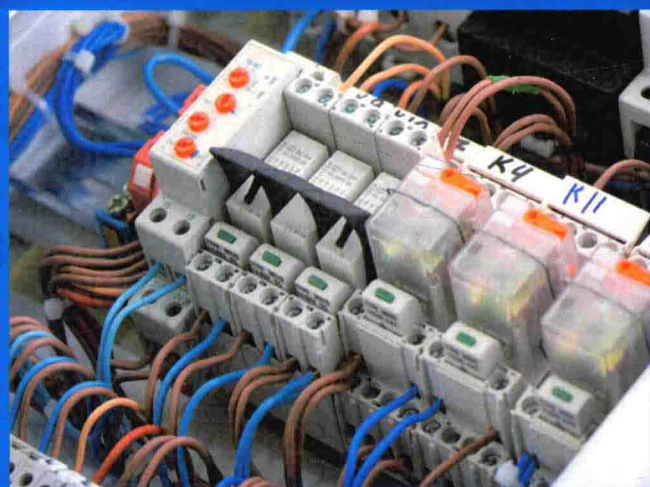


“十三五”普通高等教育规划教材

电工电子技术

(下)

黄金侠 主编



含电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”普通高等教育规划教材

电工电子技术

(下)

	黄金侠	主 编
宋国义	张 炯	副主编
李丽敏	张 良	参 编
	李 晶	主 审



机械工业出版社

本书为“十三五”普通高等教育规划教材,是根据教育部电气电子学科基础课程教学指导委员会制定的“电工技术”“电子技术”课程的最新教学基本要求编写的。

全书共 10 章,包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、电子电路中的反馈、直流稳压电源、电力电子技术基础、门电路及组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路、存储器和可编程逻辑器件、模拟量和数字量的转换。全书内容处理详略得当,基本概念讲解清楚,分析方法讲解透彻,难易度适中。各章配有丰富的例题、思考题、练习题及小结,此外,最后提供了部分习题的参考答案,方便学生自学和教师施教。

本书可作为高等学校非电类专业本科生、大专生及成人教育相关专业的教材和教学参考书,也可供工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 2399929378, 电话 010 - 88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术. 下/黄金侠主编. —北京:机械工业出版社,2017.3

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-56952-7

I. ①电… II. ①黄… III. ①电工技术-高等学校-教材 ②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 117473 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:时 静 韩 静 责任校对:张艳霞

责任印制:李 昂

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2017 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·440 千字

0001-2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-56952-7

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:(010)88379833

读者购书热线:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

教材是教师实施教育的重要载体和主要依据,是学生获取知识、发展能力的重要渠道。编写一本合适的教材,教与学可以达到事半功倍的效果。近几年,高校开始进行大类招生,学生在一二年级不分专业,按学科大类统一学习规定的基础平台课程。很多高校已将“电工电子技术”列为基础教学平台课程,旨在加强通识教育,实行宽口径知识培养。为了更好地满足大类招生对课程教学内容的需求,作者结合目前课程教学改革的标准和要求,以及科学技术的新发展,在多年课程教学改革和实践探索的基础上,总结经验,依据教育部制定的工科高校“电工电子技术”课程教学基本要求,为适应高等学校工科非电类专业“电工电子技术”课程改革的需要而编写了本书。

本书在编写时立足于“结构新颖,整体贯通,深入浅出,化难为易,好学易懂,重点突出,便于自学,利于教学”。与同类教材相比,本书更加注重基本概念的讲解,解题技能的训练以及工程分析、设计与实践能力的培养。本书既能满足教学基本要求又有加深拓宽内容,对非电类专业是非常适用的。本书具有如下特色:

(1) 本书体现了工科非电类电工电子技术课程教学“保基础、重实践、少而精”的特点,整合课程内容,体现科学性,突出实践性和应用性,满足大类招生下较少学时教学的需要。

(2) 本书内容涵盖了电气工程学科的大多数研究领域,满足不同专业学生利用与电气工程学科交叉、渗透、融合来促进其本身学科的学习的需求。

(3) 将新知识、新理论和新技术充实到教材中去,为学生提供符合时代需要的知识体系。每章以内容提要和本章目标开头,使读者能在学习前明确目标;每章结尾部分又有把主要知识点进行梳理的本章小结。

(4) 在本书的编写过程中,作者精心设计讲授的内容,精心梳理所讲授内容之间的逻辑关系,采用分层次递进的教、学、做相结合的结构。在教与学的同时多“练”就显得很重要,本书每小节都有思考与练习;每章都含有多个例题、精选各类选择题、分析题和计算题,这些题目可以进一步帮助学生练习和测试对教学内容的掌握情况,为后续学习做好铺垫。

(5) 本课程的特点是电路图较多,传统的黑板加粉笔的教学方法难以提供较大的信息量,而且不可避免地要画大量电路图,既费时又费力。为了适应教学改革的需要,我们汇集了优秀教师的教学经验,研究开发了本书配套的多媒体课件,并引入教学。利用多媒体 PPT 教学,不仅可以大大减少教师的重复性劳动,而且因其图文并茂、形象逼真、信息量大,可吸引学生注意力,极大提升学生的学习效果。

(6) 附录中增加了仿真软件 Multisim 10 在电路分析中的应用的內容。Multisim 仿真软件逼真的人机交互界面,可以使学生产生身临其境的实验环境的感受,使得抽象、晦涩难懂的理论知识变得直观且易于理解。将仿真技术与多媒体应用相结合,在理论教学中直接嵌入仿真实验,将传统教室变为虚拟实验室,实现理论与实践教学一体化。

全书共分为 10 章,包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、电子电路中的反馈、直流稳压电源、电力电子技术基础、门电路及组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路、存储器和可编程逻辑器件、模拟量和数字量的转换。各章开始设有内容提要及本章目标,结束设有本章小结。各章配有丰富的例题、习题和思考题,书后提供了部分习题的参考答案,便于教师教学和学生自学。由于非电类专业甚多,对电工电子技术的要求不一,学时也有差别,本书的参考学时为 50~70 学时。教学内容分为两类:

(1) 共性基本内容:各非电专业所规定的基本教学内容。

(2) 非共性基本内容(标以“ Δ ”号):根据各非电类专业本身的需求规定的教学内容。

为方便教师教学,本书配有免费电子教学课件。任课教师可登录 www.cmpedu.com 免费下载或发送邮件至 hjxlcj2006@sina.com 咨询。

本书主要由佳木斯大学信息电子技术学院电工学课程组编写。全书由黄金侠主编,并负责全书的定稿和统稿工作。其中黄金侠编写第 11、17、18 章;宋国义编写第 12、14 章和附录 A;张良编写第 13、15 章;张炯编写第 16 章和附录 B、C;李丽敏编写第 19、20 章。主审李晶教授为本书的编写提出了很多宝贵修改意见。在编写过程中,作者还学习和借鉴了大量有关的参考资料,在此向所有作者表示深深的感谢。

由于编者水平有限,书中的错误和不妥之处在所难免,欢迎使用教材的教师、学生和工程技术人员提出意见和建议,以便改进和提高。

编 者

目 录

前言

第 11 章 常用半导体器件	1
11.1 半导体基础知识	1
11.1.1 本征半导体	1
11.1.2 杂质半导体	3
11.1.3 PN 结	3
11.2 半导体二极管	5
11.2.1 常见二极管的基本结构	5
11.2.2 二极管的伏安特性	6
11.2.3 二极管的主要参数	6
11.2.4 稳压二极管	8
11.2.5 其他类型的二极管	9
11.3 晶体管	10
11.3.1 晶体管的结构和类型	10
11.3.2 晶体管电流放大原理	11
11.3.3 晶体管的特性曲线	12
11.3.4 晶体管的主要参数	13
11.3.5 光敏晶体管	15
11.3.6 光耦合器	15
11.4 场效应晶体管	16
11.4.1 绝缘栅场效应晶体管	16
11.4.2 场效应晶体管的主要参数	19
本章小结	21
习题 11	21
第 12 章 基本放大电路	24
12.1 共发射极放大电路	24
12.1.1 共发射极放大电路的组成	24
12.1.2 共发射极放大电路的工作原理	25
12.2 放大电路的分析方法	26
12.2.1 放大电路的静态分析	26
12.2.2 放大电路的动态分析	27
12.3 静态工作点稳定原理及分析	33

12.3.1	静态工作点稳定原理	33
12.3.2	分压式偏置放大电路的分析	35
12.4	共集电极放大电路	37
12.4.1	电路的组成	37
12.4.2	电路的分析	37
△12.5	共基极放大电路	38
12.5.1	电路的组成	38
12.5.2	电路的分析	39
△12.6	场效应晶体管放大电路	41
12.6.1	自给偏压偏置电路	41
12.6.2	分压式偏置电路	41
12.7	多级放大电路	43
12.8	差分放大电路	46
12.8.1	直接耦合放大电路的零点漂移	46
12.8.2	差分放大电路的工作原理	46
12.8.3	典型差分放大电路	48
12.9	功率放大电路	50
12.9.1	功率放大电路概述	50
12.9.2	互补对称功率放大电路	52
12.9.3	集成功率放大电路	53
	本章小结	54
	习题 12	54
第 13 章	集成运算放大器	58
13.1	集成运算放大器概述	58
13.1.1	集成运算放大器的特点	58
13.1.2	集成运算放大器的组成	59
13.1.3	集成运放的主要参数	60
13.1.4	理想集成运算放大器	61
13.2	集成运算放大器的应用	62
13.2.1	信号运算电路	63
13.2.2	信号处理电路	67
13.2.3	非正弦波形产生电路	73
13.3	集成运算放大器的选择和使用	75
13.3.1	集成运放的选择	75
13.3.2	消除自激振荡	75
13.3.3	调零或调整偏置电压	75
13.3.4	运算放大器的保护	75

本章小结	76
习题 13	77
第 14 章 电子电路中的反馈	81
14.1 反馈的基本概念	81
14.1.1 反馈的定义	81
14.1.2 正反馈与负反馈	81
14.1.3 直流反馈与交流反馈	82
14.2 放大电路中的交流负反馈	83
14.2.1 电压反馈与电流反馈	83
14.2.2 串联反馈与并联反馈	83
14.2.3 负反馈类型的四种基本组态	84
14.2.4 负反馈对放大电路性能的影响	87
14.3 振荡电路中的正反馈	91
14.3.1 自激振荡	91
14.3.2 正弦波振荡器	91
本章小结	93
习题 14	94
第 15 章 直流稳压电源	97
15.1 直流稳压电源概述	97
15.2 整流电路	98
15.2.1 单相半波整流电路	98
15.2.2 单相桥式整流电路	99
15.2.3 三相桥式整流电路	101
15.3 滤波电路	102
15.3.1 电容滤波电路	102
15.3.2 电感滤波电路	104
15.3.3 复式滤波电路	105
15.4 稳压电路	105
15.4.1 稳压二极管稳压电路	105
15.4.2 串联型稳压电路	106
15.4.3 集成稳压电路	108
本章小结	110
习题 15	111
第 16 章 电力电子技术基础	114
16.1 电力电子器件	114
16.1.1 晶闸管	114
16.1.2 双向晶闸管	117

16.1.3 全控型器件	117
16.2 可控整流电路	119
16.2.1 单相半波可控整流电路	119
16.2.2 单相半控桥式整流电路	121
16.2.3 单结晶体管触发电路	122
16.3 逆变 (DC - AC) 电路	125
16.3.1 电压型单相桥式逆变电路	125
16.3.2 正弦波脉宽调制	126
16.4 交流变换 (AC - AC) 电路	127
16.4.1 单相交流调压电路	127
16.4.2 单相交 - 交变频电路	127
本章小结	128
习题 16	129
第 17 章 门电路及组合逻辑电路	131
17.1 数字电路的基础知识	131
17.1.1 数制	131
17.1.2 数字信号	133
17.2 基本逻辑关系和分立元件逻辑门电路	134
17.2.1 基本逻辑关系	134
17.2.2 分立元件逻辑门电路	136
17.3 集成逻辑门电路	138
17.3.1 TTL 门电路	138
17.3.2 CMOS 门电路	144
17.3.3 集成逻辑门电路的应用	146
17.4 逻辑代数及逻辑函数	149
17.4.1 逻辑代数运算法则	149
17.4.2 逻辑函数	150
17.5 组合逻辑电路	155
17.5.1 组合逻辑电路的分析和设计	155
17.5.2 常用集成中规模组合逻辑电路	157
本章小结	168
习题 17	169
第 18 章 触发器及时序逻辑电路	175
18.1 触发器	175
18.1.1 基本 RS 触发器	175
18.1.2 可控 RS 触发器	177
18.1.3 主从 JK 触发器	179

18.1.4 维持阻塞型 D 触发器	180
18.1.5 触发器逻辑功能转换	181
18.2 寄存器	182
18.2.1 数码寄存器	183
18.2.2 移位寄存器	184
18.3 计数器	186
18.3.1 二进制计数器	186
18.3.2 十进制计数器	188
18.3.3 环形计数器	194
18.4 时序逻辑电路分析	195
18.5 555 定时器及其应用	197
18.5.1 555 定时器	198
18.5.2 单稳态触发器	199
18.5.3 无稳态触发器	200
本章小结	201
习题 18	202
第 19 章 存储器和可编程逻辑器件	209
19.1 存储器概述	209
19.1.1 存储器的分类	209
19.1.2 存储器的性能指标	210
19.2 只读存储器	210
19.2.1 ROM 的分类	211
19.2.2 ROM 的结构及工作原理	211
19.2.3 ROM 的应用	213
19.3 随机存储器	217
19.3.1 RAM 的结构和工作原理	217
19.3.2 RAM 芯片简介	219
19.3.3 RAM 的扩展	220
19.4 可编程逻辑器件	224
19.4.1 PLD 的结构框图	225
19.4.2 可编程逻辑阵列	226
19.4.3 可编程阵列逻辑	228
19.4.4 通用阵列逻辑	229
本章小结	231
习题 19	231
第 20 章 模拟量和数字量的转换	234
20.1 数 - 模转换器	234

20.1.1	$R-2R$ T形电阻网络 D-A 转换器	235
20.1.2	$R-2R$ 倒 T形电阻网络 D-A 转换器	236
20.1.3	集成 D-A 转换器	238
20.1.4	D-A 转换器的主要技术参数	239
20.2	模-数转换器	240
20.2.1	采样-保持	241
20.2.2	量化-编码	242
20.2.3	逐次逼近型 A-D 转换器	242
20.2.4	双积分型 A-D 转换器	246
20.2.5	集成 A-D 转换器	247
20.2.6	A-D 转换器的主要技术参数及其选用原则	248
	本章小结	250
	习题 20	251
	附录	253
	附录 A 电子电路仿真软件 Multisim 简介	253
	附录 B 常用半导体命名方法及器件参数	262
	附录 C 参考答案	267
	参考文献	282

第 11 章 常用半导体器件

【内容提要】 本章首先介绍半导体基础知识和本征半导体的导电机理，然后讨论 PN 结的原理、特性；介绍半导体二极管、半导体晶体管及场效应晶体管的工作原理、特性曲线和主要参数；对稳压二极管、发光二极管、光敏二极管、光敏晶体管器件的特性及应用做了一般介绍。本章内容是全书的基础，学习时要深刻理解，熟练掌握。

【本章目标】 理解 PN 结的单向导电性，晶体管的电流放大原理；了解二极管、稳压管、晶体管和场效应晶体管的基本构造、工作原理和特性曲线，理解主要参数的意义。

11.1 半导体基础知识

在日常生活和生产实践中，有些物质（如金、银、铜、铁等）很容易导电，这些物质叫作导体。另一些物质（如塑料、橡胶、惰性气体等）很不容易导电，这类物质叫作绝缘体。而半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质，常见的半导体有硅、锗、硒、金属氧化物及硫化物等。

很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。例如，有些半导体（如钴、锰、镍等金属的氧化物）对温度的反应特别灵敏，当环境温度升高时，它们的导电能力增强，利用这种特性就可做成各种热敏电阻。又如，有些半导体（如镉、铅等的硫化物与硒化物）受到光照时，它们的导电能力变得很强；当无光照时，又变得像绝缘体那样不导电，利用这种特性可做成各种光敏电阻。

实验发现，如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后，它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如，在纯硅中掺入百万分之一的硼后，硅的电阻率就从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右。利用半导体的这些特性就可做成各种不同用途的电子器件，如二极管、晶体管、场效应晶体管及晶闸管等。不仅如此，选择掺入不同的杂质，还可制成不同类型的半导体。

11.1.1 本征半导体

用得最多的半导体是硅和锗，它们的原子结构如图 11-1 所示，最外层都有四个价电子，是四价元素。

将完全纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体，即为本征半导体。由于晶体中相邻原子间的距离很小，晶体中原子的价电子不仅受到本身原子核的作用，而且还受到相邻原子核的吸引，因此，相邻的两个原子的一对最外层电子（即价电子）不但各自围绕自身所属的原子核运动，而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为共用电子，这样的组合称为“共价键”结构。如图 11-2 所示，图中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

原子间的共价键具有很强的结合力，在绝对温度为零度（ $T=0\text{K}$ ，相当于 -273°C ）且

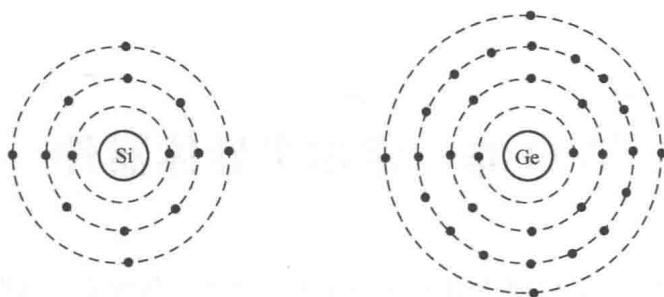


图 11-1 硅和锗的原子结构

无外界激发的条件下，价电子不能挣脱共价键的束缚，也就不能自由移动。本征半导体中虽有大量的价电子，但没有自由电子，此时半导体是不导电的。当温度升高或受光照射时，价电子不断从外界获得一定的能量，少数价电子因获得的能量较大而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，同时原来的共价键的相应位置留下一个空位置，称为“空穴”。原子因失掉一个价电子而带正电，或者说空穴带正电。在本征半导体中电子和空穴成对出现，这种现象称为本征激发，如图 11-3 所示。

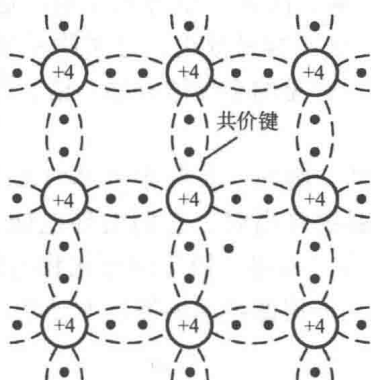


图 11-2 本征半导体的共价键结构

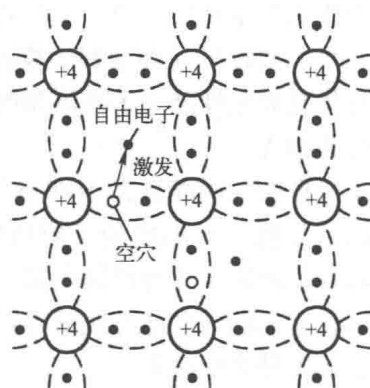


图 11-3 本征半导体中的自由电子与空穴

在外电场的作用下，一方面自由电子将产生定向移动，形成电子电流；另一方面由于空穴的存在，价电子将按一定的方向依次填补空穴，也就是说空穴也产生定向移动，形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同，所以它们的运动方向相反，本征半导体中的电流是两个电流之和。

自由电子和空穴是运载电荷的粒子，称为载流子。金属导体导电只有一种载流子，即自由电子导电；而本征半导体有两种载流子，即自由电子和空穴参与导电，这是半导体导电方式与金属导体导电方式的不同点。

在本征激发产生电子空穴对的同时，自由电子在运动时有可能和空穴相遇，重新被共价键束缚起来，电子空穴成对消失，这种现象称为“复合”。显然，激发和复合是相反过程。在一定的温度下，激发和复合都在不停地进行，最终两者将达到动态平衡，此时半导体中载流子浓度维持一定数值。

本征激发产生的电子空穴对的数目很少，载流子浓度很低，其导电能力很弱；温度越高，载流子数目越多，导电能力就越强。半导体的性能受温度影响很大，因此，在研究用半

导体器件构成的各种电路时，必须考虑电路的温度稳定性。

11.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量的杂质元素（如磷、锑、硼、铟），便可得到杂质半导体。按掺入杂质元素不同，可形成 N 型半导体和 P 型半导体；控制掺入杂质元素的浓度，就可控制杂质半导体的导电性能。

1. N 型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体中掺入五价元素（如磷），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了 N 型半导体。由于磷原子的最外层有五个价电子，所以除了与其周围硅原子形成四个共价键外，还多出一个电子，如图 11-4 所示。多出的电子不受共价键的束缚，只需获得很少的能量，就能成为自由电子。杂质原子因在晶格上，且又失去电子，故变为不能移动的正离子。纯净半导体中掺入磷元素越多，自由电子数目就越多，自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，故称它为电子半导体或 N 型半导体。由于自由电子增多而增加了复合的机会，空穴数目便减少，故在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，而空穴则是少数载流子。

2. P 型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体中掺入三价元素（如硼），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了 P 型半导体。由于硼原子的最外层有三个价电子，所以当它们与周围的硅原子形成共价键时，就产生一个空位。当相邻原子中的价电子受到热或其他激发获得能量时，就有可能填补这个空位，而在该相邻原子中便出现一个空穴。如图 11-5 所示，而杂质原子成为不可移动的负离子。每一个硼原子都能提供一个空穴，于是在半导体中就形成了大量空穴。这种空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或 P 型半导体，其中空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

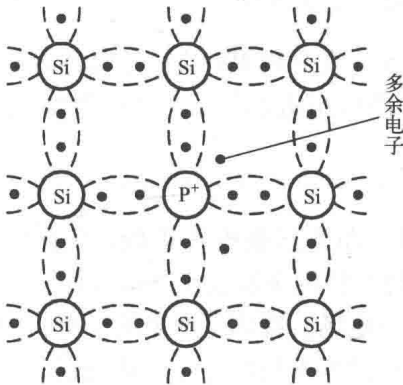


图 11-4 硅晶体中掺磷出现自由电子

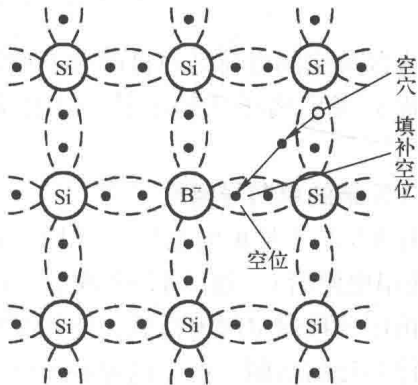


图 11-5 硅晶体中掺硼出现空穴

11.1.3 PN 结

采用不同的掺杂工艺，将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅片上，在它们的界面就形成 PN 结。PN 结具有单向导电性。

1. PN 结的形成

当把 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起时，在它们的交界面，两种载流子的浓度差很大，因而 P 区的空穴必然向 N 区扩散，与此同时，N 区的自由电子也必然向 P 区扩散，如图 11-6a 所示。图中 P 区标有负号的小圆圈表示除空穴外的负离子，N 区标有正号的小圆圈表示除自由电子外的正离子。由于扩散到 P 区的自由电子与空穴复合，而扩散到 N 区的空穴与自由电子复合，所以在交界面附近多子的浓度下降，P 区出现负离子区，N 区出现正离子区，它们是不能移动的，称为空间电荷区，从而形成内电场。随着扩散运动的进行，空间电荷区加宽，内电场增强，其方向由 N 区指向 P 区，正好阻止扩散运动的进行。

当空间电荷区形成后，在内电场作用下，少子产生漂移运动，空穴从 N 区向 P 区运动，而自由电子从 P 区向 N 区运动，如图 11-6a 所示。在无外电场和其他激发作用下，参与扩散运动的多子数目等于参与漂移运动的少子数目，从而达到动态平衡，形成 PN 结，如图 11-6b 所示。

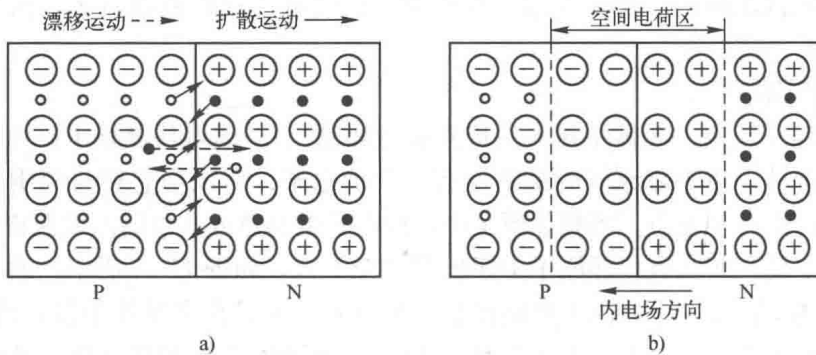


图 11-6 PN 结的形成

a) 扩散与漂移运动 b) 平衡状态下的 PN 结

绝大部分空间电荷区内自由电子和空穴都非常少，在分析 PN 结特性时常忽略载流子的作用，而只考虑离子区的电荷，这种方法称为“耗尽层近似”，故也称空间电荷区为耗尽层。

2. PN 结的单向导电性

当在 PN 结上加正向电压（或称正向偏置）时，即 P 区接电源正极，N 区接电源负极（或负极串电阻后），如图 11-7 所示。此时外电场将 P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子自由电子推向空间电荷区，使其变窄，削弱了内电场，破坏了原来的平衡，使扩散运动加剧，漂移运动减弱。由于电源的作用，扩散运动将源源不断地进行，从而形成较大的正向电流，此时 PN 结呈现低电阻，处于导通状态。

当在 PN 结上加反向电压（或称反向偏置）时，即 P 区接电源负极，N 区接电源正极（或正极串电阻后），如图 11-8 所示。此时外电场加强了内电场，阻止扩散运动的进行，而加剧漂移运动的进行，形成反向电流，由于少子的数量极少，因此反向电流也非常小，所以在近似分析中常将它忽略不计，此时 PN 结呈现高电阻，处于截止状态。

PN 结加正向电压导通，加反向电压截止，此性质称为 PN 结的单向导电性。

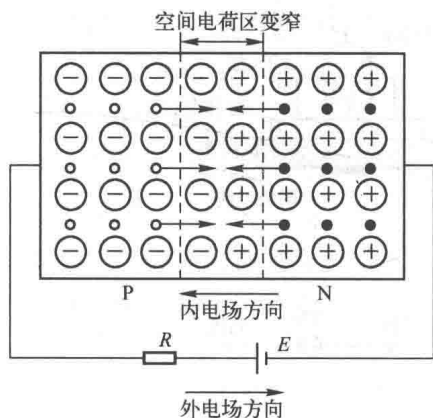


图 11-7 PN 结加正向电压

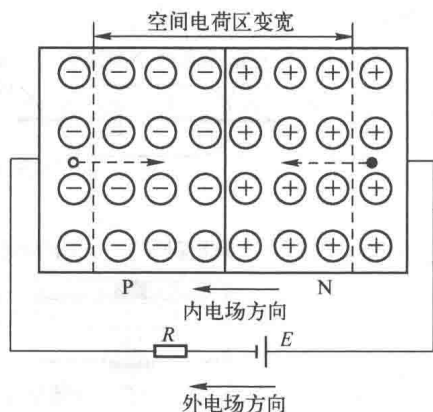


图 11-8 PN 结加反向电压

【思考与练习】

11.1.1 为什么称空穴是载流子？在空穴导电时，自由电子是否运动？

11.1.2 杂质半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的？为什么杂质半导体中少数载流子的浓度比本征载流子的浓度还小？

11.1.3 N 型半导体中的自由电子多于空穴，而 P 型半导体中的空穴多于自由电子，是否 N 型半导体带负电，而 P 型半导体带正电？

11.2 半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极，由 N 区引出的电极为阴极，常见的二极管外形如图 11-9 所示。

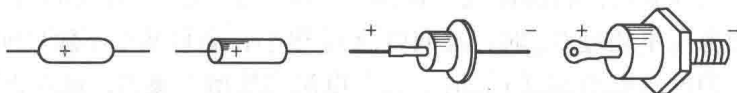


图 11-9 二极管的几种外形图

本节将介绍二极管的结构、特性、主要参数及特殊二极管的功能。

11.2.1 常见二极管的基本结构

二极管按管芯结构分点接触型、面接触型和平面型三类。结构如图 11-10 所示，符号如图 11-10d 所示。

图 11-10a 所示的点接触型二极管，由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接，形成 PN 结。因结面积小（结电容小，一般在 1pF 以下），因此不能通过较大的电流，但其高频特性好，适用于高频电路和小功率整流。

图 11-10b 所示的面接触型二极管是采用合金法工艺制成的。结面积大（结电容大），能够流过较大的电流，但其工作频率较低，一般仅作为整流使用。

图 11-10c 所示的平面型二极管是采用扩散法制成的。结面积较大的可用于大功率整流，结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

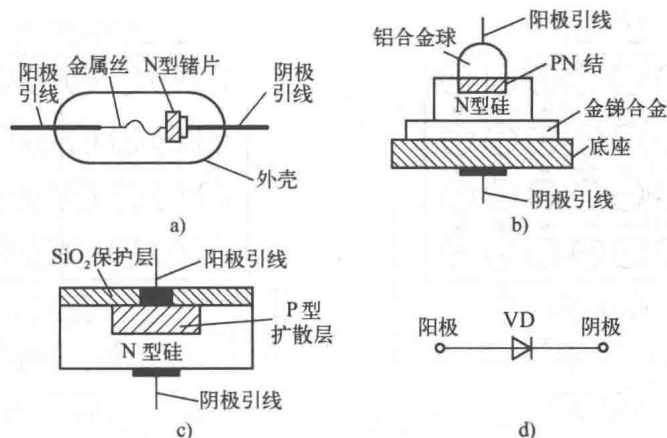


图 11-10 二极管的几种常见结构及符号

11.2.2 二极管的伏安特性

二极管的正向伏-安特性测试电路如图 11-11 所示，设电源电动势 E 足够大，电阻 R_p 较大，逐渐减小电阻 R_p ，调节电流大小测出二极管两端电压和电流，可得二极管正向特性曲线。二极管的伏-安特性曲线如图 11-12 所示， $U_D > 0$ 为正向特性， U_{on} 称为开启电压或死区电压，当 $U_D < U_{on}$ 时，这时外电场较小，还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流很小。当 $U_D > U_{on}$ 时，内电场被削弱，正向电流增长很快。死区电压 U_{on} 的大小与半导体结构、材料和温度有关，一般硅二极管约为 0.5 V ，锗二极管约为 0.1 V 。

在图 11-11 所示电路中，将电源 E 反向，使二极管反向偏置，调节 R_p 测出二极管两端电压和电流，得到二极管反向特性曲线。在图 11-12 中， $U_D < 0$ 为反向特性， U_{BR} 称为反向击穿电压。当反向电压不超过 U_{BR} 时，反向电流 I_R 很小，而且基本不随反向电压变化，又称为反向饱和电流。当反向电压超过 U_{BR} 时，反向电流突然增大很多，进入击穿区。

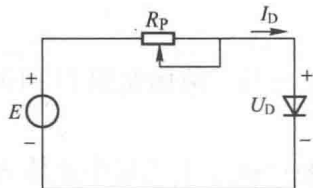


图 11-11 二极管正向伏-安特性测试电路

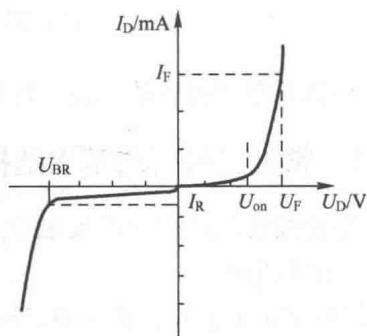


图 11-12 二极管伏-安特性曲线

11.2.3 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。在规定散热条件