



21st CENTURY
规划教材

面向21世纪高职高专电子通信系列规划教材

COURSES FOR VOCATIONAL HIGHER EDUCATION; ELECTRONICS AND COMMUNICATION

模拟电子技术

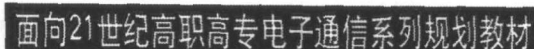
ANALOG ELECTRONIC TECHNOLOGIES

顾海远 主 编



科学出版社

www.sciencep.com



模拟电子技术

顾海远 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

为了适应高职高专教学的需要,更好地培养技术应用型人才,根据高职高专教学大纲的要求,结合近几年来高职教学的经验和体会,编写了《模拟电子技术》这本教材。全书共分10章,其内容包括:半导体二极管及其应用、半导体三极管及其放大电路、场效应管及其基本电路、多级放大电路和集成运算放大器、放大电路中的负反馈、正弦波振荡电路、集成运算放大器的应用、低频功率放大器、直流稳压电源和晶闸管及其应用电路。通过对本书的学习应使学生达到下列基本要求:掌握模拟电子技术的基本概念、基础知识和分析方法并能实际其应用。为后续课程的学习和从事有关的工作奠定基础。

本书结构合理,内容精炼、新颖,理论够用,注重实用,对有些问题的提法也更加合理。

本书可作为高职院校应用电子技术、计算机、电气和机电等专业“模拟电子技术”课程的教材,也可供相关专业师生及工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/顾海远主编. —北京:科学出版社,2004.8

(面向21世纪高职高专电子通信系列规划教材)

ISBN 7-03-013991-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第075291号

责任编辑:王 彦,孙露露/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

世界知识印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004年8月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 000 字数:409 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<世知>)

面向 21 世纪高职高专规划教材专家委员会

主 任 李宗尧

副主任 (按姓氏笔画排序)

丁桂芝 叶小明 张和平 林 鹏

黄 藤 谢培苏

委 员 (略)

信息技术系列教材编委会

主 任 丁桂芝

副主任 (按姓氏笔画排序)

万金保 方风波 徐 红 鲍 泓

委 员 (按姓氏笔画排序)

于晓平	马国光	仁英才	王东红	王正洪
王 玉	王兴宝	王金库	王海春	王爱梅
邓 凯	付百文	史宝会	本柏忠	田 原
申 勇	任益夫	刘成章	刘克敏	刘甫迎
刘经玮	刘海军	刘敏涵	安志远	许殿生
何瑞麟	余少华	吴春英	吴家砮	吴瑞萍
宋士银	宋锦河	张红斌	张环中	张海鹏
张蒲生	张德实	李云程	李文森	李 洛
李德家	杨永生	杨 闯	杨得新	肖石明
肖洪生	陈 愚	周子亮	周云静	胡秀琴
赵从军	赵长旭	赵动庆	郝 梅	唐铸文
徐洪祥	徐晓明	袁德明	郭庚麒	高延武
高爱国	康桂花	戚长政	曹文济	黄小鸥
彭丽英	董振珂	蒋金丹	韩银峰	魏雪英

本书编写人员名单

主 编 顾海远

副主编 牟爱霞 李亚平

参编人员 (按姓氏笔画排序)

曲延昌 刘姝玉 李文森 杨青峰

主 审 赵伟中

出版前言

随着世界经济的发展,人们越来越深刻地认识到经济发展需要的人才多元化、多层次的,既需要大批优秀的理论性、研究性的人才,也需要大批应用性人才。然而,我国传统的教育模式主要是培养理论性、研究性的人才。教育界在社会对应用性人才需求的推动下,专门研究了国外应用性人才教育的成功经验,结合国情大力度地改革我国的“高等职业教育”,制定了一系列的方针政策。联合国教科文组织 1997 年公布的教育分类中将这种教育称之为“高等技术与职业教育”,也就是我们通常所说的“高职高专”教育。

我国经济建设需要大批应用性人才,呼唤高职高专教育的崛起和成熟,寄希望于高职高专教育尽快向国家输送高质量的紧缺人才。近几年,高职高专教育发展迅速。目前,各类高职高专学校已占全国高等院校的近 1/2,约有 600 所之多。教育部针对高职高专教育出台的一系列政策和改革方案主要体现在以下几个方面:

- “就业导向”成为高职高专教育的共识。高职高专院校在办学过程中充分考虑市场需求,用“就业导向”的思想制定招生和培养计划。
- 加快“双师型”教师队伍建设。已建立 12 个国家高职高专学生和教师的实训基地。
- 对学生实行“双认证”教育。学历文凭和职业资格“双认证”教育是高职高专教育特色之一。
- 高职高专教育以 2 年学制为主。从学制入手,加快高职高专教学方向的改革,充分办出高职高专教育特色,尽快完成紧缺人才的培养。
- 开展精品专业和精品教材建设。已建立科学的高职高专教育评估体系和评估专家队伍,指导、敦促不同层次、不同类型的学校办出一流的教育。

在教育部关于“高职高专”教育思想和方针指导下,科学出版社积极参与到高职高专教材的建设中去。在组织教材过程中采取了“请进来,走出去”的工作方法,即由教育界的专家、领导和一线的教师,以及企事业从事人力资源工作的人员组成顾问班子,充分分析我国各地区的经济发展、产业结构以及人才需求现状,研究培养国家紧缺人才的关键要素,寻求切实可行的教学方法、手段和途径。

通过研讨认识到,我国幅员辽阔,各地区的产业结构有明显的差异,经济发展也不平衡,各地区对人才的实际需求也有所不同。相应地,对相同专业和相近专业,不同地区的教学单位在培养目标和培养内容上也各有自己的定位。鉴于此,适应教育现状的教材建设应该具有多层次的设计。

为了使教材的编写能针对受教育者的培养目标,出版社的编辑分不同地区逐所学校拜访校长、系主任和老师,深入到高职高专学校及相关企事业,广泛、深入地和教学第

一线的老师、用人单位交流,掌握了不同地区、不同类型的高职高专院校的教师、学生和教学设施情况,清楚了各学校所设专业的培养目标和办学特点,明确了用人单位的需求条件。各区域编辑对采集的数据进行统计分析,在相互交流的基础上找出各地区、各学校之间的共性和个性,有的放矢地制定选题项目,并进一步向老师、教育管理者征询意见,在获得明确指导性意见后完成“高职高专规划教材”策划及教材的组织工作:

- 第一批“高职高专规划教材”包括三个学科大系:经济管理、信息技术、建筑。
- 第一批“高职高专规划教材”在注意学科建设完整性的同时,十分关注具有区域人才培养特色的教材。
- 第一批“高职高专规划教材”组织过程正值高职高专学制从3年制向2年制转轨,教材编写将其作为考虑因素,要求提示不同学制的讲授内容。
- 第一批“高职高专规划教材”编写强调
 - ◆ 以就业岗位对知识和技能需求下的教材体系的系统性、科学性和实用性。
 - ◆ 教材以实例为先,应用为目的,围绕应用讲理论,取舍适度,不追求理论的完整性。
 - ◆ 提出问题→解决问题→归纳问题的教、学法,培养学生触类旁通的实际工作能力。
 - ◆ 课后作业和练习(或实训)真正具有培养学生实践能力的作用。

在“高职高专规划教材”编委的总体指导下,第一批各科教材基本是由系主任,或从教学一线中遴选的骨干教师执笔撰写。在每本书主编的严格审读及监控下,在各位老师的辛勤编撰下,这套凝聚了所有作者及参与研讨的老师们的经验、智慧和资源,涉及三个大的学科近200种的高职高专教材即将面世。我们希望经过近一年的努力,奉献给读者的这套书是他们渴望已久的适用教材。同时,我们也清醒地认识到,“高职高专”是正在探索中的教育,加之我们的水平和经验有限,教材的选题和编辑出版会存在一些不尽人意的地方,真诚地希望得到老师和学生的批评、建议,以利今后改进,为繁荣我国的高职高专教育不懈努力。

科学出版社

2004年6月1日

前 言

本书是根据高职高专的教学大纲要求编写的。

考虑到高职高专教育的培养目标是技术应用型人才,本教材在编写过程中,突出了以下几个特点:

(1) 在保证基础理论、基本知识够用的前提下,注重实践和应用,避免繁琐的公式推导和理论分析。

(2) 结构合理,学用结合。如讲了二极管和三极管后,马上介绍其检测、查半导体手册和基本应用。

(3) 注重内容的实用性和向集成电路方面侧重。如对电子器件、功放集成电路、集成运放和三端集成稳压器,主要介绍它们的外部特性和主要参数,学会合理选择,正确使用,而对其内部情况有个大概了解即可。书中介绍了很多实用电路。对分立元件内部机理和电路的介绍有所减少。

(4) 对模拟电子中有关问题的提法更加合理,并非人云亦云,如何谓二极管的正、向反偏置,整流电路等。

本教材是以电类各专业的需要为基础编写的,内容较全,全书共分10章,其中包括:半导体二极管及其应用、三极管及其放大电路、场效应管及其基本电路、多级放大电路和集成运算放大器、放大电路中的负反馈、正弦波振荡电路、集成运算放大器的应用、低频功率放大器、直流稳压电源和晶闸管及其应用。可供各专业选用。其中带“*”号的内容为选学内容。

通过对本课程的学习应能使达到下列基本要求:掌握与模拟电子技术有关的基本概念、基本知识和基本分析方法及其应用知识,为后续课程的学习和从事有关的工作奠定基础。建议本教材理论教学课时数为70课时。其中部分章节内容可根据各专业要求及学时情况酌情取舍。

参加本书编写的人员有:顾海远(第1,2章),牟爱霞(第3,4,5章),李亚平、刘姝玉(第9章),李文森(第6章),曲延昌(第7章),杨青峰(第8,10章)。由顾海远对全书进行了统稿,赵伟中对该书进行了审阅。

在本书的编写过程中,编者参考了很多国内外相关资料和书籍,在此向有关资料与书籍的作者表示感谢。

限于编者的水平和经验,书中难免有欠妥或疏漏之处,敬请广大读者批评指正。意见和要求可联系电子信箱:liwsen@163.com。

编 者

2004年5月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其应用	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的主要特性	1
1.1.2 PN 结	5
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 半导体二极管的结构和符号	6
1.2.2 二极管的主要特性	7
1.2.3 二极管的伏安特性	8
1.2.4 二极管的主要参数	9
1.2.5 理想二极管	10
1.3 半导体二极管的型号与检测.....	10
1.3.1 二极管的型号及部分参数选录	10
1.3.2 二极管的识别与检测	12
1.4 半导体二极管的应用.....	14
1.4.1 二极管整流电路	14
1.4.2 滤波电路	17
1.4.3 二极管的其他应用	23
1.5 特殊二极管简介.....	24
1.5.1 稳压二极管	24
1.5.2 变容二极管	26
1.5.3 光电二极管	26
1.5.4 发光二极管	27
* 1.6 倍压整流电路	27
1.6.1 二倍压整流电路	28
1.6.2 多倍压整流电路	29
习题	30
第 2 章 半导体三极管及其基本放大电路	33
2.1 半导体三极管.....	33
2.1.1 三极管的结构、分类和符号	33
2.1.2 三极管的电流放大作用	34
2.1.3 三极管的共射特性曲线	38
2.1.4 三极管的主要参数及其温度影响	41
2.2 三极管的型号与检测.....	44
2.2.1 三极管的型号与参数选录	44

2.2.2 三极管的识别与检测	45
2.3 放大电路基础	46
2.3.1 放大电路的基本概念	47
2.3.2 放大电路的主要性能指标	47
2.4 共射基本放大电路	50
2.4.1 电路组成、各元器件的名称和作用	50
2.4.2 工作原理	52
2.5 放大电路的分析方法	54
2.5.1 共射基本放大电路的静态分析	55
2.5.2 放大电路的动态图解分析	58
2.6 微变等效电路法	62
2.6.1 三极管的低频、简化微变等效电路	62
2.6.2 放大电路的微变等效电路分析	64
2.7 静态工作点稳定电路	66
2.7.1 静态工作点稳定电路的组成和原理	66
2.7.2 静态工作点稳定电路的分析及改进	67
2.8 共集电路与共基电路	70
2.8.1 共集电路	70
2.8.2 共基电路	73
2.9 放大电路三种基本组态的比较	75
习题	75
第3章 场效应管及其基本电路	83
3.1 结型场效应管	83
3.1.1 结型场效应管的结构和工作原理	84
3.1.2 结型场效应管的特性曲线	86
3.1.3 结型场效应管的主要参数	88
3.2 绝缘栅场效应管	89
3.2.1 N沟道增强型绝缘栅场效应管	90
3.2.2 N沟道耗尽型绝缘栅场效应管	92
3.2.3 使用场效应管的注意事项	94
3.2.4 场效应管与晶体三极管的比较	95
3.3 场效应管的基本电路	95
3.3.1 场效应管的直流偏置电路和静态工作点	95
3.3.2 场效应管放大电路的等效电路分析法	97
习题	100
第4章 多级放大电路和集成运算放大器	104
4.1 多级放大器	104
4.1.1 多级放大器的组成	104
4.1.2 多级放大电路的分析	107

4.2 放大电路的频率响应	110
4.2.1 频率响应的描述和几个常用的术语	110
4.2.2 放大电路的频率响应	111
4.3 直接耦合放大电路及其零点漂移问题	117
4.3.1 直接耦合放大电路存在的问题	117
4.3.2 合理安排静态工作点	118
4.3.3 零点漂移的抑制	119
4.4 差动放大电路	121
4.4.1 差动放大电路的基本概念	121
4.4.2 基本差动放大电路	123
4.4.3 双电源供电的差动放大电路	126
4.4.4 具有恒流源的差动放大电路	129
4.4.5 差动电路的其他接法	129
4.5 集成电路的基本知识	131
4.5.1 集成电路的产生与发展	131
4.5.2 集成电路的结构和特点	131
4.5.3 集成电路的分类	132
4.5.4 集成电路的封装形式	133
4.6 集成运算放大器的基本知识	134
4.6.1 集成运算放大器发展简介	134
4.6.2 集成运放的组成	135
4.6.3 集成运放的符号与引脚	135
4.6.4 集成运放的主要参数	136
4.6.5 运算放大器的使用常识	137
习题	139
第5章 放大电路中的负反馈	145
5.1 反馈的基本概念	145
5.1.1 反馈	145
5.1.2 反馈类型及判别	146
5.2 负反馈放大电路的方框图和组态表示法	151
5.2.1 负反馈放大电路的方框图	151
5.2.2 负反馈放大电路的一般表达式	152
5.2.3 负反馈放大电路的组态	153
5.3 负反馈对放大电路的影响	156
5.3.1 提高放大倍数(增益)的稳定性	156
5.3.2 减小非线性失真	157
5.3.3 扩展通频带	157
5.3.4 改变输入电阻和输出电阻	158
5.3.5 引入负反馈的一般原则	161

5.4 深度负反馈放大电路的计算	162
5.4.1 深度负反馈的特点	162
5.4.2 深度负反馈放大电路的计算	163
5.5 负反馈放大电路的自激及消除	165
5.5.1 负反馈放大电路的自激振荡	166
5.5.2 消除自激振荡的方法	167
习题	168
第6章 正弦波振荡电路	174
6.1 正弦波振荡器的基本原理	174
6.1.1 自激振荡的条件	175
6.1.2 正弦波振荡电路的起振条件	176
6.1.3 正弦波振荡电路的组成与分类	176
6.1.4 正弦波振荡电路的分析步骤	177
6.2 RC 正弦波振荡电路	177
6.2.1 RC 串并联网络的选频特性	177
6.2.2 RC 桥式振荡电路的工作原理	179
6.2.3 其他 RC 振荡电路	181
6.3 LC 振荡电路	183
6.3.1 LC 并联谐振回路的选频特性	184
6.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	185
6.3.3 三点式 LC 振荡电路	186
6.4 石英晶体振荡电路	190
6.4.1 石英晶体振荡器	190
6.4.2 石英晶体振荡电路	192
习题	194
第7章 集成运算放大器的应用	202
7.1 集成运算放大器应用基础	202
7.1.1 理想集成运算放大器的技术指标	202
7.1.2 集成运算放大器工作在线性区和非线性区的特点	203
7.2 集成运放的运算电路	204
7.2.1 比例运算电路	204
7.2.2 加减法运算电路	206
7.2.3 微分和积分运算电路	208
7.2.4 乘法运算电路	209
7.3 集成运放的非线性应用	211
7.3.1 电压比较器	211
7.3.2 波形发生器	214
习题	216
第8章 低频功率放大器	219

8.1 功率放大器的特点及分类	219
8.1.1 功率放大器的特点	219
8.1.2 低频功率放大器的分类	220
8.2 互补对称功率放大器	220
8.2.1 双电源互补对称电路	220
8.2.2 单电源互补对称电路	225
8.3 集成功率放大器	227
8.3.1 LM386 集成功率放大器工作原理及应用	227
8.3.2 4100 系列集成功放及应用	228
8.3.3 傻瓜 IC 集成功放及应用	230
习题	231
第 9 章 直流稳压电源	233
9.1 概述	233
9.1.1 直流稳压电源的组成及各部分的作用	234
9.1.2 直流稳压电源的主要技术指标	235
9.2 稳压管稳压电路	236
9.2.1 稳压原理	237
9.2.2 稳压二极管稳压电路元件的选择	238
9.3 串联型稳压电路	240
9.4 集成稳压器	241
9.4.1 三端固定式稳压器	241
9.4.2 三端可调式集成稳压器及其应用	244
9.4.3 开关型稳压电源简介	246
习题	249
第 10 章 晶闸管及其应用电路	252
10.1 晶闸管	252
10.1.1 晶闸管的结构、符号及工作原理	253
10.1.2 晶闸管的伏安特性及主要参数	255
10.2 单相可控整流电路	257
10.2.1 单相半波可控整流电路	258
10.2.2 单相桥式可控整流电路	259
10.3 单晶体管触发电路	262
10.3.1 单晶体管的结构及其性能	262
10.3.2 单晶体管张弛振荡器	264
10.3.3 单晶体管同步触发电路	265
10.4 双向晶闸管及其应用电路	265
10.4.1 双向晶闸管结构、符号及特性	266
10.4.2 用双向二极管构成触发电路的交流调压电路	267
习题	268

附录	270
附录 1 常用符号	270
附录 2 电阻标称阻值及允许误差	272
附录 3 电容标称容量和允许误差及额定工作电压	273
附录 4 国内外模拟集成电路常见产品代号一览表	274
主要参考文献	276

第1章 半导体二极管及其应用



知识点

- 半导体的基本知识
- 半导体二极管的结构、符号、主要特性和主要参数及识别与检测
- 半导体二极管的基本应用(包括整流滤波电路)
- 特殊二极管



难点

- 半导体的基本知识
- 半导体二极管内部的物理过程
- 半导体二极管的应用



要求

掌握:

- 半导体基本知识的结论
- 半导体二极管的结构、符号、主要特性和主要参数及识别与检测
- 半导体二极管的基本应用和整流滤波电路

了解:

- 半导体的基本知识
- 半导体二极管内部的物理过程
- 几种特殊的二极管及应用

1.1 半导体的基本知识

世界上的物质根据导电能力的不同,可分为导体(如金、银、铜、铁等)和绝缘体(如干燥的木头、玻璃等),还有一类物质它的导电能力介于导体和绝缘体之间,称为半导体。常用的半导体材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓等。

1.1.1 半导体的主要特性

1. 半导体的奇妙特性

在电工技术的发展史上,由于半导体既不是良好的导电材料,又不是可靠的绝缘材料,所以长期受到冷落。之所以后来得到广泛的应用,是因为人们发现了半导体具有以下三个奇妙且可贵的特性:

(1) 光敏特性

即半导体的导电能力对光照辐射很敏感。对半导体施加光线照射时,光照越强,等效电阻越小,导电能力越强。利用半导体的光敏性,可以制成光敏检测元件,如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管和光电池等,可用于路灯、航标灯的自动控制或制成火灾报警装置、光电控制开关等。

(2) 热敏特性

即半导体的导电能力对温度很敏感。温度升高,将使半导体的导电能力大大增强。例如,纯锗,温度每升高 10°C ,它的导电能力要增加一倍(电阻率会减少到原来的一半)。利用半导体对温度十分敏感的特性,可以制成自动控制中常用的热敏电阻(是负温度系数)及其他热敏元件。

(3) 掺杂特性

“杂质”可以显著改变(控制)半导体的导电能力。这里所说的“杂质”是指人为地、有目的地在纯净的半导体(通常称本征半导体)中掺入的极其微量的三价或五价元素(如硼、磷)。在本征半导体中掺入微量的杂质元素,则它的导电能力将大大增强。例如在纯硅中掺入一亿分之一的硼元素,其导电能力可以增加两万以上。利用掺杂半导体可以制造出晶体二极管、晶体三极管、场效应管、晶闸管和集成电路等半导体器件。这也说明,任何东西的特性本身无所谓好坏,主要是看人们如何去利用它们。

2. 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。用于制造半导体器件的纯硅和锗都是 4 价元素,其最外层原子轨道上有 4 个电子(称为价电子),如图 1.1 所示。

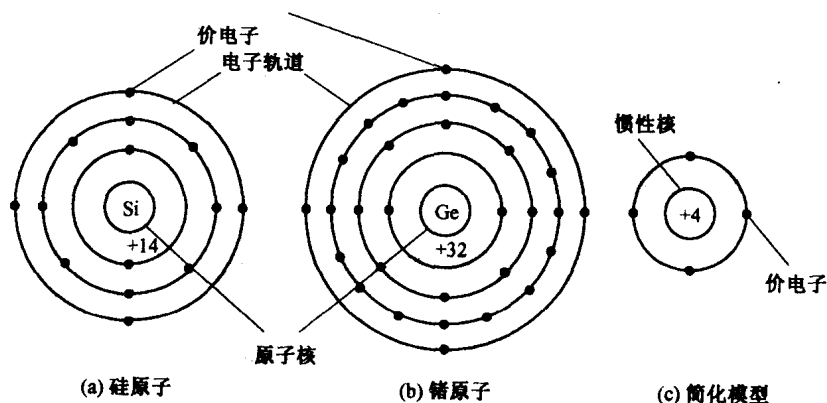


图 1.1 半导体的原子结构示意图

在单晶结构中,由于原子排列的有序性,价电子为相邻的原子所共有,形成图 1.2 所示的共价键结构,图中 +4 代表 4 价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。共价键中的价电子,将受共价键的束缚。在室温或光照下,少数价电子可以获得足够的能量从而摆脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1.3 所示,这种现象称为本征激发,这个空位称为空穴,可见本征激发产生的自由电子和空穴是成对出现的。

原子失去价电子后带正电,可等效地看成是有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空位发生转移,这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动,但其运动方向与价电子运动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时自由电子和空穴的浓度一定。

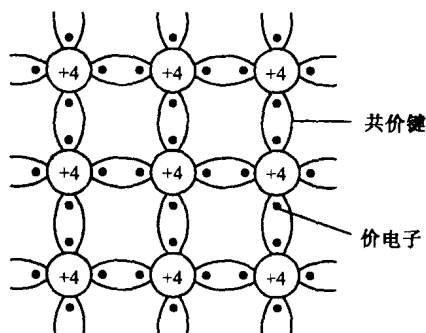


图 1.2 单晶硅的共价键结构

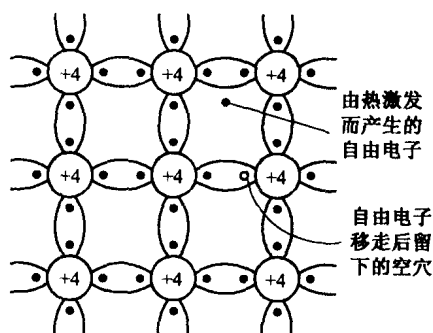


图 1.3 本征激发产生的电子空穴对

在电场作用下,自由电子和空穴将作定向运动,这种运动称为漂移,所形成的电流叫做漂移电流。因为半导体中有自由电子和空穴两种载流子(载有电荷,并能参与导电过程的粒子称为载流子)参与导电,分别形成电子电流和空穴电流,这一点与金属导体的导电机理不同。在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。不过,当本征半导体受到光或热的作用时,由于外界能量的激发,就有较多的共价键破裂成电子空穴对,从而涌现出大量的载流子,使得半导体的导电能力明显上升,呈现出半导体的光敏、热敏特性。

3. 掺杂半导体

本征半导体导电能力差,本身用处不大,但是在本征半导体中掺入某种微量的杂质,却可以大大改善它的导电性能。按照掺入杂质的不同,可分为N型和P型两种掺杂半导体,这两种半导体是制造各种半导体器件的基础材料(其中P是Positive(正)的第一个字母,N是Negative(负)的第一个字母)。

(1) N型(电子型)半导体

如果在本征硅中掺入微量的五价元素,例如磷(P)、砷(As)、锑(Sb)等。掺入的磷原子取代了某处硅原子的位置,它同相邻的4个硅原子组成共价键时,多出了一个电子,在室温下,有足够的能量使它成为自由电子,如图1.4(a)所示。这样,掺入多少杂质原子就能产生多少个自由电子,这样掺入磷杂质的硅半导体中就具有相当数量的自由电子,这种半导体主要靠电子导电,所以称为电子型半导体,简称N型半导体。掺入的五价杂质原子称为施主原子。每个施主原子给出一个自由电子后都带上一个正电荷,因此杂质原子都变成了正离子,它们被固定在晶格中不能移动,也不参加导电。这种施主正离子在图1.5(a)中用符号 $\oplus$ 表示,由杂质提供的自由电子仍用符号“ $\cdot$ ”表示。此外,在N型半导体中由于热运动也产生少量的电子空穴对。总之,在N型半导体中,不但有数量很多的自由电子而且也有少量的空穴存在,自由电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流