



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

模拟电路分析与设计基础

吴援明 唐 军 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国科学院电子信息与通信系列规划教材

模拟电路分析与设计基础

吴援明 唐 军 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分9章,主要内容为:半导体材料及二极管;双极型晶体三极管;晶体三极管放大电路基础;场效应管及其放大电路;放大器的频率响应;模拟集成单元电路;负反馈技术;集成运算放大器;集成运放电路的应用与设计。

本书取材较新、重点突出、循序渐进,理论与工程计算并重,注重基本功能电路的分析和设计方法。书中例题丰富,每章末均有小结,便于自学。

本书可作为高等院校电气、电子信息类专业电子技术课程的教材,也可作为从事电子技术工作的工程技术人员及电子技术爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路分析与设计基础/吴援明,唐军主编.北京:科学出版社,2006

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 7-03-017431-3

I. 模… II. 吴… III. ①模拟电路-电路分析-高等学校-教材②模拟电路-电路设计-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 062735 号

责任编辑:马长芳 资丽芳 杨 然/责任校对:张 琪

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:28

印数:1—3 000 字数:530 000

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》 编委会

顾问：保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主任：谈振辉 教授 北京交通大学

副主任：任晓敏 教授 北京邮电大学
梁昌洪 教授 西安电子科技大学
冯正和 教授 清华大学
张文军 教授 上海交通大学
林 鹏 编审 科学出版社

委员：(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学
顾学迈 教授 哈尔滨工业大学
洪 伟 教授 东南大学
焦李成 教授 西安电子科技大学
李少谦 教授 电子科技大学
毛军发 教授 上海交通大学
沈连丰 教授 东南大学
唐朝京 教授 国防科技大学
王成华 教授 南京航空航天大学
王文博 教授 北京邮电大学
徐安士 教授 北京大学
姚 彦 教授 清华大学
严国萍 教授 华中科技大学
杨建宇 教授 电子科技大学
张宏科 教授 北京交通大学
张晓林 教授 北京航空航天大学

秘 书：段博原 编辑 科学出版社

丛 书 序

信息技术的高速发展及其广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要
的战略技术。信息技术对经济建设、社会变革、国家安全乃至整个国家的发展起到
关键性的作用,它是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力
的重要标志。在人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深
刻的变革。在 20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术
驱动力,可以说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在
由先导产业逐步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源
和材料的消耗减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生
产总值(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是
衡量该国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了
“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优
先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息
产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展
离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关
调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据
权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5%的年复合增长率
高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。在信息化发展势头的带动下,
我国信息化人才缺乏已经成为制约信息产业发展的重要因素。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、
素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信
息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建
设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委
员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共
同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程
等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的较

高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识点之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

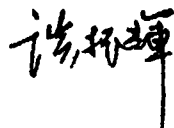
4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长



2005年10月

前 言

模拟电路是电子信息工程技术中的重要基础,主要包括半导体二极管、双极型晶体三极管(BJT)、场效应管(FET)和集成运算放大器的工作原理及它们所构成的基本电路和应用电路。

本书以放大电路为主,详细阐述了BJT和FET的直流等效模型和交流小信号等效模型,放大电路的直流偏置电路和交流小信号等效电路,放大电路交流性能指标(增益、输入电阻和输出电阻、频率特性参数等)的分析,以及由性能指标设计放大电路的方法等。对放大电路的频率特性参数(如转折频率、通频带)进行了重点分析,讨论了转折频率和通频带的计算方法。在基本的小信号放大电路的基础上,讲述了差动放大电路、大信号的功率放大电路和集成运算放大电路。本书还着重分析了负反馈技术对改善放大电路性能的作用,讨论了负反馈放大电路的设计方法。

除了放大电路外,本书还介绍了二极管的应用电路(如整流电路、限幅电路、稳压电路等)、电流源电路和由集成运算放大电路构成的多种应用电路。

在内容选择与编排、重点与难点的阐述方式等方面,本书力争体现以下三个特点:

(1) 精心选择教学内容,吸收新的理论成果,重点放在集成电路设计所需要的模拟电路基础知识上。

近年来,我国集成电路设计与制造工业发展迅速,急需大量的集成电路设计人才。模拟电路是集成电路设计的基础,因此本书用较大的篇幅(第4章和第6章)讲述构成集成电路的主要元件(MOSFET)和基本单元电路(电流源、有源负载、差动放大电路、功率放大电路)的工作原理、分析方法和设计方法,为集成电路设计打好基础。

在放大电路频率特性的分析上,我们抓住频率特性的关键点,将主要的篇幅用于转折频率的分析和计算上。吸收新的理论成果,采用短路或开路时间常数法估算转折频率,分析电路各元件对转折频率的影响。这样既避免了等效电路法和频域分析法的复杂性,又将读者的注意力集中在关键参数的物理意义上,帮助读者建立清晰的频率特性概念。

(2) 突出重点难点内容,分析问题深入透彻,引入大量的例题帮助读者领会基本概念及基本方法。

在内容编排上,力争重点突出,对重点内容进行深入细致的分析和总结。例如,在BJT、MOSFET和集成电路的直流模型和交流小信号模型的线性化建模过

程中,工程近似是重点内容之一,本书进行了详尽的叙述,使读者在理论的指导下建立工程近似的概念。再如集成运算放大器的四种主要应用(有源滤波器、振荡器、施密特触发器、波形发生器)也是本教材的重点,本书用较大的篇幅阐述了这四种应用电路的分析和设计方法。

对于难点内容,本书借助必要的理论和方法,进行深入透彻的分析和总结,通过大量的例题,使读者在深入理解的基础上掌握难点内容。例如,在四种反馈放大器的分析过程中,求 A 电路和 B 电路的方法是本教材的难点。本书除了对此进行了详细的分析外,还进行了很好的总结。再如对电流源和有源负载电路的分析和设计,也花了较大篇幅讲述电流源的重要参数(内阻)的计算和有源负载如何改变放大电路的性能。

(3) 注重系统分析方法,借助电路、信号与系统的分析理论,改进了负反馈电路的分析与设计方法。

负反馈技术一直是模拟电路的主要内容之一。大部分教材在讲述负反馈的基本原理后,介绍负反馈类型的判定方法,最后介绍深度负反馈的计算。本书采用系统分析法,利用信号与系统的理论,采用方框图的形式讲述四种反馈放大器的简化模型及模型的建立方法,进而利用电路分析的方法求解一般反馈放大器(而不仅仅限于深度负反馈放大器)的增益、输入电阻和输出电阻等交流参数。这种方法在负反馈电路的设计中更具有普遍的指导意义。

总之,编者力图给读者展现一本既体现新技术的基础内容又将重点难点分析透彻的模拟电路教材。

本书由电子科技大学模拟电路课程首席教师吴援明教授主编和统稿。唐军老师编写和校对了 1~3 章的主体内容及 1~4 章的习题,吴援明教授编写和校对了 4~9 章的主体内容,曲健副教授编写和校对了 5~9 章的习题,并对 7~9 章的主体内容进行了初步校对。官安全、张琨、杨素军、张颖等同志参加了文稿的录入工作。在此,向他们表示感谢!

本书在编写过程中,得到了电子科技大学教务处的支持,吸纳了电子科技大学模拟电路课程组三十多位教师的教研成果和有益建议。在此,谨向他们表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者不吝指正。

吴援明
于电子科技大学
2006 年 7 月

目 录

第 1 章 半导体材料及二极管	1
1.1 半导体材料及其特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 半导体中的电流	6
1.2 PN 结	7
1.2.1 PN 结的形成及特点	7
1.2.2 PN 结的单向导电特性	9
1.3 晶体二极管及其应用.....	11
1.3.1 晶体二极管的伏安特性	12
1.3.2 二极管的直流电阻和交流电阻	15
1.3.3 二极管模型	17
1.3.4 二极管应用电路	19
1.3.5 稳压管及其应用	24
1.3.6 PN 结电容效应及应用	29
1.3.7 特殊二极管	33
复习题	36
习题一	37
第 2 章 双极型晶体三极管	43
2.1 BJT 工作原理	43
2.1.1 BJT 结构与符号	43
2.1.2 放大状态下 BJT 内部载流子的传输过程	44
2.1.3 放大偏置 BJT 偏压与电流的关系	47
2.2 BJT 的静态特性曲线	48
2.2.1 共射输入特性曲线	48
2.2.2 共射输出特性曲线	49
2.2.3 温度对 BJT 特性及参数的影响	50
2.3 BJT 主要参数	51
2.3.1 直流参数	51
2.3.2 交流参数	52
2.3.3 极限参数	53

2.4	BJT 简化直流模型及工作状态分析	55
2.4.1	BJT 的简化直流模型	55
2.4.2	BJT 工作状态分析	57
2.5	BJT 交流小信号模型	59
	复习题	63
	习题二	63
第3章	BJT 放大电路	69
3.1	放大电路的基本组成和分析方法	69
3.2	BJT 放大偏置电路	72
3.3	BJT 三种基本组态放大电路交流特性的分析	77
3.4	多级放大电路	90
	复习题	99
	习题三	99
第4章	MOSFET 及其放大电路	113
4.1	N 沟道增强型 MOSFET 的结构和工作原理	114
4.1.1	结构	114
4.1.2	工作原理	115
4.1.3	输出特性曲线	116
4.1.4	电流-电压关系	118
4.2	MOSFET 的偏置电路	119
4.2.1	分离 MOSFET 电路的直流偏置	119
4.2.2	集成 MOSFET 电路的直流偏置	123
4.3	MOSFET 放大电路的交流电路	128
4.3.1	MOSFET 放大电路的线性化分析原理	128
4.3.2	MOSFET 放大电路的线性化模型的交流参数	129
4.3.3	MOSFET 放大电路的交流小信号线性模型	131
4.4	MOSFET 放大电路的三种基本组态	133
4.4.1	共源极放大器	133
4.4.2	源极跟随器	140
4.4.3	共栅极放大器	144
4.4.4	三种基本放大器组态的总结与比较	147
4.5	单级集成 MOSFET 放大器	148
4.6	MOSFET 多级放大器	151
4.7	其他类型的场效应管	156
4.7.1	P 沟道增强型 MOSFET	156
4.7.2	N 沟道耗尽型 MOSFET	162

4.7.3 P沟道耗尽型 MOSFET	166
4.7.4 JFET	167
4.8 小结	172
复习题	174
习题四	174
第5章 放大器的频率响应	188
5.1 放大器的增益函数与转折频率	189
5.2 转折频率的另一种求法——时间常数法	194
5.2.1 高频等效电路——开路时间常数法求 ω_H	194
5.2.2 低频等效电路——短路时间常数法求 ω_L	197
5.3 双极型晶体管的频率响应	202
5.3.1 双极型晶体管的高频小信号模型	202
5.3.2 特征频率	202
5.3.3 Miller 效应和 Miller 电容	203
5.4 场效应管的频率响应	206
5.4.1 场效应管的高频小信号模型	206
5.4.2 特征频率	207
5.4.3 Miller 效应和 Miller 电容	207
5.5 晶体管放大电路的高频响应	209
5.5.1 共基极放大器的高频响应	210
5.5.2 射极跟随器的高频响应	213
5.6 多级放大器上、下转折频率的计算方法	216
5.7 小结	217
复习题	218
习题五	219
第6章 模拟集成单元电路	224
6.1 集成电流源	224
6.1.1 双极型晶体管电流源	224
6.1.2 场效应管电流源	236
6.2 有源负载电路	243
6.2.1 BJT 有源负载电路	244
6.2.2 MOSFET 有源负载电路	245
6.3 差动放大器	246
6.3.1 BJT 差动放大器的组成原理	246
6.3.2 BJT 差动放大器的直流分析	251
6.3.3 BJT 差动放大器的交流小信号分析	252

6.3.4	带负载时的 BJT 差动放大器	257
6.3.5	电路不对称的 BJT 差动放大器	259
6.4	MOSFET 差动放大器	262
6.4.1	直流分析	262
6.4.2	交流小信号分析	265
6.5	有源负载差动放大器	266
6.5.1	直流分析	267
6.5.2	小信号分析	267
6.6	差动放大器的频率响应	275
6.6.1	差模输入时的情况	275
6.6.2	共模输入时的情况	275
6.7	功率放大器	277
6.7.1	功率管的极限参数	278
6.7.2	功率放大器的分类	280
6.8	小结	294
	复习题	295
	习题六	295
第 7 章	负反馈技术	302
7.1	通用反馈结构	302
7.2	负反馈对放大器性能的影响	304
7.2.1	稳定放大器的增益	304
7.2.2	扩展通频带	305
7.2.3	提高输出信噪比	306
7.2.4	减小非线性失真	308
7.3	四种基本反馈放大器的结构	310
7.3.1	电压放大器	310
7.3.2	互阻放大器	311
7.3.3	跨导放大器	311
7.3.4	电流放大器	311
7.4	电压放大器(电压取样电压求和负反馈放大器)	311
7.4.1	理想模型	311
7.4.2	实际模型	313
7.5	互阻放大器(电压取样电流求和负反馈放大器)	321
7.6	跨导放大器(电流取样电压求和负反馈放大器)	328
7.7	电流放大器(电流取样电流求和负反馈放大器)	335
7.8	四种反馈类型的放大器电路特性总结	343

7.9 负反馈放大器的稳定性	348
7.9.1 反馈放大器稳定性判断	348
7.9.2 增益裕量和相位裕量	349
7.9.3 补偿技术	351
7.10 小结	356
复习题	356
习题七	357
第8章 集成运算放大器	362
8.1 集成运放的模型与理想特性	362
8.2 集成运放的线性应用——理想模型分析法	364
8.2.1 同相放大器	364
8.2.2 同相加法器	366
8.2.3 反相放大器	367
8.2.4 反相加法器	369
8.2.5 加减法电路	369
8.2.6 差动放大器	370
8.2.7 电流-电压转换器和电压-电流转换器	374
8.2.8 积分器和微分器	375
8.3 集成运放的非线性应用	376
8.3.1 对数放大器	376
8.3.2 指数放大器	377
8.4 集成运放的参数	378
8.5 小结	385
复习题	386
习题八	386
第9章 集成运放电路的应用与设计	392
9.1 有源滤波器	392
9.1.1 滤波器的类型	392
9.1.2 低通滤波器	396
9.1.3 高通滤波器	398
9.1.4 带通滤波器	401
9.1.5 带阻滤波器	403
9.1.6 全通滤波器	405
9.2 振荡器	405
9.2.1 振荡器的工作原理	406
9.2.2 相移振荡器	409

9.2.3	正交振荡器	411
9.2.4	三相振荡器	412
9.2.5	文氏电桥振荡器	413
9.3	施密特触发器	414
9.3.1	比较器	414
9.3.2	基本的反相施密特触发器	416
9.3.3	基本的同相施密特触发器	418
9.3.4	含参考电压的施密特触发器	419
9.4	波形发生器	422
9.4.1	方波发生器	422
9.4.2	三角波发生器	424
9.4.3	锯齿波发生器	426
9.5	小结	428
	复习题	428
	习题九	429
	参考文献	433

第 1 章 半导体材料及二极管

最基本的电子器件是 PN 结二极管,它在电子线路中有着广泛的应用。为了更好地理解电子器件在电路中的应用,本章首先介绍半导体的基础知识、PN 结及其特性和几种特殊的二极管,然后讨论晶体二极管的特性、参数和简单应用电路。

1.1 半导体材料及其特性

许多电子器件是由导电性能介于导体和绝缘体之间的半导体构成的,而半导体材料主要是 IV 族元素的硅(Si)、锗(Ge)以及 III-V 族元素的化合物砷化镓(GaAs)等。其导电性能会随温度、光照或掺入某些杂质而发生显著变化。

1.1.1 本征半导体

1. 共价键结构

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。将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。在本征 Si 和 Ge 的单晶中,原子在空间形成排列整齐的空间点阵,称为晶格。由于原子间距很近,价电子不仅受到自身原子核的约束,还要受到相邻原子核的吸引,使得每个价电子为相邻原子所共有,从而形成共价键。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键。依靠共价键,晶体中的原子紧密地结合在一起。图 1.1 是单晶 Si 或 Ge 的共价键结构平面示意图。

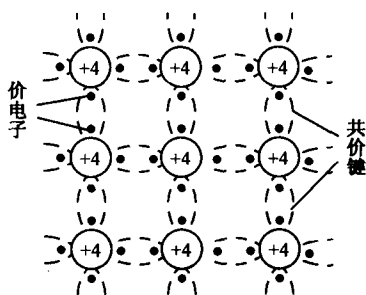


图 1.1 单晶 Si 和 Ge 的共价键结构示意图

2. 本征激发

在绝对温度 $T=0\text{K}$ 和没有外界激发时,所有的价电子均被束缚于共价键,而没有能力脱离共价键的束缚,晶体中没有自由电子,因此半导体是不能导电的。当温度升高或受到外界激发(如光照等),价电子就会获得足够的能量挣脱共价键的束缚,而成为自由电子,同时在共价键上留下相应的空位,这一现象称为本征激发。

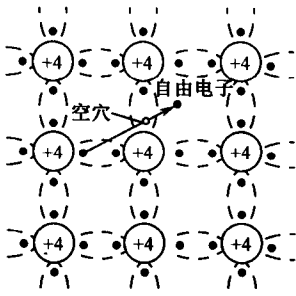


图 1.2 本征激发示意图

显然,温度越高本征激发越强,产生的自由电子和空位也越多。本征激发的示意图如图 1.2 所示。

3. 本征半导体中的两种载流子

运载电荷的粒子称为载流子。导体导电只有一种载流子,即自由电子。而本征半导体的本征激发中,当价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,原子因失去一个价电子而带正电,因而我们把这个带正电的“空位”叫做空穴。空穴很容易被从邻近共价键中跳出来的价电子填补上。于是,在邻近共价键中又出现新的空穴,以后其他价电子又可转移到这个新的空穴,这样就使共价键中出现一定的电荷迁移,当有电场作用时,价电子定向填补空位,使空位作相反方向的移动,这与带正电荷的粒子做定向运动的效果完全相同。为了区别于自由电子的运动,我们就把价电子的运动虚拟为空穴运动(方向相反),认为空穴是一种带正电荷的载流子,如图 1.3 所示。

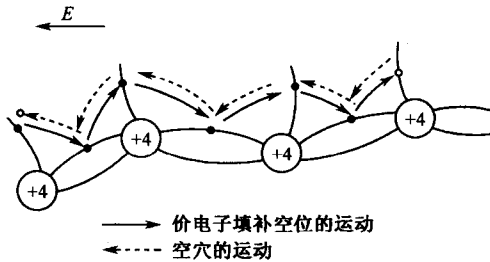


图 1.3 电子与空穴的运动

由此可见,由于本征激发,导致本征半导体中产生两种极性的载流子,即带负电荷的自由电子(简称电子)和带正电荷的空穴。空穴导电,其实质就是价电子依次填补空位的运动,这是半导体导电的特殊性质。引入空穴概念后,本征激发可以描述为:半导体在热激发下,产生自由电子-空穴对的现象。

4. 本征浓度

在本征半导体中,由于本征激发,不断地产生电子-空穴对,使载流子浓度增加。与此同时,又会有相反的过程发生,那就是自由电子与空穴在热运动中相遇,使一对自由电子-空穴对消失,这种现象称为载流子复合。在一定温度下,单位时间内本征激发所产生的自由电子-空穴对的数目与复合而消失的自由电子-空穴对的数目相等,就达到了载流子的动态平衡状态,使本征半导体中载流子的浓度一定。理论分析表明,本征载流子的浓度为

$$n_i = p_i = BT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.1)$$

式中, n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度(cm^{-3}), T 为热力学温度(K), k 为玻尔兹曼常量($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), E_g 为 $T=0\text{K}$ 时破坏共价键所需的能量, 又称禁带宽度(eV), B 是与半导体材料有关的常数($\text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$)。表 1.1 给出了部分半导体材料的 B 和 E_g 值。

表 1.1 半导体常数

材料	E_g/eV	$B/(\text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}})$
硅(Si)	1.1	5.23×10^{15}
砷化镓(GaAs)	1.4	2.10×10^{14}
锗(Ge)	0.66	1.66×10^{15}

在 $T=300\text{K}$ 的室温下, 由式(1.1)可求 Si 材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, Ge 材料的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 2.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, Ge 的本征载流子浓度比 Si 大将近两千倍, 这是因为处于第四壳层上的 Ge 价电子所受的束缚小于处于第三壳层上的 Si 价电子, Ge 价电子热激发所需的能量较 Si 价电子少, 在相同温度下 Ge 材料因热激发产生的自由电子和空穴数就多, 这表明 Ge 材料热稳定性比 Si 材料热稳定性要差; 这也是为什么半导体器件多用 Si 材料而少用 Ge 材料的原因之一。另外, 我们还知道 Si 的原子密度为 5×10^{22} 个/ cm^3 , Ge 的原子密度为 4.4×10^{22} 个/ cm^3 , 相比之下可以看出, 室温下只有极少数原子(对硅约为三万亿分之一)的价电子受激发产生电子-空穴对。上述的计算表明, 本征半导体的导电性能是很差的。另外, 式(1.1)还表明, 本征载流子浓度随温度升高近似按指数规律增大, 所以其导电性能对温度的变化很敏感, 半导体材料导电性能对温度的这种敏感性, 既可以用来制作热敏和光敏器件, 又是造成半导体材料热稳定性差的原因。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力是很弱的, 但在本征半导体中通过扩散工艺掺入少量的其他元素, 会使其导电性能发生显著变化。这些少量元素的原子称为杂质, 掺入杂质的半导体称为杂质半导体, 现实中用来制造半导体器件的材料就是这种杂质半导体。根据掺入的杂质不同, 可形成电子(N)型半导体和空穴(P)型半导体两种。

1. N 型半导体

在本征 Si 或 Ge 中掺入少量的 V 族元素(如磷、砷、锑等)后, 形成的杂质半导