用这些特点，人们才制造出了各种各样的半导体器件。显然，欲了解半导体器件，就先要了解半导体材料的导电机理。

半导体的导电能力取决于它的原子结构。以硅为例，硅的原子序数是 14，有 14 个核外电子围绕原子核旋转，其排布规律为 2、8、4，在最外层的 4 个电子称为价电子（四价元素）。由于物质的化学性质取决于价电子，所以在以后的讨论中采用其原子结构简化模型，将原子核和除最外层电子外的核外电子合并表示，带电量为 +4。如图 1-1 所示的简化模型。锗的原子序数是 32，核外电子排布为 2、8、18、4，显然也可以采用与硅相同的简化模型表示。

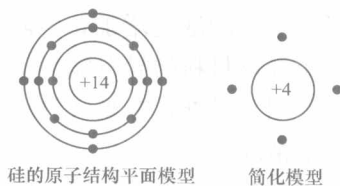


图 1-1 硅原子结构的表示

当大量的硅原子形成晶体结构时，相邻原子之间价电子共用，形成稳定结构。这种价电子共用所形成的化学结合力即为共价键。可以想象到，每一个硅原子周围都有 4 个硅原子由于共价键而紧密地结合起来，形成一个三维的空间立体结构。其平面示意图如图 1-2 所示。

在晶体中原子间距很小，相邻原子的价电子的运行轨道相互交叠，这就意味着此时围绕 A 原子核旋转的价电子，在下一个时刻会通过运行轨道的交叠区转移到 B 原子核附近运动，并以这种方式不断转移，从而可以在整个晶体中运动。这种价电子运动是在共价键内进

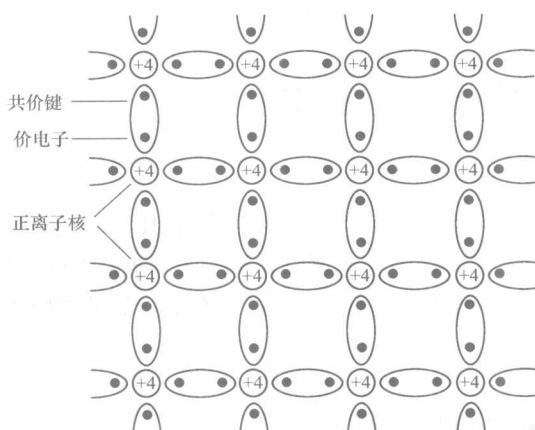


图 1-2 硅晶体的结构 (平面示意图)

成为正离子。如前所述, 相邻原子的价电子会很容易地转移过来填补这个空位使该原子重新变成电中性, 但相邻提供价电子的原子会变成正离子。如此推演下去, 可以发现这种空位在晶体中也是可以移动的, 且空位的移动伴随着正电荷 (正离子) 的转移。为讨论方便, 人们把空位和正电荷合二为一, 将空位看成是一种可以移动的, 带正电荷的载流子, 称其为空穴。

综上所述, 在本征半导体内有两种载流子: 自由电子和空穴——两者带电量相同而极性相反, 且均可移动。从其产生的过程来看, 自由电子和空穴是成对产生的, 每当价电子摆脱共价键的束缚成为自由电子, 就会形成相同数量的空穴。这个过程是由于热运动产生的, 称为热激发, 如图 1-3 所示。

当温度升高时, 载流子的热激发加剧, 自由电子和空穴的浓度增加, 电阻率减小。这就是为什么半导体材料的导电能力会随温度的升高而增大的原因。另外, 在光 (射) 线直接照射半导体表面和在磁场电场作用等环境下, 同样会出现类似情况。

伴随着热激发的进行, 自由电子和空穴在运动的过程中也会相遇, 自由电子重新变为价电子, 于是自由电子和空穴成对消失, 这一现象称为复合。在热激发中产生自由电子—空穴对是价电子获得能量摆脱共价键束缚的过程, 而复合则是自由电子释放出所获得的能量重新被共价键俘获的过程。

在某一温度下, 自由电子和空穴的浓度最终会稳定下来。这是因为热激发是产生自由电子—空穴对的过程, 只要有一定的温度, 就会有自由电子—空穴对源源不断地产生出来; 而随着自由电子和空穴数量的增多, 相遇复合的几率也相应上升, 最后达到动态平衡。此时由于热激发产生的自由电子—空穴对的数量正好等于因复合而消失的数目, 表现为在此温度下自由电子—空穴对的浓度宏观上不再变化, 称为此温度下的热平衡浓度 (由于本征热激发过

行的。

二、本征半导体

本征半导体是指纯净的、结构完整的半导体晶体。

在热力学温度零度 (即 $T=0\text{K}$, 约为 -273°C) 下, 所有价电子均被束缚在共价键内, 不能成为自由电子。所以此时的晶体表现得和绝缘体一样。

随着温度的上升, 价电子的热运动会因为获得能量而加剧。温度越高, 原先只能围绕原子核运动的价电子会最终摆脱共价键的束缚成为自由电子。同时在共价键内留下一个空位, 相关原子会因丢失一个核外电子而

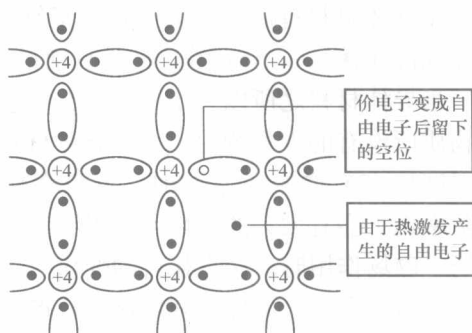


图 1-3 热激发 (自由电子—空穴对的产生)

程中自由电子和空穴是成对产生的,复合也是成对消失的过程,所以自由电子和空穴的热平衡浓度相等)。当把温度提高后,热激发产生的自由电子—空穴对的数量出现新的增长,带动复合数量的增加,最终达到新的动态平衡,在新的温度下形成新的热平衡浓度。

本征半导体中载流子热平衡浓度的高低取决于温度和价电子摆脱共价键所需的能量,而锗材料中价电子摆脱共价键的束缚成为自由电子所需要的能量为 0.68eV (eV ——电子伏特),硅为 1.12eV 。这就是在相同温度条件下,锗硅两种材料制作的半导体器件电气特性不同的原因。

在半导体中,自由电子带负电荷、空穴带正电荷,都是可以移动的带电粒子,它们所做的定向运动将形成电流,故称其为载流子。

既然半导体中有两种载流子(导体中只有自由电子一种),则半导体的导电机理显然与导体不同:在外加电场的作用下,带正电荷的空穴和带负电荷的自由电子的运动方向相反。如果用 I_p 表示空穴移动形成的电流,用 I_n 表示自由电子移动形成的电流,则总电流为两种载流子电流之和,即 $I = I_n + I_p$,如图 1-4 所示。

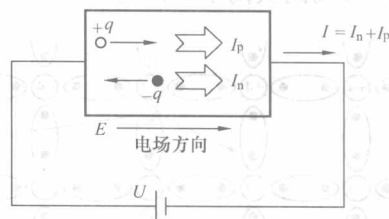


图 1-4 半导体的导电机理
→ 载流子运动方向;
◇ 电流方向

三、杂质半导体

在本征半导体中通过掺入微量其他元素,可以改变半导体的导电能力。根据掺入的是五价或三价元素,可以得到 N 型和 P 型两种类型的杂质半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价元素磷(或砷、锑),浓度为万分之一到百分之一,这就意味着一个磷原子周围有上百个硅原子。由于掺入的杂质比例很小,不会破坏原来的晶体结构。当磷原子取代晶体中的硅原子时,五个价电子中有四个与相邻的硅原子组成共价键,还有一个价电子仅受磷原子核的吸引,这种引力比共价键的化学结合力小得多,在室温下即可摆脱磷原子核的吸引变成自由电子,磷原子因丢失一个价电子而带正电,电离成不能移动的正离子。由于掺入的磷原子可提供自由电子,所以掺入的五价元素又称为施主元素,电离后出现的正离子称为施主离子,如图 1-5 所示。

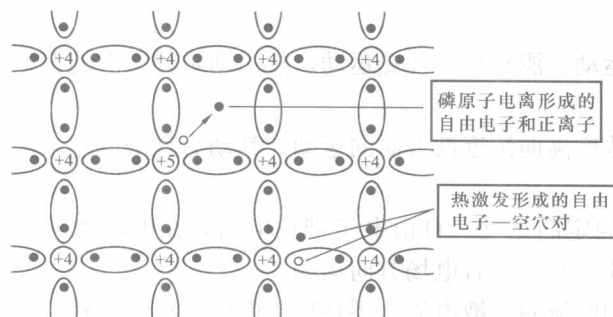


图 1-5 N 型半导体室温下掺入的每个磷原子均提供一个自由电子

由于每立方厘米硅原子的数量极大(数量级为 $10^{22}/\text{cm}^3$),按万分之一的浓度掺杂,每立方厘米中磷原子提供的自由电子数也将达到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 这样一个数量级。而室温下由本征热激发产生的自由电子和空穴浓度只有约 $10^{10}/\text{cm}^3$ 。上述数据表明,在本征半导体中按万分之一掺杂可使导电能力提高 10^8 倍。

同时考虑到热激发所产生的的自由电子—空穴对将使晶体中存有微量空

穴, 所以可知这种半导体中自由电子占多数, 称之为多数载流子, 简称多子; 空穴数量少, 称为少数载流子, 简称少子。由于这种特征, 该杂质半导体称为电子型半导体或 N 型半导体^①。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入微量三价元素硼 (或铟和铝), 硼原子在嵌入硅晶体中的时候, 只能提供三个价电子和相邻的四个硅原子中的三个组成共价键, 这就形成了一个空位, 而在其他硅原子附近运动的价电子可以很容易地过来填补这一空位。硼原子因多了一个价电子成为不能移动的负离子, 同时在提供价电子处出现一个空穴。

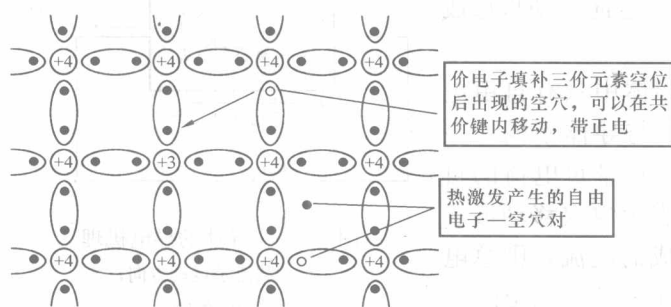


图 1-6 P 型半导体

在室温下, 掺入的硼原子均可提供一个空穴, 自己电离成负离子。同时半导体中原有热激发产生的微量自由电子—空穴对将使该半导体中有少量自由电子。因为掺入的三价元素会接受电子, 故称三价元素为受主元素, 电离后的负离子称为受主离子, 如图 1-6 所示。

在这种半导体中, 空穴是多数载流子, 自由电子是少数载流子,

导电时将以空穴电流为主, 故将其称为空穴型半导体或 P 型半导体。

在杂质半导体中多数载流子主要是由掺入的杂质元素提供的, 所以通过控制掺杂浓度, 即可改变半导体的导电能力。

在电中性的本征半导体中掺入电中性的杂质元素是不会使整个晶体带电的, 所以杂质半导体也应是电中性的。这一点可以从下面等式看出:

对 N 型半导体有:

$$\text{自由电子数} = \text{空穴数} + \text{正离子数}$$

对 P 型半导体有:

$$\text{空穴数} = \text{自由电子数} + \text{负离子数}$$

四、PN 结及单向导电性

1. 载流子的运动方式

载流子在晶体内的运动方式有扩散运动、漂移运动和热运动。热运动是物质中的普遍现象, 不在这里讨论。

扩散运动是由于浓度差, 载流子由浓度高向浓度低方向的运动。其动力是浓度差, 浓度差越大, 则扩散进行得越剧烈。

漂移运动是载流子在电场作用下做的定向运动。自由电子带负电荷, 在电场力的作用下, 它逆着电场方向运动; 空穴带正电荷, 它将顺着电场方向运动。

在后面的内容中因载流子扩散形成的电流叫扩散电流, 漂移形成的电流称为漂移电流。

^① N 型半导体的命名来自于 Negative, 因为自由电子带负电。同理, P 型半导体则因空穴带正电, 故用 P (Positive) 表示。

2. PN 结的形成

在一块半导体中一边做成 P 型，另一边做成 N 型，则在 P 区和 N 区的交界处将形成 PN 结。

由于界面存在着自由电子和空穴的浓度差，因此 P 区的空穴将向 N 区扩散，N 区的自由电子要向 P 区扩散。随着这种扩散运动的进行，P 区靠近边界处的区域只剩下带负电的硼离子，形成一个带负电荷的区域。N 区靠近边界处的区域只剩下带正电的磷离子，形成一个带正电荷的区域。由于硼离子和磷离子都固定在晶体结构中不能移动，所以在 PN 交界面处形成的正负电荷区称为空间电荷区。空间电荷区中的电荷会形成一个由 N 区指向 P 区的电场，这个电场是由于载流子的扩散运动在半导体内部形成的，并不是由外加电压产生的，故称为内建电场，如图 1-7 所示。空间电荷区中正负电荷的数量会随载流子的扩散逐渐增多，所以内建电场会由小到大逐渐增强。而内建电场的出现，将对载流子的运动产生两方面的影响：

1) 阻碍两边多子的扩散。N 区的自由电子和 P 区的空穴在扩散穿越空间电荷区时，要克服电场力做功，这就使得能扩散到对方的多数载流子的数量减少。

2) 有利于两边少数载流子的漂移。内建电场对于两边区域的多数载流子的扩散运动是一个阻力场（或减速场），而对于两边区域的少数载流子却是一个加速场。少数载流子只要因热运动进入内建电场的势力范围，就会在电场力的作用下加速漂移到达对方。

随着内建电场逐渐增强，两边多子的扩散越来越困难，少子的漂移则有所增强。最终这两种运动会达到一种动态平衡，即有多少自由电子扩散到 P 区，就同时有同等数量的自由电子漂移回来；空穴亦然。达到动态平衡后，PN 结空间电荷区的电荷数量不再变化，PN 结的宽度稳定了下来，PN 结也就形成了。

因为 PN 结空间电荷区中能够移动的带电粒子（自由电子和空穴）都扩散到对方区域复合掉了（载流子都消耗尽了），所以 PN 结也叫耗尽区。

3. PN 结的单向导电性

PN 结的特点是具有单向导电性，在外加电压的作用下，PN 结只允许通过单向电流。

(1) 外加正向电压，PN 结导通。在图 1-8 中，将外加电压 U_F 的正端接 P 区，负端接 N 区， U_F 所产生的外加电场与内建电场方向相反。这样的接法称为正向连接，PN 结处于正偏状态。此时 PN 结两端的电压降称为正向偏置电压，这个电压降分为三部分：P 区上的压降、PN 结上的压降和 N 区上的压降。其中由于 P 半导体和 N 半导体的体电阻小，外

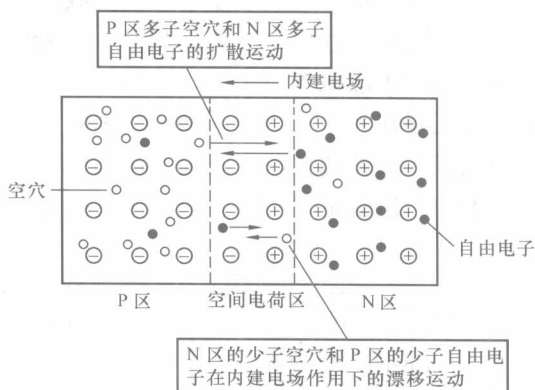


图 1-7 PN 结的形成

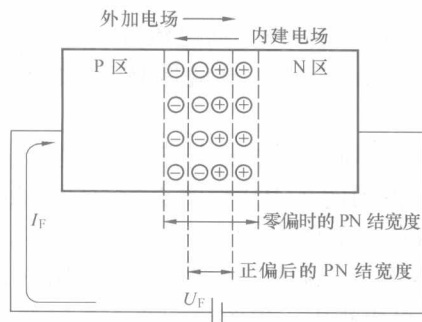


图 1-8 正偏时的 PN 结

加电压在这两个区域上的压降很小, 而 PN 结内载流子都消耗尽了, 是一个高阻区, 所以外加电压大部分降落在 PN 结上。在外加电场的作用下, P 区的多子空穴向右移动, 进入空间电荷区与硼离子中和, N 区多子自由电子向左移动, 抵消空间电荷区的部分磷离子, 空间电荷区中的正负电荷量减少, PN 结将变窄。同时外加电场与内建电场的方向相反, 削弱了空间电荷区的电场。这就减小了对多数载流子扩散的阻碍作用, 因此两边多数载流子能够越过 PN 结扩散进入对方的数量大大增加。这时扩散运动大于漂移运动, PN 结内的电流便由起主导作用的扩散电流所决定, 在外电路形成一个流入 P 区的电流, 称为正向电流 I_F 。此时的正向压降在 0.6~0.8V (硅管) 之间, 正向电流是由多数载流子扩散形成的, 是一个比较大的电流。当外加正向电压稍有增大时, PN 结内电场将进一步被削弱, 正向电流还将随之显著增加。这就是 PN 结的正向导通状态。

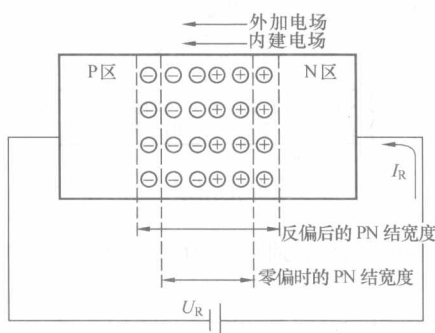


图 1-9 反偏时的 PN 结

(2) 外加反向电压, PN 结截止。在图 1-9 中, 将外加电压 U_R 的负端接 P 区, 正端接 N 区, U_R 产生的外加电场与内建电场方向相同。这样的接法称为反向连接, PN 结处于反偏状态。此时 PN 结两端的压降称为反向偏置电压, 外加电场与内建电场方向相同, 使得 PN 结内的总电场大大加强, P 区的空穴和 N 区的自由电子将离开 PN 结, PN 结将变宽。外加电场与内建电场叠加在一起, 一方面将使 P 区和 N 区多数载流子的扩散变得极为困难, 因此多子的扩散电流趋近于零; 另一方面更有利于 P 区和 N 区的少数载流子的漂移运动。在这种情况下, PN 结

中的电流就是少子的漂移电流, 宏观表现为外电路出现一个流入 N 区的反向电流 I_R 。这个电流是由少数载流子作漂移运动形成的, 而少数载流子的浓度很小, 故 I_R 很小, 一般为微安数量级以下。而且 I_R 与反向电压的大小关系不大, 表现为当反向电压增大时, I_R 基本上保持恒定。所以又将 I_R 叫做反向饱和电流。

半导体中少数载流子是由热激发产生的, 当温度增加时, 少数载流子的数量增多, I_R 会随之增大。通过实验得知, 温度升高 12℃, 硅材料 PN 结的 I_R 增加近 1 倍, 温度每升高 8℃, 锗材料 PN 结的 I_R 增加近 1 倍。工程上估算时常统一认为温度每升高 10℃时增加一倍, 即

$$I_{R(T_2)} = I_{R(T_1)} \times 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}} \quad (1-1)$$

正向连接时, PN 结的正向压降小, 通过的正向电流大; 反向连接时, PN 结两端的反向电压约等于外加电压, 通过的反向电流极小, 在一般情况下, 可按反向电流等于零处理。所以, PN 结具有只允许正向电流通过, 不允许反向电流通过的特性, 这就是 PN 结的单向导电性。

如果用 PN 结两端的电压除以通过 PN 结的电流, 得到的是 PN 结的直流等效电阻。用 PN 结两端的电压变化量除以通过 PN 结的电流变化量, 得到的是 PN 结的交流等效电阻。正偏时, PN 结两端压降在 0.6~0.8V 之间, 正向电流可在几十毫安或以上, 而且在正常工作情况下, 正向压降稍有变化, 就会引起正向电流较大的变化, 说明 PN 结的正向电阻 (直流电阻和交流等效电阻) 小。反偏时, PN 结两端的压降可以很大, 电流却很小, 当反偏电压有较大变化时, 反向电流基本上不随之而变, 表明 PN 结的反向电阻很大。