



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子技术基础 (电工学II)

● 李春茂 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TN/86

:2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子技术基础

(电工学Ⅱ)

主编 李春茂

参编 龙绪明 曹保江

主审 雷 勇 任恩恩

机械工业出版社

本教材分两篇共 14 章,前面 8 章为模拟电子技术部分,后面 6 章是数字电子技术部分。模拟电子技术部分的主要内容有:双极型半导体器件、基本放大电路、场效应晶体管放大电路、多级放大电路、集成运放电路的分析和设计、信号产生电路、直流稳压电源和电力电子学基础;数字电子技术部分的主要内容有:数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、数/模与模/数转换器、可编程逻辑器件。各章后有相应的本章小结和习题。书后附有习题答案。

本教材适用面广,可作为高等工科院校非电类各专业本科生“电子技术基础”课程的教材,也可作为职业大学、成人教育大学、电视大学和网络教育等各专业的教材或辅助教材,还可供相关专业的工程技术人员学习和参考。

本书配有电子课件,欢迎采用本书作教材的老师索取。

索取邮箱: E-mail Edmond Yan@sina. com

Edmond Yan@hotmail. com

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础. (电工学Ⅱ)/李春茂主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-23223-0

I. 电… II. 李… III. ①电子技术-高等学校-教材
②电工学-高等学校-教材 IV. TN TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 001319 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:张 静 责任印制:

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·21.5 印张·527 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-23223-0

定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是参照教育部 2005 年颁发的“高等学校电工学基础课程教学基本要求”，为高等学校非电类各专业编写的电子技术基础教材。作为一部“十一五”国家级规划教材，在编写过程中，作者结合多年教学经验及教学改革成果和“电工学”精品课程建设内容，注意将现代理论与实际应用紧密结合，吸收了国内外在电子技术领域及相关学科的科研成果，使得本书更加精练、涵盖面广、可读性强。

本教材可作为高等学校本科非电类（机械类、材料类、工程力学类、测量类、机电一体化类、经贸管理类、运输类、建筑类、土木类等）各专业的“电子技术基础”课程教材，也可作为高等职业教育、高等专科学校、成人高等教育和网络教育等同类专业的教材，还可以是工程技术人员的学习和参考。

本书与王英主编的《电工技术基础（电工学 I）》配套使用可作为高等学校非电类专业电工学课程的教材，本教材可供 51~68 学时教学使用。

本教材分为“模拟电子技术”和“数字电子技术”两篇。第 1 篇“模拟电子技术”中有 8 章：双极型半导体器件、基本放大电路、场效应管放大电路、多级放大电路、集成运放电路、信号产生电路、直流稳压电源、电力电子学基础。第 2 篇“数字电子技术”包括 6 章：数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、数/模与模/数转换器、可编程逻辑器件。

本教材编写的原则是：“保证基础、精选内容；面向实际应用、突出能力培养”。根据“电子技术基础”课程的特点，在保证打好基础的前提下，精选了内容。在精简了元器件内部物理过程和内部特性的同时，强化了外特性和实际应用电路的介绍；在压缩传统分立元件电路及设计方面内容的同时，重点对集成运放电路、中规模数字集成电路的分析、设计和应用等作了深入浅出的阐述，并适当介绍了可编程逻辑器件 CPLD、FPGA 等内容。在注重基本知识的同时，通过例题的形式拓展教学内容，由浅入深；每章后的小结中给出了本章重点，有助自学；针对学习中部分重点、难点，设置了与之相配合的基本习题和综合型习题，力求做到点面结合，培养学生独立思考的能力。其内容以注重电子技术基础知识为主线，其例题以注重掌握与提高理论知识为目的，其习题以注重综合能力培养为目标，其文笔以通俗易懂为根本，整部教材利于学生阅读和自学。

在电子技术基础课程的讲授中，由于各学科专业的要求不同，各院校可根据具体的授课学时和专业要求对教材中的内容作适当的调整 and 选择。

本教材由西南交通大学李春茂主编，负责全书的组织、统稿和定稿；龙绪明和曹保江参与编写。其中，李春茂编写了第 9~13 章；龙绪明编写了第 1~8 章及附录 A（1）、（2）；曹保江编写了第 14 章、第 9~14 章的习题及解答、附录 A（3）、附录 B 和附录 C。另有陈玲、褚丽丽、刘军华、叶锋等在书稿录入、排版及图稿绘制等方面做了很多工作。

IV

本教材由四川大学雷勇教授和兰州交通大学任恩恩教授主审，他们以严谨的科学态度、高度负责的精神逐字逐句地审阅了书稿，提出了许多宝贵意见和修改建议。另外，在教材编写过程中，参考了众多优秀教材，受益匪浅；同时，很多“电工学”的前辈和同行也给予了大量的支持。在此，谨表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 篇 模拟电子技术

第 1 章 双极型半导体器件	3
1.1 半导体的基本知识	3
1.1.1 本征半导体及其导电性	3
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 PN 结	5
1.2 二极管	7
1.2.1 二极管的结构和伏安特性曲线	7
1.2.2 二极管的参数和模型	9
1.2.3 二极管的应用	10
1.3 各类二极管及其应用	12
1.3.1 稳压二极管	12
1.3.2 光电二极管和发光二极管	14
1.4 双极型晶体管	14
1.4.1 晶体管的结构和电流放大原理	14
1.4.2 晶体管的特性曲线	17
1.4.3 晶体管的参数和型号	19
1.4.4 复合晶体管	23
小结	23
习题	24
第 2 章 基本放大电路	26
2.1 放大电路的基本概念和工作原理	26
2.1.1 放大的概念和主要技术指标	26
2.1.2 基本放大电路的组成及 工作原理	28
2.2 基本放大电路的分析方法	31
2.2.1 放大电路的静态分析法 (静态工作点的估算)	31
2.2.2 微变等效电路	32
2.2.3 动态分析	34
2.3 图解分析法	36
2.4 放大电路静态工作点的稳定	38
2.4.1 静态工作点对放大性能的影响	38
2.4.2 分压式偏置电路	40
2.5 电压放大电路	40
2.5.1 共发射极分压偏置电压 放大电路	40
2.5.2 共集电极电压放大电路 (射极输出器)	44
2.5.3 共基极电压放大电路	46
小结	47
思考题	47
习题	48
第 3 章 场效应晶体管放大电路	51
3.1 结型场效应晶体管	51
3.1.1 结型场效应晶体管的结构和 工作原理	51
3.1.2 结型场效应晶体管的特性曲线	53
3.2 绝缘栅场效应晶体管	54
3.2.1 N 沟道增强型绝缘栅场 效应晶体管	55
3.2.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场 效应晶体管	57
3.2.3 VMOS 场效应晶体管	58
3.3 场效应晶体管的主要参数和 使用注意事项	59
3.4 场效应晶体管放大电路	61
3.4.1 共源组态基本放大电路	61
3.4.2 共漏组态基本放大电路	66
3.4.3 共栅组态基本放大电路	68
小结	68
习题	69
第 4 章 多级放大电路	71
4.1 多级放大电路的耦合方式	71
4.2 阻容耦合放大电路	71
4.3 功率放大电路	74
4.3.1 功率放大电路的一般问题	74
4.3.2 互补对称功率放大电路	76
4.3.3 单电源互补对称功率放大电路	80

*4.3.4 变压器耦合功率放大电路	83	6.3.2 三角波发生器和锯齿波发生器 ...	140
*4.3.5 集成功率放大器	84	6.4 波形变换电路	141
4.4 直接耦合放大电路	85	小结	141
4.5 差动式放大电路	87	习题	141
4.5.1 基本差动放大电路	87	第7章 直流稳压电源	144
4.5.2 典型差动放大电路	90	7.1 桥式整流电路	144
4.5.3 晶体管恒流源差动放大电路	93	7.1.1 单相桥式整流电路	144
小结	94	7.1.2 三相桥式整流电路	146
习题	94	7.2 滤波电路	147
第5章 集成运放电路	98	7.3 稳压管稳压电路	149
5.1 集成运算放大器	98	7.3.1 并联型稳压电路	149
5.1.1 集成运算放大器概述	98	7.3.2 串联反馈式稳压电路	150
5.1.2 集成运放电压传输特性和线性区的等效电路模型	101	7.4 集成稳压电源和开关直流稳压电源	151
5.1.3 集成运放电路的基本分析方法 ...	102	小结	154
5.1.4 集成电路封装和应用知识	104	习题	155
5.2 反馈放大电路	105	第8章 电力电子学基础	157
5.2.1 反馈的基本概念	105	8.1 晶闸管	157
5.2.2 反馈的类型和判断	106	8.1.1 晶闸管的基本结构和工作原理	157
5.2.3 负反馈对放大电路性能的影响 ...	112	8.1.2 晶闸管的伏安特性和主要参数	158
5.3 信号的运算与处理电路	114	8.2 可控整流电路	160
5.3.1 运算电路	114	8.2.1 单相半波可控整流电路	160
5.3.2 有源滤波器	122	8.2.2 单相半控桥式整流电路	161
5.3.3 电流-电压变换器	123	8.3 晶闸管的触发电路	163
5.3.4 电压比较器	124	8.3.1 单结晶体管触发电路	163
小结	127	8.3.2 其他常见的晶闸管的触发电路 ...	166
习题	127	8.3.3 晶闸管电路的应用	167
第6章 信号产生电路	132	8.4 晶闸管逆变电路	168
6.1 自激振荡	132	8.5 电力电子器件	169
6.2 正弦波振荡电路	134	小结	173
6.2.1 RC 正弦波振荡电路	134	习题	173
6.2.2 LC 正弦波振荡电路	136		
6.3 非正弦波信号产生电路	139		
6.3.1 方波发生器	139		

第2篇 数字电子技术

第9章 数字电路基础知识	177	9.2.2 逻辑函数几种表示方法的相互转换	185
9.1 逻辑代数基础	177	9.2.3 逻辑函数的化简	186
9.1.1 基本逻辑运算	177	9.3 集成 TTL 逻辑门电路	195
9.1.2 基本逻辑恒等式和运算规则	180	9.3.1 TTL 与非门电路	195
9.2 逻辑函数及其化简	182	9.3.2 TTL 三态与非门电路	197
9.2.1 逻辑函数的表示方法	182		

9.4 CMOS 门电路	198	12.1 555 定时器电路结构和功能	265
9.4.1 CMOS 反相器	198	12.1.1 电路结构	265
9.4.2 CMOS 或非门	199	12.1.2 引脚和功能	265
9.4.3 HCMOS 门电路	199	12.2 555 定时器构成的施密特触发器	267
小结	199	12.2.1 电路结构	267
习题	200	12.2.2 工作原理	267
第 10 章 组合逻辑电路	203	12.2.3 典型应用	268
10.1 组合逻辑电路的特点	203	12.3 555 定时器构成的单稳态触发器	269
10.2 组合逻辑电路的分析和设计	203	12.3.1 电路结构	270
10.2.1 组合逻辑电路的分析	203	12.3.2 工作原理	270
10.2.2 组合逻辑电路的设计	204	12.3.3 典型应用	271
10.3 常用组合逻辑电路	206	12.4 555 定时器构成的多谐振荡器	272
10.3.1 编码器	206	12.4.1 电路结构	272
10.3.2 译码器	211	12.4.2 工作原理	273
10.3.3 加法器	219	12.4.3 典型应用	274
10.3.4 数值比较器	222	小结	274
10.3.5 数据选择器(多路转换器)	224	习题	274
小结	227	第 13 章 数/模与模/数转换器	277
习题	228	13.1 数/模(D/A)转换器	277
第 11 章 时序逻辑电路	230	13.1.1 权电阻网络 D/A 转换器	277
11.1 触发器	230	13.1.2 T 形电阻网络 D/A 转换器	279
11.1.1 基本 RS 触发器	230	13.1.3 D/A 转换器主要技术指标	280
11.1.2 同步 RS 触发器	232	13.1.4 集成 D/A 转换器举例	281
11.1.3 主从型 JK 触发器	233	13.2 模/数(A/D)转换器	282
11.1.4 边沿触发型 JK 触发器	235	13.2.1 A/D 转换器概述	282
11.1.5 维持阻塞型 D 触发器	236	13.2.2 并联比较型 A/D 转换器	283
11.1.6 触发器的触发方式	237	13.2.3 逐次逼近型 A/D 转换器	284
11.2 时序逻辑电路分析	238	13.2.4 A/D 转换器的主要技术指标	287
11.2.1 时序逻辑电路的基本 分析方法	238	小结	287
11.2.2 时序逻辑电路分析举例	239	习题	288
11.3 常用时序逻辑电路组件	240	第 14 章 可编程逻辑器件	290
11.3.1 寄存器	240	14.1 概述	290
11.3.2 计数器	242	14.1.1 PLD 的发展历程	290
11.4 时序逻辑电路设计	250	14.1.2 PLD 的分类	290
11.4.1 时序逻辑电路设计的几种 方法	250	14.1.3 PLD 的基本结构	293
11.4.2 时序逻辑电路设计的一般 步骤	250	14.2 PAL 和 GAL	293
11.4.3 时序逻辑电路设计举例	251	14.2.1 PAL 的应用与原理	294
小结	258	14.2.2 GAL 的原理与应用	298
习题	259	14.3 CPLD 和 FPGA	303
第 12 章 脉冲波形的产生和整形	265	14.3.1 CPLD 的结构和工作原理	303
		14.3.2 FPGA 结构与工作原理	305
		14.4 ISP 技术与 ISP 器件	307
		14.4.1 ISP 技术的特点	307

14. 4. 2	ispLSI100 系列.....	308	型号命名方法	312
14. 4. 3	ISP 器件的编程	309	附录 B 数的进制及其转换	314
小结		310	附录 C 二进制数在机器中的表示方法	318
习题		311	部分习题参考答案.....	321
附录		312	参考文献.....	334
附录 A	国产半导体器件和半导体集成电路			

第 1 篇

模 拟 电 子 技 术

第 1 章 双极型半导体器件

用半导体材料制成的电子器件统称为半导体器件。半导体器件是 20 世纪 50 年代发展起来的，特别是 1948 年晶体管（Transistor）的发明，对电子技术的发展起到了决定性的作用。半导体器件根据参与导电的载流子种数分为双极型和单极型半导体器件两大类型。双极型半导体器件是有两种载流子参与导电的半导体器件，单极型半导体器件仅有一种载流子参与导电的单半导体器件。

本章的基本任务是介绍半导体材料的基本性质，PN 结及其导电性，半导体二极管（以下简称二极管）和双极型半导体晶体管（下面介绍均称晶体管）的工作原理、特性曲线和主要参数，而对半导体器件内部的详细的物理过程则只作一般的讨论。

1.1 半导体的基本知识

按导电能力的不同，物体有导体、半导体和绝缘体之分。

导体——容易传导电流的材料称为导体。

绝缘体——几乎不传导电流的材料称为绝缘体。

半导体——导电能力介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。

本征半导体——化学成分纯净的半导体。典型的半导体有硅（Si）和锗（Ge），以及砷化镓（GaAs）等。硅和锗在元素周期表上是四价元素，砷化镓则属于半导体化合物。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构，所以由半导体构成的管件也称晶体管。

1.1.1 本征半导体及其导电性

本征半导体是化学成分纯净的半导体，它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。对制造半导体器件的材料纯度要求很高，要达到 99.9999999%，常称为“九个 9”。在制造单晶体的过程中会进一步提高材料的纯度，单晶体不但纯度高，在晶格结构上也应该是没有缺陷的。用这样的单晶体制造的器件才能保证质量。

1. 电子空穴对

硅和锗是四价元素，在原子最外层轨道上的 4 个电子称为价电子。它们分别与周围的 4 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格。这种结构的立体和平面示意图见图 1-1。

当导体处于热力学温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，导体中没有自由电子。当温度升高或受到光的照射时，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。这种现象称为本征激发（也称热激发）。

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，原子的电中性被破坏，呈现出正电性，其正电量与电子的电量相等，通常称呈现正电性的这个空位为空穴。

因热激发而出现的自由电子和空穴是成对出现的，称为**电子空穴对**。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**，见图 1-2。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。此时，半导体中载流子的浓度不变。

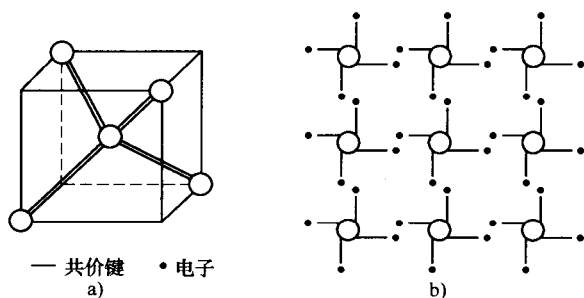


图 1-1 硅原子空间排列及共价键结构平面示意图

a) 硅晶体的空间排列 b) 共价键结构平面示意图

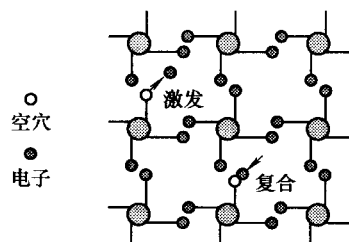


图 1-2 本征激发和复合的过程

2. 空穴的移动

自由电子的定向运动就形成了电子电流，空穴的定向运动也可形成空穴电流，空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的。空穴移动的示意图见图 1-3。例如 A 处的空穴被 B 处的电子所充填，B 处产生一个新的空穴，同时 A 处产生复合，接下来，B 处的空穴被 C 处的电子所充填，同时 C 处产生一个空穴，B 处产生复合，如此不断进行，空穴于是靠着相邻共价键中的价电子依次充填而产生运动。

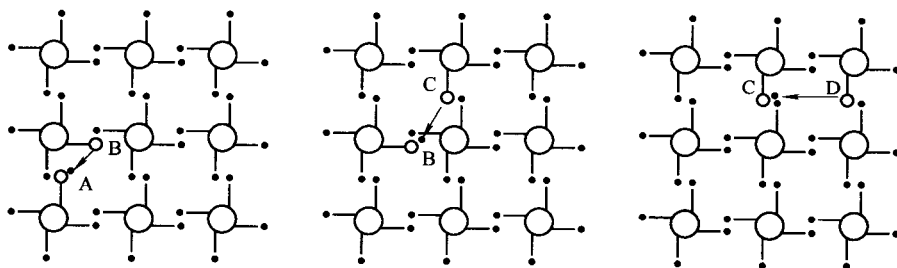


图 1-3 空穴在晶格中的移动

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某种元素作为杂质，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或五价元素，掺入杂质的本征半导体称为**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微量的三价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。可以认为掺入杂质后，半导体的晶格结构不变。

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 4 个价电子能与周围 4 个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的 1 个价电子因无共价键束缚而很容易成为自由电子。N 型半导体的结构示意图见图 1-4。

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。

因热激发形成的是电子空穴对，电子空穴对中的空穴是少数载流子，电子空穴对中的电子是多数载流子，它与掺杂形成的多数载流子混在一起。但由热激发形成的自由电子虽然是多数载流子，但其数量远远少于由掺入五价杂质而产生的多数载流子，这个差别要在一百万倍以上。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。

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一个空穴。所以 P 型半导体中空穴是多数载流子，其数量主要由掺入杂质的浓度确定；电子是少数载流子，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。P 型半导体的结构示意图见图 1-5。

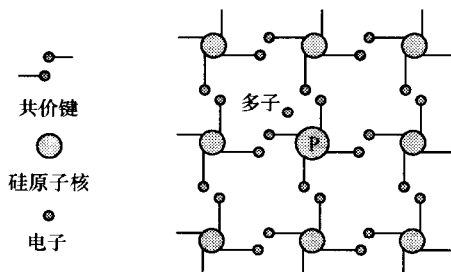


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

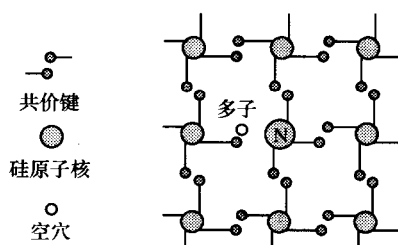


图 1-5 P 型半导体的结构示意图

制作 N 型半导体和 P 型半导体不一定非要在本征半导体中去制作。例如在 N 型半导体中的某个区域掺入三价元素，可以使这个区域形成 P 型半导体。但是要掺入多一点的杂质，其中的一部分用于抵消五价杂质的影响，剩余的三价元素用于形成 P 型半导体。

3. 杂质和温度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：

$T=300\text{K}$ 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 3 个数据为便于记忆，基本上各相差 6 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。

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 3 个数据都是在一定温度条件下（ $T=30^\circ\text{C}$ ）给出的。即半导体受到光照或热的辐射时，其电阻率会发生很大的变化，导电能力将有明显的改善，利用这一特性可制造光敏元件和热敏元件。

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

(1) 基本概念

扩散运动: 多子从浓度大向浓度小的区域运动, 扩散运动产生扩散电流。**漂移运动:** 少子向对方运动, 漂移运动产生漂移电流。

动态平衡: 扩散电流 $\leftrightarrow$ 漂移电流, PN 结内总电流为 0。

PN 结: 稳定的空间电荷区。

(2) **PN 结的形成** 将一块 P 型半导体和 N 型半导体紧密连接在一起, 这种紧密连接不能有缝隙, 是一种原子半径尺度上的紧密连接。或者在一块 N 型半导体中制作出 P 型半导体, 由此来形成 PN 结。此时将在 N 型半导体和 P 型半导体的结合面上形成如下物理过程。

N 型半导体中的电子的浓度远大于 P 型半导体中电子的浓度; P 型半导体中空穴的浓度远大于 N 型半导体中空穴的浓度。于是在两种半导体的界面上会因浓度差发生载流子的扩散运动, 见图 1-6。随着扩散运动的进行, 在界面 N 区的一侧, 随着电子向 P 区的扩散, 只剩正离子; 在界面 P 区的一侧, 随着空穴向 N 区的扩散, 只剩负离子。离子在晶格中是不能移动的, 所以在 N 型半导体和 P 型半导体的界面出现空间电荷区。空间电荷区形成的电场, 方向是从 N 区指向 P 区, 称为**内电场**。

内电场的出现对多数载流子的扩散运动产生阻碍作用, 限制了扩散运动的进一步发展。另一方面, 在半导体中还存在少数载流子, 内电场的出现, 电场力会对少数载流子产生作用, 促使少数载流子产生漂移

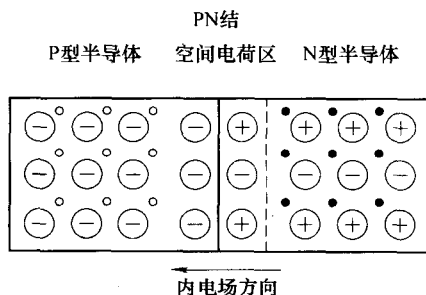


图 1-6 PN 结的形成过程

运动。漂移电流的方向正好与扩散电流的方向相反。扩散运动越强, 内电场越强, 对扩散运动的阻碍就越强, 却对漂移电流越有利。最终, 两种运动达到动态平衡, 即扩散电流等于漂移电流。此时空间电荷区的宽度不变, 这空间电荷区称为**PN 结**。因为空间电荷区中的载流子已经扩散尽了, 也称之为**耗尽层**。从其他角度也将 PN 结称为**离子薄层**、**势垒区**等。

上述过程可简单表示如下:

浓度差 $\rightarrow$ 多子扩散 $\rightarrow$ 杂质离子形成空间电荷区

$\rightarrow$ 空间电荷区形成内电场

$\nearrow$ 内电场促使少子漂移
 $\searrow$ 内电场阻止多子扩散

达到动态平衡

(3) **PN 结的接触电位** 内电场的建立, 使 PN 结中产生电位差, 从而形成接触电位 V_f , 接触电位 V_f 决定于材料及掺杂浓度

锗: $V_f = 0.2 \sim 0.3\text{V}$, 硅: $V_f = 0.6 \sim 0.7\text{V}$

2. PN 结的单向导电性

PN 结具有单向导电性, 若 P 区的电位高于 N 区, PN 结呈低阻性, 所以电流大; 若 P 区的电位低于 N 区, PN 结呈高阻性, 所以电流小。

(1) **PN 结加正向电压时的导电情况** 见图 1-7, 外加的正向电压有一部分降落在 PN 结区, 方向与 PN 结内电场方向相反, 削弱了内电场。于是, 内电场对多子扩散运动的阻碍减弱, 扩散电流加大。扩散电流由多数载流子的运动产生, 电流较大, PN 结呈低阻。

(2) **PN 结加反向电压时的导电情况** 见图 1-8, 外加的反向电压有一部分降落在 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结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，但漂移电流是少子的运动形成的，电流很小。PN结呈高阻。

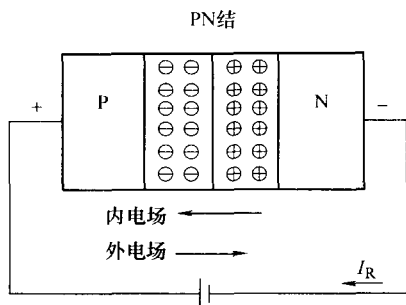


图 1-7 PN 结正偏时的导电情况

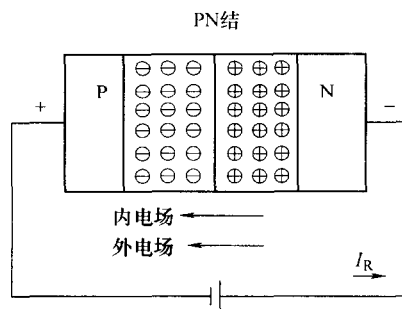


图 1-8 PN 结反偏时的导电情况

在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少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。

1.2 二极管

1.2.1 二极管的结构和伏安特性曲线

1. 二极管的结构

在PN结上加上引线和封装，就成为一个二极管。二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型三大类。它们的结构示意图见图 1-9。

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。

2) 面接触型二极管 PN 结面积大，用于工频大电流整流电路。

3) 平面型二极管 往往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。

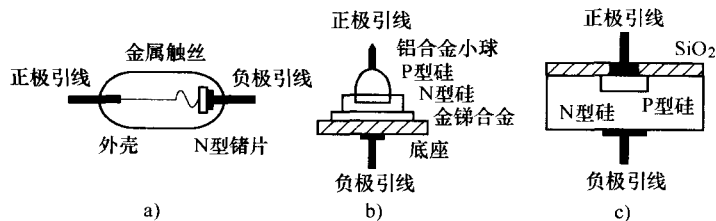


图 1-9 二极管的结构示意图

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型

2. 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线见图 1-10。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：

$$I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中， I_S 为反向饱和电流； U_D 为二极管两端的电压降； $U_T = kT/q$ 称温度的电压当量； 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 $T = 30^\circ\text{C}$ ），则有 $U_T = 26\text{mV}$ 。

(1) 正向特性 当 $U_D > 0$ ，即处于正向特性区域。正向区又分为 3 段，硅二极管的开启电压 $U_{TH} \approx 0.5\text{V}$ ，锗二极管的开启电压 $U_{TH} \approx 0.1\text{V}$ 。

第一段，当 $0 < u_D < U_{TH}$ 时，正向电流为零， U_{TH} 称为开启电压（见图 1-10 中的①段）。

第二段，当 $u_D > U_{TH}$ ，且 u_D 较小时，开始出现正向电流，并按指数规律增长，见图 1-10 中的曲线的②段。

第三段，当 $u_D > U_{TH}$ ，且 u_D 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。在图 1-10 中，对应正向曲线很陡的③段。

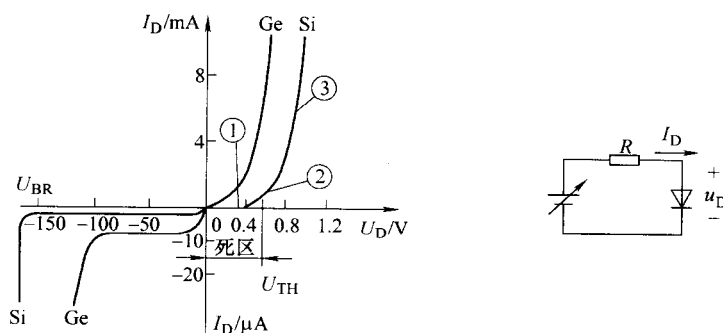


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

正向特性曲线③段对应的正向电压可以认为基本不变，一般认为硅二极管的正向电压 $U_D \approx 0.7\text{V}$ ，锗二极管的正向电压 $U_D \approx 0.3\text{V}$ 。

(2) 反向特性

1) 当 $u_D < 0$ 时，即处于反向特性区域。反向区分为两个区域。

2) 当 $U_{BR} < u_D < 0$ 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 。

3) 当 $u_D \leq U_{BR}$ 时，反向电流急剧增加，发生反向击穿， U_{BR} 称为反向击穿电压。反向击穿按机理分为齐纳击穿和雪崩击穿两种情况。

①在高掺杂的情况下，因耗尽层薄，不需很大的反向电压就可在耗尽层建立很强的电场，场强达到一定程度会直接破坏共价键，使价电子脱离共价键的束缚，产生电子—空穴对，致使反向电流急剧增大，这种击穿称为**齐纳击穿**。

②如果掺杂浓度较低，耗尽层较宽，当反向电压增加到较大数值时，耗尽层的电场使