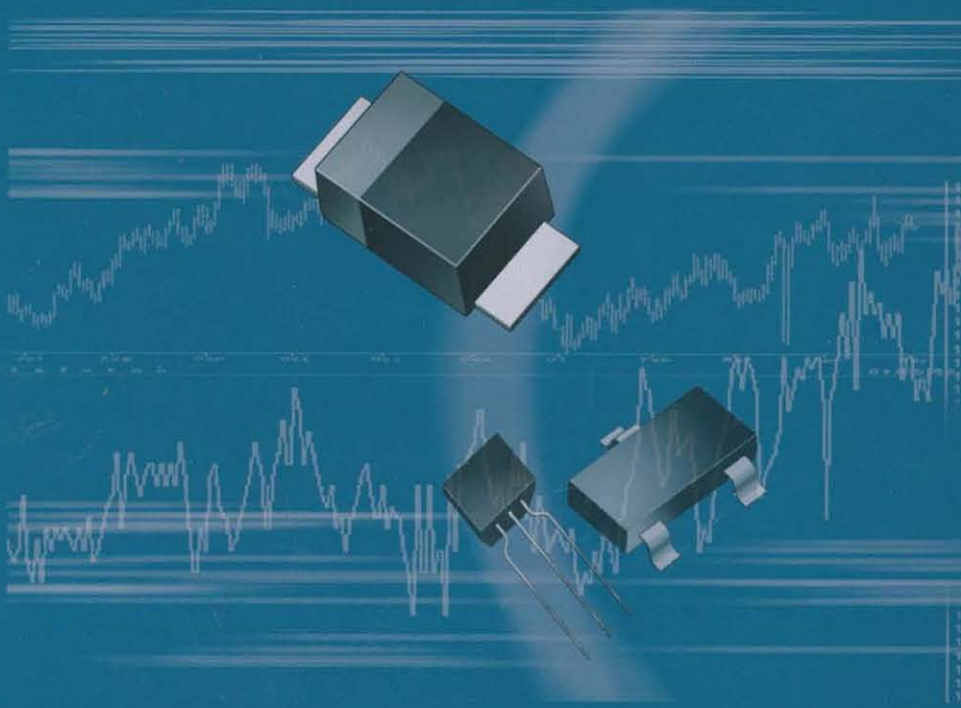
高职高专电子信息类项目驱动系列教材

模拟电子技术项目驱动教程

宋燕飞　孔繁庭　苑　毅　编著



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

模拟电子技术项目驱动教程/宋燕飞,孔繁庭,苑毅编著. —兰州: 兰州大学出版社,2010. 4

ISBN 978-7-311-03555-6

Ⅰ. ①模… Ⅱ. ①宋… ②孔… ③苑… 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(2010) 第 070485 号

策划编辑 陈红升
责任编辑 郝可伟 陈红升
封面设计 管军伟

书 名 模拟电子技术项目驱动教程
作 者 宋燕飞 孔繁庭 苑 毅 编著
出版发行 兰州大学出版社 (地址: 兰州市天水南路 222 号 730000)
电 话 0931 -8912613(总编办公室) 0931 -8617156(营销中心)
0931 -8914298(读者服务部)
网 址 http: //www. onbook. com. cn
电子信箱 press@onbook. com. cn
印 刷 兰州人民印刷厂
开 本 787 ×1092 1/16
印 张 16. 5
字 数 388 千
版 次 2010 年 4 月第 1 版
印 次 2010 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-311-03555-6
定 价 28. 00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前　言

“模拟电子技术项目驱动教程”是高职高专电子信息类专业的一门重要的基础能力课程。“模拟电子技术项目驱动教程”针对“以能力为本位，以职业实践为主线，以项目课程为主体的模块化专业课程”教学改革思路，结合“模拟电子技术基础”课程的特点，以“项目驱动式”教学模式，按项目引导、任务驱动，并结合实训设计的课程教学方法，把曾经系统、繁琐、难以理解的模拟电子技术理论知识通过一个个实践项目分解开来，使学生易于了解与掌握。通过本课程的学习，学生可以具备本专业高等技术应用型人才所必需的半导体器件、三极管放大电路、场效应管放大电路、集成运算放大器、功率放大器、直流稳压电源、晶闸管等有关知识，并掌握常用仪器仪表的使用、元器件与放大电路的测试、电路的设计、电路的制作与调试等技能。

“模拟电子技术项目驱动教程”包含 5 个主项目，分别是：直流稳压电源的制作、音频功率放大器的制作、简易正弦波发生器的制作、倒车报警电路的制作、调光控制器的制作等，在每一项目中均附有对应的实训任务，突出了项目教学的实践能力掌握。在每个主项目的内容中，先简单，后复杂；先测试，后设计；先单元电路，后总体电路；先子任务，后主任务。一般最后一个子任务完成最终的项目任务，而前面的子任务则为最终的项目任务作铺垫。在每个任务完成的过程中嵌入了知识（理论知识和实践知识）的学习，做到“读、做、想、学”等方面环环紧扣，师生互动，以期达到最佳的教学效果。

本教材适合于高职高专院校的应用电子技术专业、电子信息工程专业、通信专业等的电子技术课程，使用学时为 90～100 学时。也可以作为电子技术课的参考教材。对于电大、函大、夜大的同类课程，亦不失为一本合适的教材或教学参考书。

本书由甘肃联合大学宋燕飞、孔繁庭、苑毅老师担任主编。其中宋燕飞编写了项目二和项目三，孔繁庭编写了项目四和项目五，苑毅编写了项目一。全书由孔繁庭统稿。

在本书编写过程中得到了甘肃联合大学领导的大力支持。同时，对编者参考的有关文献的作者，在此一并表示深深的敬意和感谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，殷切希望使用本教材的师生和其他读者给予批评指正。

编　者

2010 年 3 月于兰州

本书常用符号说明

A　电流的单位
A　放大倍数、增益
A_f　反馈放大倍数、增益
A_{uo}　开环放大倍数、增益
A_u　带载放大倍数、增益
A_{uc}　共模放大倍数、增益
A_{ud}　差模放大倍数、增益
A_{uf}　闭环放大倍数、增益
A_{um}　中频区放大倍数、增益
A_{us}　带内阻放大倍数、增益
BW　通频带
b　三极管的基极
C　电容
C_B　势垒电容
C_b　耦合电容
C_D　扩散电容
C_e　发射极旁路电容
C_f　反馈电容
C_i　输入电容
C_j　结电容
C_L　负载电容
C_o　输出电容
c　三极管的集电极
D　二极管
D_Z　稳压二极管
d　场效应管的漏极
e　三极管的发射极
F　反馈系数
F_u　电压反馈系数
f　频率
f_H　上限频率
f_L　下限频率
f_0　中心频率
G　电导
g　微变电导
g　场效应管的栅极
g_m　跨导
I　电流
I_C　集电极静态电流
I_c　集电极动态电流
I_D　二极管静态电流
I_i　输入电流
I_L　负载电流
I_o　输出电流
I_S　源电流
i_c　集电极电流
i_f　反馈电流
K　温度单位
K_{CMR}　共模抑制比
L　电感
M　互感
P　功率
Q　静态工作点
q　电子
R　电阻
R_b、R_c、R_e　三极管电阻
R_f　反馈电阻
R_L　负载电阻
R_i　输入电阻
R_o　输出电阻
R_P　电位器
r_{be}　三极管输入电阻
S　开关
s　场效应管源极
T　温度
t　时间
U　电压
U_D　二极管导通压降

U_i　输入电压
U_o　输出电压
u_{ic}　共模电压
u_{id}　差模电压
U_Z　稳压管稳定电压
u_f　反馈电压
V_{CC}　集电极电源
Y　导纳
Z　阻抗

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

目　录

项目一　直流稳压电源的制作 …… 1

任务一　认识半导体器件 …… 3
知识 1　半导体 PN 结 …… 3
知识 2　晶体二极管 …… 8
实训 1　晶体二极管的识别与检测 …… 15
任务二　二极管电路的应用 …… 18
知识 1　整流电路和滤波电路 …… 18
实训 2　整流滤波电路的安装与测试 …… 23
知识 2　二极管电路的其他应用 …… 25
任务三　放大电路的分析及应用 …… 29
知识 1　放大器的组成及其分析 …… 29
知识 2　三极管放大电路的基本分析方法 …… 37
知识 3　场效应管放大电路 …… 57
实训 3　放大电路的安装与测试 …… 65
任务四　直流稳压电源的设计 …… 73
知识 1　直流稳压电源 …… 73
实训 4　三端集成稳压电源的设计 …… 79
项目小结 …… 83
思考与练习 …… 85

项目二　音频功率放大器的制作 …… 99

任务一　前置放大电路的制作 …… 101
知识 1　多级放大电路的组成 …… 101
知识 2　多级放大电路的耦合方式 …… 101
知识 3　多级放大电路的动态分析 …… 103
实训 1　多级放大电路的制作与调试 …… 105
任务二　负反馈在放大电路中的应用 …… 110
知识 1　反馈的类型与判断 …… 110
知识 2　负反馈四种组态的识别 …… 113
知识 3　负反馈放大电路的方框图及增益的一般表达式 …… 114
知识 4　负反馈对放大电路性能的影响 …… 116
知识 5　深度负反馈的分析方法 …… 119

知识 6　放大电路中引入负反馈的一般原则 …… 123
知识 7　负反馈放大电路的自激振荡与消除 …… 123
实训 2　负反馈放大电路性能的测试 …… 125
任务三　功率放大电路的制作 …… 129
知识 1　功率放大电路的性能要求与分类 …… 129
知识 2　互补对称功率放大电路 …… 130
实训 3　音频功率放大器的制作与调试 …… 135
项目小结 …… 137
思考与练习 …… 138

项目三　简易正弦波发生器的制作 …… 143

任务一　振荡电路的种类及识别 …… 145
知识 1　波形发生器 …… 145
知识 2　*RC* 正弦波振荡器 …… 147
知识 3　*LC* 正弦波振荡器 …… 150
知识 4　石英晶体正弦波振荡器 …… 155
实训 1　简易正弦波发生器的制作 …… 158
项目小结 …… 161
思考与练习 …… 161

项目四　倒车报警电路的制作 …… 165

任务一　集成运算放大器在基本运算中的应用 …… 167
知识 1　集成运算放大器的基本单元电路 …… 167
知识 2　理想集成运算放大器在模拟信号运算方面的应用 …… 185
实训 1　集成运算放大器的简易测试及基本应用 …… 196
任务二　集成运算放大器在波形产生和信号处理方面的应用 …… 200
知识 1　集成运算放大器构成的信号幅度比较电路 …… 200
知识 2　集成运算放大器放大器在波形产生方面的应用 …… 207
知识 3　集成运算放大器在信号处理方面的应用 …… 212
实训 2　倒车报警电路的制作与调试 …… 217
项目小结 …… 220
思考与练习 …… 221

项目五　调光控制器的制作 …… 233

任务一　检测晶闸管 …… 235
知识 1　单向晶闸管的结构和等效电路 …… 235
知识 2　单向晶闸管的工作原理和伏安特性 …… 236
知识 3　单向晶闸管的主要参数 …… 238
知识 4　双向晶闸管的结构、符号和工作特点 …… 239

实训 1　晶闸管的型号及简易检测 …… 239
任务二　晶闸管可控整流电路 …… 242
知识 1　单相半波可控整流电路 …… 242
知识 2　单相桥式可控整流电路 …… 244
任务三　单结晶体管 …… 246
知识 1　单结晶体管的结构、符号及等效电路 …… 246
知识 2　单结晶体管的基本特性及触发电路 …… 247
实训 2　单结晶体管的简易测试 …… 248
实训 3　调光控制器的制作 …… 248
项目小结 …… 251
思考与练习 …… 251

参考文献 …… 254

项目一

直流稳压电源的制作

学习目标

1. 了解半导体器件的种类、特点。
2. 掌握二极管的工作原理及常用应用电路。
3. 了解放大电路的构成,理解其放大作用。
4. 掌握放大电路的组装、测量和调试方法。
5. 了解直流稳压电源的原理、应用。
6. 掌握直流稳压电源电路的设计、调试。

任务一　认识半导体器件

知识 1　半导体 PN 结

1.1　半导体

根据物体的导电能力,可以把物体划分成导体、半导体和绝缘体。导电能力往往用电阻率来表示,单位是 W·cm。一般规定半导体的电阻率在 10^{-3} ~ 10^{9}W·cm 之间。典型的半导体有硅(Si) 和锗(Ge) 以及砷化镓(GaAs) 等。硅和锗是四价元素,砷化镓则属于半导体化合物。

1.1.1　本征半导体

半导体器件是构成电子电路的基本元件,它们所有的材料都是经过特殊加工且性能可控的半导体器件。不同的半导体,内部结构是不同的。

1.1.1.1　本征半导体的定义

本征半导体是化学成分纯净、物理结构完整的半导体。半导体在物理结构上有多晶体和单晶体两种形态,制造半导体器件必须使用单晶体,即整个半导体材料是由一个晶体组成的。制造半导体器件的半导体材料纯度要求很高,要达到 99.9999999%,常称为“九个 9”。

1.1.1.2　本征半导体的共价键结构

硅和锗是四价元素,在原子最外层轨道上的四个电子称为价电子。根据化学的知识可以知道,最外层的价电子受原子核的束缚力最小,容易脱离原子核的束缚而成为自由电子。在半导体晶体中,一个原子最外层的价电子分别与周围的四个原子的价电子形成共价键。

共价键中的价电子为这些原子所共有,并为这些原子所束缚,在空间形成排列有序的晶体。半导体原子结构和本征半导体结构如图 1 - 1。

1.1.1.3　电子空穴对

当半导体处于热力学温度 0 K 时,在无外界激发的条件下,物体中没有自由电子。当温度升高时,或受到光的照射等外界激发时,价电子能量增高,有的价电子可以挣脱原子核的束缚,成为自由电子,从而可能参与导电。这一现象称为本征激发(也称热激发) 。本征激发会形成如下物理过程:

在自由电子产生的同时,在其原来的共价键中就出现了一个空位,空位呈现出正电性,其正电量与电子的电荷量相等,通常称呈现正电性的这个空位为空穴。可见因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的,称为电子空穴对,如图 1 - 2 所示。一部分游离的自由电子在经过空穴附近时,也可能被空穴所俘获,称为复合。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

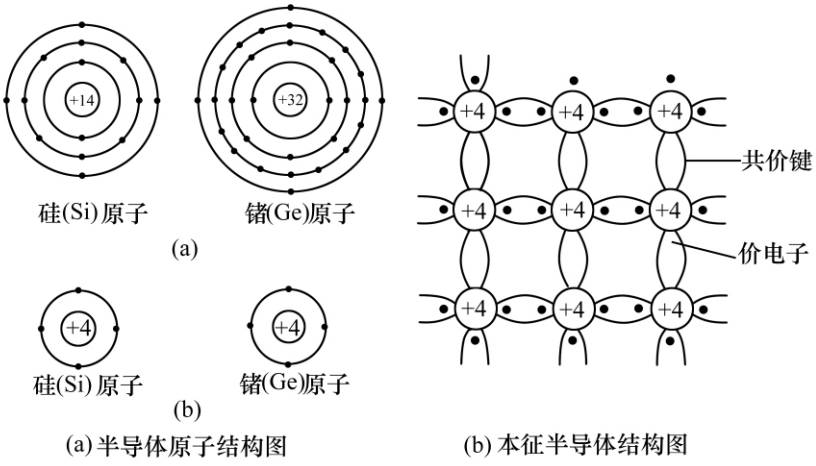


图 1 - 1　半导体原子结构和本征半导体结构图

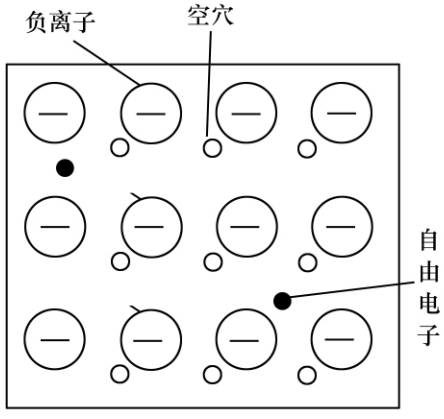


图 1 - 2　空穴和自由电子

1.1.2　杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量杂质元素，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价元素或五价元素，掺入杂质的半导体称为杂质半导体。要注意，这里的杂质半导体是在提纯的本征半导体中掺入一定浓度的三价元素或五价元素而得到的，不是普通意义上的含有多种任意杂质的半导体。

1.1.2.1　N 型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素，例如磷，可形成 N 型半导体，也称电子型半导体。

因五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易成为自由电子，如图 1 - 3。在 N 型半导体中自由电子是多数载流子，它主要由杂质原子提供；空穴是少数载流子，由热激发形成。提供自由电子的五价杂质原子因失去了这个价电子而带正电荷，成为正离子，因此，五价杂质原子也称为施主杂质。N 型半导体的结构示意图如图 1 - 4 所示。

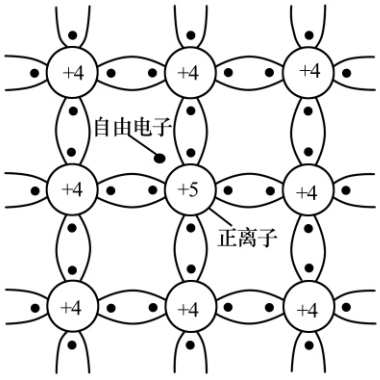


图 1 - 3　N 型半导体晶体结构图

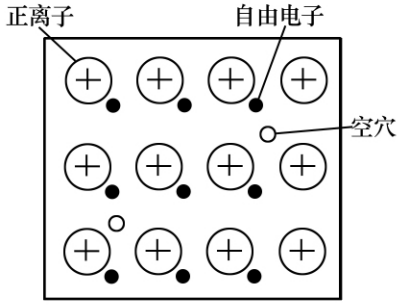
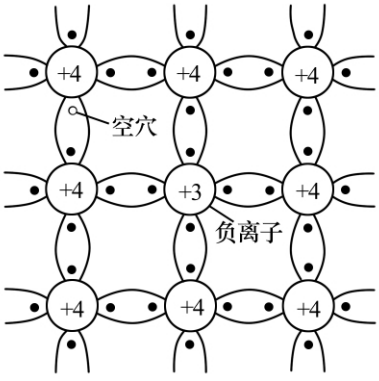


图 1 - 4　N 型半导体示意图

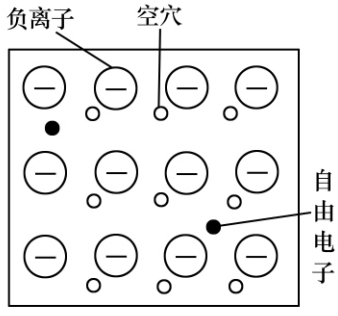
1.1.2.2　P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓、铟等，就形成了 P 型半导体，也称为空穴型半导体。

因三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下了一个空位。这个空位很容易从邻近的硅原子中俘获价电子，从而使杂质原子成为负离子，而失去价电子的硅原子则出现一个空穴。P 型半导体中空穴是多数载流子，其数量主要由掺杂的浓度确定；电子是少数载流子，由热激发形成。三价杂质也称为受主杂质。P 型半导体的结构示意图如图 1 - 5 所示。



(a) P型半导体晶体结构图



(b)P型半导体示意图

图 1 - 5　P 型半导体的结构示意图

1.1.2.3　杂质对半导体导电性的影响

掺入杂质对本征半导体的导电性有很大的影响，因为多数载流子是由掺入的杂质的浓度决定的。一些典型的数据如下：

T = 300 K 室温下，本征硅的原子浓度为：$4.96 \times 10^{22}/\text{cm}^3$

本征硅的电子和空穴浓度为：$n = p = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$

掺杂后，N 型半导体中的自由电子浓度为：$n = 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$

这三个数据基本上各相差六个数量级（一百万倍）。由这些数据可以看出，本征硅的电

子和空穴浓度相当于少数载流子的浓度，掺杂后，N 型半导体中的自由电子浓度相当于多数载流子的浓度，同时可以看出掺杂对半导体的导电性影响是多么大。

1.1.2.4　温度对半导体导电性的影响

温度对半导体的导电性能也有很大的影响，以上给出的本征硅原子浓度等三个数据都是在一定温度条件下(T = 300 K) 得出的。当温度升高时，半导体的导电性将迅速提高，所以温度对半导体的导电性有很大的影响。用半导体制成的半导体器件在实际工作时，必须注意温度的影响，或限制半导体器件的温度不超过一定值。

1.1.3　PN 结

通过掺杂工艺，把本征硅(或锗) 片的一边做成 P 型半导体，另一边做成 N 型半导体，这样在它们的交界面处会形成一个很薄的特殊物理层，称为 PN 结。

1.1.3.1　PN 结的形成

当采用某种方法使半导体中一部分区域成为 P 型半导体，另一部分区域成为 N 型半导体时，其交界上就会形成一个很薄的空间电荷区，如图 1 - 6 所示。由于交界面两侧存在载流子浓度差，P 区中的多数载流子(空穴) 就要向 N 区扩散; 同样，N 区的多数载流子(电子) 也向 P 区扩散。在扩散中，电子与空穴复合，因此在交界面上，靠 N 区一侧就留下不可移动的正电荷离子，而靠 P 区一侧就留下不可移动的负电荷离子，从而形成空间电荷区。在空间电荷区产生一个从 N 区指向 P 区的内电场(自建电场) 。

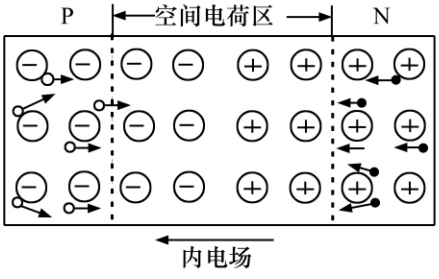


图 1 - 6　PN 结的形成

随着扩散的进行，内电场不断增强。内电场的加强又反过来阻碍扩散运动，但却使 P 区的少数载流子(电子) 向 N 区漂移，N 区的少数载流子(空穴) 向 P 区漂移。当扩散和漂移达到动态平衡时，即扩散运动的载流子数等于漂移运动的载流子数时，就形成一定厚度的空间电荷区，称其为 PN 结。在这个空间电荷区内，能移动的载流子极少，故又称为耗尽层或阻挡层。

1.1.3.2　PN 结的单向导电性

PN 结外加正向电压(称为正向偏置) ，即电源正极接 P 区，负极接 N 区，如图 1 - 7(a) 所示。这时，外电场方向与内电场方向相反，内电场被削弱，空间电荷区变薄，多数载流子的扩散运动大大超过少数载流子的漂移运动。同时电源不断地向 P 区补充空穴，向 N 区补充电子，其结果是使电路中形成较大的正向电流，PN 结处于正向导通状态。

PN 结外加反向电压(称为反向偏置) ，就是将电源的正极接 N 区，负极接 P 区，如图 1 - 7(b) 所示。这时外电场方向与内电场方向一致，空间电荷区变厚，多数载流子的扩散运动受到阻碍，但少数载流子的漂移运动得到加强。由于少数载流子的数目很少，故只有很小的电流通过，PN 结处于几乎不导电的截止状态。

综上所述，PN 结正向偏置时，处于导通状态，有较大电流通过；PN 结反向偏置时，处于截止状态，反向电流很小，这就 PN 结的单向导电性。

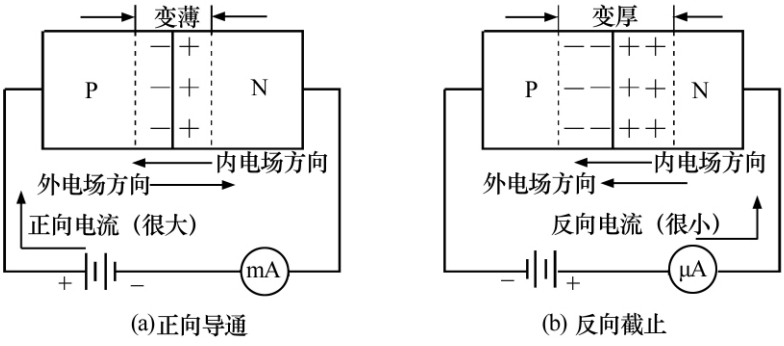


图 1 - 7　PN 结的单向导电性

1.1.3.3　PN 结加正向电压时的导电情况

PN 结加正向电压时的导电情况如图 1 - 8 所示。外加的正向电压有一部分落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相反，削弱了内电场。于是，内电场对多数载流子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流加大。扩散电流远大于漂移电流，可忽略漂移电流的影响，PN 结呈现低阻性。

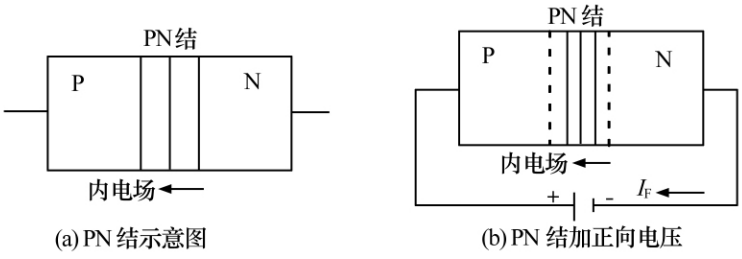


图 1 - 8　PN 结加正向电压时的导电情况

1.1.3.4　PN 结加反向电压时的导电情况

PN 结加反向电压时的导电情况如图 1 - 9 所示。外加的反向电压有一部分落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多数载流子扩散运动的阻碍增强，扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少数载流子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，可忽略扩散电流，PN 结呈现高阻性。在一定的温度条件下，由本征激发决定的少数载流子浓度是一定的，故少数载流子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。

PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。

1.1.3.5　PN 结的电容效应

PN 结具有一定的电容效应，它由两方面的因素决定：一是势垒电容 C_B；二是扩散电容 C_D。本课程仅介绍势垒电容 C_B。

势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加反向电压使 PN 结上压降发生变化时，离子薄层的厚度也相应地随之改变，这相当于 PN 结中存储的电荷量也随之变化，犹如电

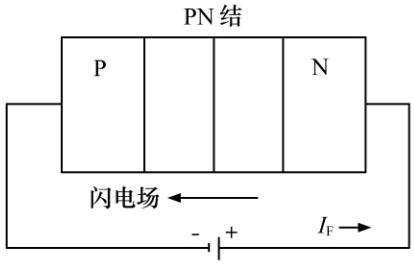


图 1 – 9　PN 结加反向电压时的导电情况

容的充放电。势垒电容的示意图如图 1 – 10 所示。

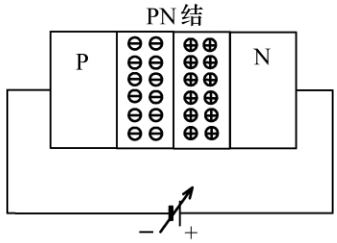


图 1 – 10　势垒电容示意图

一般利用势垒电容制成一个电容器,其上加的反向电压不同,PN 结就具有不同的电容量,这种器件称为变容二极管,用途很广。变容二极管的符号如图 1 – 11 所示。

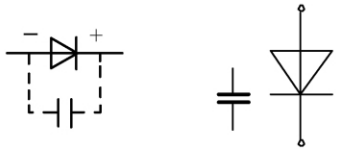


图 1 – 11　变容二极管符号

知识 2　晶体二极管

2.1　半导体二极管

2.1.1　半导体二极管的结构类型

在 PN 结上加上引线和封装,就成为一个二极管。二极管的结构可分为点接触型、面接触型和平面型三大类。

(1) 点接触型二极管 ——PN 结面积小,结电容小,用于检波和变频等高频电路。它们的结构示意图如图 1 – 12(a) 所示。

(2) 面接触型二极管 ——PN 结面积大,用于高频、大电流整流电路。它们的结构示意图如图 1 – 12(b) 所示。

(3) 平面型二极管 —— 用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小,用于高频整流

和开关电路中。它们的结构示意图如图 1 - 12(c) 所示。

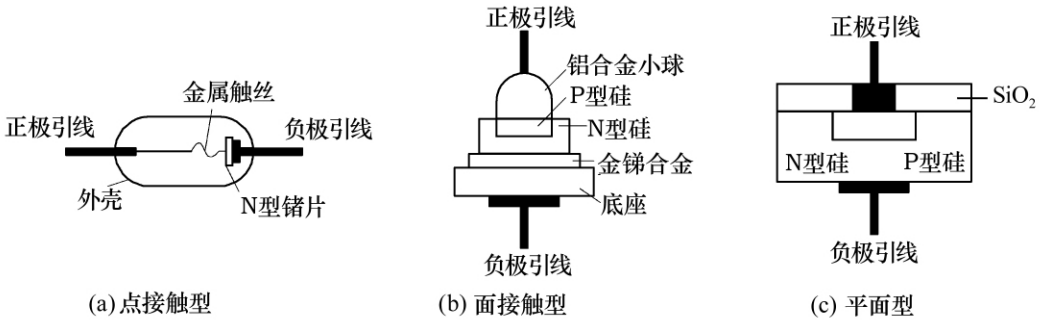


图 1 - 12　二极管的结构示意图

2.1.2　半导体二极管的伏安特性曲线

半导体二极管的伏安特性曲线如图 1 - 13 所示。处于第一象限的是正向伏安特性曲线，处于第三象限的是反向伏安特性曲线。根据理论推导，二极管的伏安特性曲线可用下式表示

$$I = I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流; U 为二极管两端的电压降; $U_T = kT/q$，称为温度的电压当量，k 为玻耳兹曼常数，q 为电子电荷量，T 为热力学温度，对于室温(相当于 $T = 300$ K) ，则有 $U_T = 26$ mV。

2.1.2.1　正向特性

半导体二极管的正向伏安特性曲线说明如下:

当 $U > 0$ 时，即处于正向特性区域。正向区又分为三段:

第一段，当 $0 < U < U_{th}$ 时，正向电流为零，U_{th} 称为死区电压或开启电压。

第二段，当 $U > U_{th}$，且 U 较小时，开始出现正向电流，并按指数规律增长。如图 1 - 13 中的曲线的第 2 段。

第三段，当 $U > U_{th}$，且 U 较大时，正向电流增长很快，且正向电压随正向电流增长而增长很小。对应在图 1 - 13 中，正向曲线很陡的第 3 段。

硅二极管的死区电压 $U_{th} \approx 0.4$ V，锗二极管的死区电压 $U_{th} \approx 0.1$ V。

正向特性曲线第 3 段对应的正向电压可以认为基本不变，硅二极管的正向电压 $U_D \approx 0.7 \sim 0.8$ V，锗二极管的正向电压 $U_D \approx 0.3 \sim 0.4$ V。

2.1.2.2　反向特性

半导体二极管的反向伏安特性曲线说明如下:

当 $U < 0$ 时，即处于反向特性区域。反向区分为两个区域:

当 $U_{BR} < U < 0$ 时，反向电流很小，且基本不随反向电压的变化而变化，此时的反向电流也称反向饱和电流 I_S。

当 $U \geqslant U_{BR}$ 时，反向电流急剧增加，U_{BR} 称为反向击穿电压。

在反向区，硅二极管和锗二极管的特性有所不同。硅二极管的反向击穿特性比较硬、比较陡，反向饱和电流也很小; 锗二极管的反向击穿特性比较软，过渡比较圆滑，反向饱和电流较大。

此为试读，需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com