



iCourse · 教材

第二版

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

模拟电子技术基础

刘波粒 刘彩霞 主编

高等教育出版社



iCourse · 教材

第二版

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

模拟电子技术基础

刘波粒 刘彩霞 主编

高等教育出版社·北京

MONI DIANZI JISHU JICHU

内容简介

本书是在继承第一版基础上结合“爱课程”网上的“中国大学 MOOC”数字资源进行的修订。内容包括半导体二极管及其基本电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路与频率响应、放大电路中的反馈、功率放大电路、集成运算放大电路、集成运算放大电路的基本应用、信号发生电路、直流电源。为了便于个性化的自主学习,学习者可按照书中标注的微视频、教学 PPT、随堂测验、单元测验和作业、讨论题等内容,登录“爱课程”网(www.icourses.cn),在“中国大学 MOOC”上免费学习河北师范大学刘波粒教授主讲的“模拟电子技术基础”同步课程,从中感受“百集模电,学习体验”给您带来的前所未有的完整数字化学习套餐。

此外,配套资源还包括与本书同步的 Authorware 版教学课件和中文 PPT,还有各章习题详解。

本书可作为高等院校电气类、电子信息类、自动化类、计算机类专业模拟电子技术基础课程的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/刘波粒,刘彩霞主编.--2版

.--北京:高等教育出版社,2016.10

iCourse·教材

ISBN 978-7-04-046385-9

I. ①模… II. ①刘… ②刘… 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(2016)第 206048 号

策划编辑 平庆庆
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 平庆庆
责任校对 陈 杨

封面设计 李卫青
责任印制 赵义民

版式设计·马 云

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 25.25
字 数 600 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2013 年 6 月第 1 版
2016 年 10 月第 2 版
印 次 2016 年 10 月第 1 次印刷
定 价 46.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46385-00

第二版前言

“模拟电子技术基础”是电子电气信息类专业和部分非电类专业本科生在电子技术方面入门的必修课程。它以放大、信号运算与处理、振荡和直流电源为主要学习内容,是基础理论课程向专业工程类课程过渡的桥梁。

正当人们为如何学好“模拟电子技术基础”课程而担忧的时候,一种新的在线学习模式浮出水面,它就是“慕课(Massive Open Online Course, MOOC)”。目前,“微视频+学习体验”的这种新型学习模式 MOOC 已成为大学生和社会人士汲取知识、拓宽视野的重要途径之一。

为了使学习者尽快从以往的难学、难懂、难会、难用中解脱出来,“模拟电子技术基础”率先推出教材、慕课和其他网上配套资源三种同步学习载体,可满足不同学习者的需求,以适应新的教学模式之需。

1. 对于“模拟电子技术基础”教材

只有将教材建设与 MOOC 建设有机结合,才能焕发出传统教学的生命力,这也是第二版教材重点解决的问题。为此,第二版在第一版基础上结合“爱课程”网上的“中国大学 MOOC”数字资源进行了如下修订。

在教材内容上:

- 在放大电路中的反馈、功率放大电路和差分放大电路章节中,进一步提出局部电路的模块思想,揭示了电路组成的本质,在一定程度上解决了“电路多”的问题。
- 为了突出重点,教材采用了两色字体,并对部分内容进行了优化。
- 教材增加了场效应管的图解分析法,以便读者在比对中进一步理解双极型晶体管和场效应管组成的放大电路。

在教材编排上:

• 实现了教材内容与 MOOC 的一对一。学习者可按照课本中标注的微视频、随堂测验、PPT 课件、单元测验和作业、讨论题等内容,登录“爱课程”网,在“中国大学 MOOC”上免费学习河北师范大学刘波粒教授主讲的“模拟电子技术基础”同步课程。

- 增加了“导学”环节,旨在引导读者在问题引领下进行有效学习,提高自学效率。
- 将“中国大学 MOOC”中的“随堂测验”、“单元测验”、“讨论题”等内容搬到教材中,这样不仅便于读者进行单元学习,而且易于读者把握本课程知识的完整性。

2. 对于“模拟电子技术基础”慕课

与教材同步的数字化资源于 2015 年 9 月 1 日在教育部、财政部支持建设的中国大学精

品开放课程平台——“爱课程”网“中国大学 MOOC”上开课,是本课程在该平台的首发课程。它为学习者提供了丰盛的学习套餐。其中

在“微视频”方面:

微视频包含 100 个教学视频(即“百集模电”)和 3 个知识回顾视频,103 个微视频共计 11.5 小时。它将引领您在电路多、公式多、理解难、记忆难、应用难的知识长河中,感受 MOOC 给您带来的新视角、新感觉和新体验。

在教与学方面:

“爱课程”平台为学习者设置了随堂测验、教学 PPT、单元测验和作业、讨论题和在线答疑等互动环节。

相信您通过我们推出的“百集模电,学习体验”教学资源,必定会有较大的收获,同时也会从中感受“指尖上学习”的乐趣。

3. 对于与“模拟电子技术基础”配套的其他网上资源

其他网上配套资源包括:各章习题详解和教学课件(Authorware 版和中文 PPT)。

本教材由刘波粒、刘彩霞任主编,赵增荣、孙军英任副主编,分工情况与第一版相同。郭际负责 EWB 实验仿真,郭要军负责 Flash 动画制作。

在此特别感谢华北电力大学的刘向军老师对第二版教材进行了仔细的审阅并提出了宝贵的修改意见。并对所有帮助过我们的编辑、专家表示深深的感谢,特别是作为第一版教材主审的哈尔滨工业大学的王淑娟教授。

尽管我们倾注了极大的心血,但由于编者的能力和水平有限,且作为国内电类方面的首推慕课教材,无论是对慕课的认识、课程的理解,还是多年教学经验的积累方面,难免存在一定的局限性和不妥之处,甚至某些错误,敬请读者及时指出。编者联系方式 liuboli@126.com。

刘波粒
于 2016 年 3 月

第一版前言

模拟电子技术基础是电气、电子信息类专业和部分非电类专业学生在电子技术方面入门性质的必修课程,具有自身的体系和很强的实践性,是基础理论课程向专业工程类课程过渡的桥梁。然而,该课程却因其概念抽象、内容庞杂、难于理解、记忆困难、不会应用、学时有限等缘故表现出“教与学”的困难,2006年编者在国防工业出版社出版了《模拟电子技术》教材,尝试解决教与学的难点并初见成效。六年来,编者认真对待教材使用者的反馈信息,不断深入课程改革,在借鉴同类教材特别是经典教材的基础上,本着“精选内容、服务教学、力图创新”的原则,对原教材及课件进行了较大篇幅地改编,主要工作如下:

1. 教材

(1) 调整章节结构——便于教学

为了更好地服务教学,将“放大电路中的反馈”一章前移,可使初学者从反馈的角度理解功放电路、差放电路等课程内容。

(2) 突出设计思想——电路形成

在共射放大电路、功放电路、差放电路、有源滤波电路、整流电路等课程内容的编写上,本教材以电路形成的设计思想为线索,把看似庞杂的电路和知识有机地串接起来,使初学者感受到“创新”就在自己身边。

(3) 探求知识本源——理论归真

在课程改革中,编者提出了一些自己的见解。例如:①在原有“瞬时极性法”的基础上又定性地考虑了信号的大小,使正、负反馈的判断更为直观。②依据理想集成运放工作在线性和非线性特点,探索出3个方程的求解思路,从而揭示了集成运放应用的规律。

(4) 分析典型题型——深化概念

所选的典型题型尽可能涵盖前面讲述的课程内容。

(5) 构建知识结构——梳理归纳

在“本章小结”的“本章知识结构”中,以框架的形式呈现课程脉络。

(6) 浓缩教学经验——记识技巧

在“本章小结”的“本章知识要点及技巧”中,为初学者指出了应掌握的知识要点以及如何记忆。其中,电量符号“倒读”方式表达其物理含义,场效应管放大电路动态指标的巧记,深度负反馈放大倍数的估算和反馈深度对负反馈放大电路性能的影响,差放电路的组合方式,三角波周期计算公式等,都源于编者多年的教学经验。

(7) 附带习题详解——适于自学

为了便于自学,编者提供了教材中的自测题和习题详细的参考答案。

2. 课件

(1) 板书演示——展现教学精华

为了展现本课程知识要点,编者以多媒体的形式将课程内容高度概括。在一定程度上缓解了目前课程内容多与学时少之间的矛盾。

(2) 动画演示——体现形象教学

依据课程特点,编者精心制作了配有解说词的 30 多个动画。

(3) 仿真演示——模拟实践教学

EWB 仿真软件实现了理论与实践教学的同步,为初学者理解和掌握电路参数设定、动态波形观察、电路性能分析开辟了广阔的空间。

本教材由刘波粒、刘彩霞任主编;赵增荣、孙军英、玄金红、杨丽坤任副主编,具体分工如下:刘波粒编写 1~7 章,统稿,课件创意;刘彩霞编写 8~10 章,全书校对,制作 Authorware 版和中文版 PPT 课件;赵增荣编写 1~7 章习题及答案,动画解说词;孙军英编写 8~10 章习题及答案,制作英文版 PPT 课件;玄金红和杨丽坤分别编写 1~7 章和 8~10 章自测题及答案;郭际负责 EWB 实验仿真;郭要军和吴立勋负责 Flash 动画制作。

随书光盘将提供 3 个课件以及教材中自测题和习题的详解。EWB 仿真获北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司的正式授权。

在此特别感谢高教社高等教育理工出版事业部李慧老师对本教材出版的关注和支持。特别感谢北京联合大学王传新教授、长安大学林涛教授、哈尔滨工业大学王淑娟教授分别对本教材的推荐、初审和复审,以及他们提出的宝贵意见。

由于编者的能力和水平有限,本教材难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正,以便今后不断改进。编者联系方式:liuboli@126.com。

主编

2012 年 12 月

本书常用符号说明

一、符号规定

1. 电流和电压(以双极型晶体管为例,其他电流、电压可类比)

$I_B, I_C, I_E, U_{BE}, U_{CE}$ 大写字母、大写下标,表示直流量

$i_b, i_c, i_e, u_{be}, u_{ce}$ 小写字母、小写下标,表示交流瞬时值

$\dot{i}_B, \dot{i}_C, \dot{i}_E, u_{BE}, u_{CE}$ 小写字母、大写下标,表示总瞬时值

$I_b, I_c, I_e, U_{be}, U_{ce}$ 大写字母、小写下标,表示交流有效值

$\dot{I}_b, \dot{I}_c, \dot{I}_e, \dot{U}_{be}, \dot{U}_{ce}$ 大写字母上面加点、小写下标,表示正弦相量

2. 电阻

R 大写字母表示电路中的电阻或等效电阻

r 小写字母表示器件的等效电阻

二、基本符号

符号	含义	符号	含义
A	集成运放	C_b	势垒电容
A_f	反馈放大器的闭环放大倍数	C_D	扩散电容
A_i	放大器的电流放大倍数	C_j	PN 结结电容
A_u	放大器的电压放大倍数	C_{π}	BJT 发射结等效电容
A_{uc}	放大器的共模电压放大倍数	C_{μ}	BJT 集电结等效电容
A_{ud}	放大器的差模电压放大倍数	c	BJT 的集电极
A_{uf}	反馈放大器的电压放大倍数	D	二极管
A_{um}	放大器的中频电压放大倍数	d	FET 的漏极
A_{uo}	放大器的开环电压放大倍数	e	BJT 的发射极
A_{us}	放大器的源电压放大倍数	F	反馈系数
BJT	双极型晶体管	f	频率
BW	频带宽度、通频带	FET	场效应管
b	BJT 的基极	f_H	上限频率
C	电容	f_L	下限频率

续表

符号	含义	符号	含义
f_o	谐振频率,中心或转折频率	r_{ds}	FET 的输出电阻
f_T	特征频率	R_i	放大电路交流输入电阻
G	增益,电导	R_o	放大电路交流输出电阻
g	FET 的栅极	R_p	滑动变阻器
g_m	跨导	R_+, R_-	运放同相、反相输入电阻
I, i	电流	S	输出电压的脉动系数
I_{CBO}	e 开路, c-b 间的反向饱和电流	s	FET 的源极, 西门子
I_{CEO}	b 开路, c-e 间的穿透电流	T	BJT 或 FET
I_{CM}	BJT 最大集电极电流	T	周期, 热力学温度
I_{DSS}	FET 的饱和漏电流	Tr	变压器
I_F	正向电流	U_D	二极管导通压降
I_i	输入电流	U_i, u_i	输入电压
I_R	反向电流	U_R	参考电压, 基准电压
I_S	反向饱和电流, 信号源电流	U_P	FET 的夹断电压
I_o	输出电流	U_T	FET 的开启电压
i_+, i_-	运放同相、反相输入电流	U_{th}, U_{TH}	死区电压、阈值电压
J_e, J_c	BJT 的发射结和集电结	U, u	电压
K_{CMR}	差放电路的共模抑制比	$U_{(BR)CEO}$	b 开路时 c-e 间的反向击穿电压
k	玻尔兹曼常数	u_{ic}, u_{id}	共模、差模输入电压
L	电感、电感系数	u_x, u_y	模拟乘法器 X、Y 端输入电压
M	互感、互感系数	u_+, u_-	运放同相、反相输入电压
N	绕组匝数	V_{BB}	BJT 放大器的基极电源
n, n_i	电子浓度、本征半导体电子浓度	V_{CC}	BJT 放大器的集电极电源
P	功率	V_{EE}	BJT 放大器的发射极电源
P_e	损耗功率	V_{DD}	FET 放大器的漏极电源
P_{CM}	最大集电极耗散功率	V_{GG}	FET 放大器的栅极电源
P_o	输出功率	V_{SS}	FET 放大器的源极电源
P_{VCC}	电源功率	X	电抗, 反馈框图中的信号量
p, p_i	空穴浓度、本征半导体空穴浓度	Z	阻抗
Q	静态工作点, 品质因数	α	共基极电流放大倍数
q	电子的电荷量	β	共发射极电流放大倍数
R	电阻	η	效率
$r_{bb'}$	BJT 基区体电阻	φ	相位差
r_{be}	BJT 的输入电阻	ω	角频率
r_{ce}	BJT 的输出电阻		

目 录 (100 个微视频)

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 半导体和本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.2 PN 结的形成及特性	6
1.2.1 PN 结的形成及其单向导电性	6
1.2.2 PN 结的伏安特性和电容效应	9
1.3 半导体二极管	11
1.3.1 认识二极管	11
1.3.2 二极管的特性及主要参数	12
1.4 非线性电路的分析方法	15
1.5 特殊二极管	20
本章小结	26
习题	27
第 2 章 双极型晶体管及其基本放大电路	29
2.1 晶体管及其特性	29
2.1.1 认识晶体管	29
2.1.2 放大状态下晶体管内部载流子的传输过程	31
2.1.3 晶体管的电流分配关系	33
2.1.4 晶体管的共射特性曲线	34
2.1.5 晶体管的主要参数及温度对特性曲线的影响	37
2.2 放大电路的主要性能指标及组成原则	39
2.2.1 放大电路的主要性能指标	40
2.2.2 基本放大电路的组成原则	43
2.3 放大电路的特点	46
2.4 放大电路的图解分析法	48
2.4.1 放大电路的静态分析	48
2.4.2 放大电路的动态分析	51
2.4.3 放大电路的非线性失真	53
2.5 放大电路的等效电路法	58
2.5.1 固定偏置共射放大电路的静态分析	58
2.5.2 晶体管 H 参数等效模型	60
2.5.3 固定偏置共射放大电路的动态分析	62
2.6 工作点稳定共射放大电路	65
2.6.1 分压式共射放大电路的形成	65
2.6.2 分压式共射放大电路的等效电路法	68
2.7 共集基本放大电路	73
2.8 共基基本放大电路	77
本章小结	81
习题	83

第3章 场效应管及其基本放大电路	86	4.3.2 一阶 RC 电路的频率响应	134
3.1 场效应管的类型与结型场效应管	86	4.4 晶体管高频小信号等效模型	137
3.1.1 场效应管简介/认识结型场效应管	86	4.5 固定偏置共射放大电路的频率响应	143
3.1.2 N 沟道结型场效应管的工作原理	88	4.5.1 表达式分析	143
3.1.3 N 沟道结型场效应管的特性曲线	90	4.5.2 波特图分析	146
3.2 绝缘栅型场效应管	92	4.6 分压式静态工作点稳定共射放大电路的频率响应	148
3.2.1 认识绝缘栅型场效应管	93	4.7 直耦共射电路和多级放大电路的频率响应	152
3.2.2 N 沟道 MOS 管的工作原理	94	本章小结	158
3.2.3 N 沟道 MOS 管的特性曲线	96	习题	159
3.3 各种场效应管的特性比较	97	第5章 放大电路中的反馈	162
3.4 场效应管的主要参数及小信号等效模型	100	5.1 反馈的基本概念	162
3.5 共源基本放大电路	102	5.1.1 反馈概念的建立	162
3.5.1 自偏压式共源放大电路	103	5.1.2 反馈极性及其判断	164
3.5.2 分压式共源放大电路	108	5.2 交流负反馈放大电路的四种组态	169
3.6 共漏基本放大电路	111	5.3 负反馈对放大电路性能的影响	173
本章小结	116	5.3.1 负反馈对放大电路性能的改善	173
习题	118	5.3.2 正确引入负反馈的一般原则	177
第4章 多级放大电路与频率响应	120	5.4 深度负反馈放大电路的分析计算	179
4.1 多级放大电路	120	5.5 负反馈放大电路的稳定问题	185
4.1.1 多级放大电路的级间耦合方式	120	本章小结	191
4.1.2 多级放大电路的组成与分析方法	123	习题	193
4.2 集成运放的组成框图与电路符号	130	第6章 功率放大电路	196
4.3 放大电路的频率响应	131	6.1 功率放大电路的要求与分类	196
4.3.1 频率响应的基本概念	132	6.2 OCL 互补对称功率放大电路	199
		6.2.1 双电源功率放大电路	

的形成	199	电路	280
6.2.2 OCL 功率放大电路主要 参数的估算	202	8.6 模拟乘法电路及其应用	282
6.3 OTL 互补对称功率放大 电路	207	8.7 有源滤波电路	288
6.4 复合管及其准互补对称 功率放大电路	210	8.7.1 滤波电路概述	288
6.5 其他类型的功率放大电路	214	8.7.2 一阶低通有源滤波电路	290
本章小结	219	8.7.3 二阶低通有源滤波电路	292
习题	221	8.7.4 其他形式的有源滤波 电路	295
第 7 章 集成运算放大电路	224	8.8 电压比较器	298
7.1 集成运放的电路特点	224	8.8.1 单限比较器	298
7.2 集成电路中的电流源电路	226	8.8.2 滞回比较器	300
7.3 基本差分放大电路及其 特性	229	8.8.3 窗口与集成电压比较器	304
7.4 长尾式差分放大电路	233	本章小结	309
7.4.1 长尾式差放电路的形成 与静态分析	233	习题	310
7.4.2 长尾式差放电路的差模 动态分析	235	第 9 章 信号发生电路	315
7.4.3 长尾式差放电路的共模 动态分析	238	9.1 正弦波振荡电路的基本 概念	315
7.5 恒流源式差分放大电路	242	9.2 RC 正弦波振荡电路	318
7.6 其他类型的差分放大电路	244	9.3 LC 正弦波振荡电路	323
7.7 集成运算放大电路简介	248	9.3.1 LC 并联谐振回路	324
7.7.1 集成运放 F007 的电路 分析	249	9.3.2 变压器反馈式 LC 振荡 电路	326
7.7.2 集成运放的特性与选用	251	9.3.3 三点式振荡电路的组成 原则与电感三点式振荡 电路	328
本章小结	258	9.3.4 电容三点式振荡电路	331
习题	260	9.4 石英晶体正弦波振荡电路	336
第 8 章 集成运算放大电路的 基本应用	264	9.5 非正弦波发生电路	339
8.1 理想集成运放的分析方法	264	9.5.1 基本概念	339
8.2 比例运算电路	267	9.5.2 方波和矩形波发生电路	341
8.3 加法与减法运算电路	271	9.5.3 三角波和锯齿波发生 电路	344
8.4 积分与微分运算电路	276	本章小结	351
8.5 对数与反对数(指数)运算 电路	280	习题	352
8.6 模拟乘法电路及其应用	282	第 10 章 直流电源	356
8.7 有源滤波电路	288	10.1 直流电源的组成	356
8.7.1 滤波电路概述	288	10.2 单相整流电路	357
8.7.2 一阶低通有源滤波电路	290		
8.7.3 二阶低通有源滤波电路	292		
8.7.4 其他形式的有源滤波 电路	295		
8.8 电压比较器	298		
8.8.1 单限比较器	298		
8.8.2 滞回比较器	300		
8.8.3 窗口与集成电压比较器	304		
本章小结	309		
习题	310		

10.3 滤波电路	362	10.4.4 开关型稳压电路	379
10.4 稳压电路	368	本章小结	384
10.4.1 并联型稳压电路	368	习题	385
10.4.2 串联反馈型稳压电路	370	主要参考文献	389
10.4.3 集成三端稳压器	375		

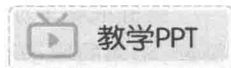
第 1 章 半导体二极管及其基本电路

电子技术是一门研究电子器件、电子线路及其应用的科学技术,其中电子器件包括半导体二极管、半导体三极管、集成电路等。

PN 结是组成各种半导体器件的基础,由一个 PN 结组成的器件称为半导体二极管。为此,本章首先介绍半导体的基本概念、PN 结的形成等基础知识;其次讨论半导体二极管的结构、特性及等效电路,并分析由二极管组成的限幅电路等;最后介绍特殊类型的半导体二极管。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体和本征半导体



导学

何谓半导体,它具有哪些特性?

何谓本征半导体,它具有怎样的结构?

何谓本征激发,它体现了半导体的哪些特性?

1. 半导体是电子技术的主要角色

根据物质导电能力的强弱,可以把物质分为导体、半导体和绝缘体三大类。例如日常使用的电线,其内芯使用了易导电的铜或铝等金属,称为导体;为了安全起见,电线的包皮常使用不导电的 PVC 等,称之为绝缘体。除上述两类物质外,还有一种是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,常称之为半导体(Semiconductor),如硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。其中硅是目前最常用的一种半导体材料。

半导体之所以得到广泛的应用,是因为它具有独特的光敏性、热敏性和掺杂性。例如,利用其光敏性可以制成光敏电阻、光电二极管和光电三极管等,利用其热敏性可以制成热敏电阻传感器等;利用其掺杂性可以制成二极管、三极管和集成电路等。

那么半导体为什么具有这些奇妙的特性呢?这就需要我们进一步认识半导体。

2. 本征半导体及其特性

(1) 本征半导体的概念

从元素周期表可知,常用的半导体材料硅和锗的原子序号分别为 14 和 32,电子形成若干层的轨道围绕原子核旋转,把最外层轨道上的电子称为价电子,对应的原子结构示意图如图 1.1.1(a)所示。为了便于表示原子的内部结构并突出价电子,常把原子核和内层电子看作一个整体,称为惯性核,如图 1.1.1(b)所示。图中,惯性核带 4 个正电荷,位于中心;外层 4 个价电子位于以惯性核为中心的等径球面上。显然,用硅和锗的简化模型讨论问题时,不必提及是硅还是锗,这样可以使问题简化。

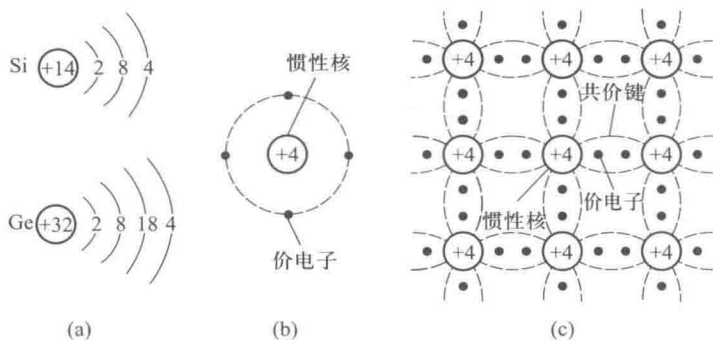


图 1.1.1 半导体内部结构示意图

(a) 原子结构 (b) 简化模型 (c) 单晶体结构

当硅或锗原子形成晶体时,原子在空间形成排列整齐的点阵,称为晶格。各原子之间靠得很近,相邻的原子相互影响,使原来分属于每个原子的价电子为两个原子所共有,形成共价键。为了直观起见,通常用简化模型绘出单晶体共价键结构的二维平面图,如图 1.1.1(c)所示,实际上半导体晶体结构是三维的。由于半导体材料必须制成单晶体才能用来制作半导体器件,故半导体器件又称为晶体器件,如晶体二极管、晶体三极管等。

图 1.1.1(c)所示的这种只含单一原子,不含杂质而且结构完整的单晶体,即纯净的具有单晶体结构的半导体称为本征(Intrinsic)半导体,也称 I 型半导体。

(2) 本征半导体的特性

① 两种载流子

在图 1.1.2(a)中,共价键好似“锁链”一样将两个价电子牢牢地束缚其中,因此在常温下仅有极少数的价电子由于热激发获得足够的随机能量,从而挣脱共价键束缚变为自由电子;同时,失去电子的原子便在原共价键处留下带一个单位正电荷的空位,叫空穴。人们常将半导体在热激发下产生成对的自由电子和空穴的现象称为本征激发,即产生电子-空穴对。当某一原子共价键上的价电子成为自由电子填补某空穴时(即电子和空穴成对消失——“复合”),又在该原子共价键处产生新的空穴,相当于带正电的空穴在移动。人们把

承载正、负电荷的可移动的空穴和电子统称为载流子。可见,在电场作用下,半导体中将有自由电子和空穴两种载流子参与导电。这与导体导电不同,空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

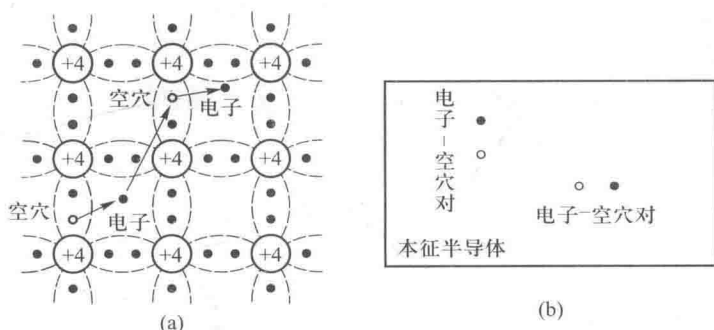


图 1.1.2 本征半导体中的自由电子和空穴

(a) 电子和空穴的移动 (b) 本征激发产生的电子-空穴对

② 载流子浓度

在一定温度下,当载流子的产生和复合运动达到动态平衡时,电子-空穴对达到一定浓度,如图 1.1.2(b)所示,其中电子用“点”表示,空穴用“小圆圈”表示。本征半导体的载流子浓度为

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (1.1.1)$$

式中, n_i 中的 n 表示自由电子(Negative,阴性的)的浓度, n_i 中的下标 i 表示本征半导体, n_i 合起来则表示为“本征半导体自由电子的浓度”,显然它是按照从右到左的“倒读”方式表示其物理含义。由此推知, p_i 表示“本征半导体空穴(Positive,阳性的)的浓度。本教材大多数用字母表示的物理量之含义皆可按“倒读”的方式理解。 A 是与半导体材料有关的常数, T 为热力学温度(K), k 为玻耳兹曼常数, E_g 为价电子摆脱共价键束缚成为自由电子时所需要的电离能。在此对式(1.1.1)进行如下分析:

a. 当 $T=0$ K(即热力学零度,对应于 -273°C)时, $n_i = p_i = 0$ 。表明半导体中无载流子,如同绝缘体。

b. 当 $T>0$ K,即温度升高时, n_i 、 p_i 增大,导电能力增强。显然,在本征半导体中,载流子的浓度对温度十分敏感,这正是半导体的热(或光)敏特性。但在室温时,由于载流子数目极少,致使本征半导体的导电能力很差,无法用于制造电子器件,即无实用价值。



随堂测验

- 在电子器件中,用的最多的半导体材料是硅,其原子序号为_____。
A. 4; B. 14; C. 24; D. 32。
- 在室温下,本征半导体中的载流子数目_____。
A. 很多; B. 较多; C. 较少; D. 极少。
- 在本征半导体中,本征激发产生的载流子是_____。
A. 自由电子; B. 空穴; C. 正负离子; D. 自由电子和空穴。

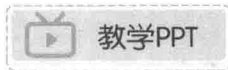
4. 在热力学零度时,本征半导体相当于_____。

- A. 导体; B. 超导体; C. 绝缘体; D. 半导体。

5. 本征激发体现了半导体的_____特性。

- A. 光敏性; B. 热敏性; C. 掺杂性; D. 光敏性和热敏性。

1.1.2 杂质半导体



导学

本征半导体与杂质半导体有何差别?

P型和N型半导体有何不同?它们带电吗?

杂质半导体中的少子是如何产生的?

1. 杂质半导体的概念

本征半导体之所以导电能力很差是因为它“太纯净”了,如果在本征半导体中掺入适量杂质,即人为地添加载流子的数目,其效果势必增大半导体的导电能力,因此将掺杂后的半导体形象地称为杂质半导体。所谓掺杂是将可控数量的杂质掺入到本征半导体中,它体现了半导体的掺杂特性。

2. 杂质半导体的类型

按所掺入杂质的性质不同,杂质半导体可分为P型半导体和N型半导体两种。

(1) P型半导体

在本征半导体中掺入适量的三价杂质元素(如硼、镓),它将会取代晶格中的某些四价本征原子(硅或锗)的位置,构成P型半导体。图1.1.3(a)示出了三价杂质原子在晶格中分布的平面示意图。

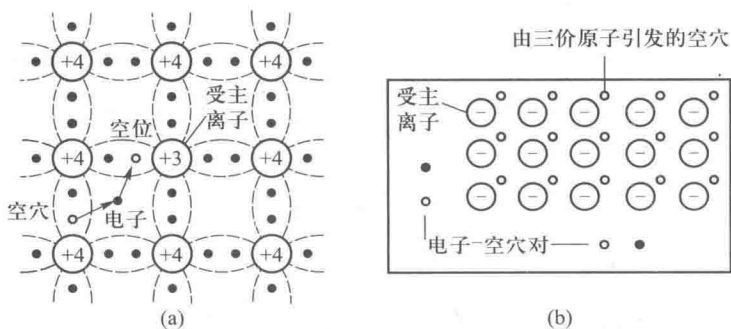


图 1.1.3 P型半导体的原子结构及其示意图

(a) P型半导体原子结构 (b) P型半导体示意图

由于掺入的三价杂质原子只有三个价电子,当每个三价杂质原子与周围的四价本征原子组成共价键时,因缺少一个价电子而出现一个空位(空位为电中性)。在常温下,本征原子共价键中的价电子很容易填补此空位,使杂质原子获得电子而成为不能移动的带负电的受