



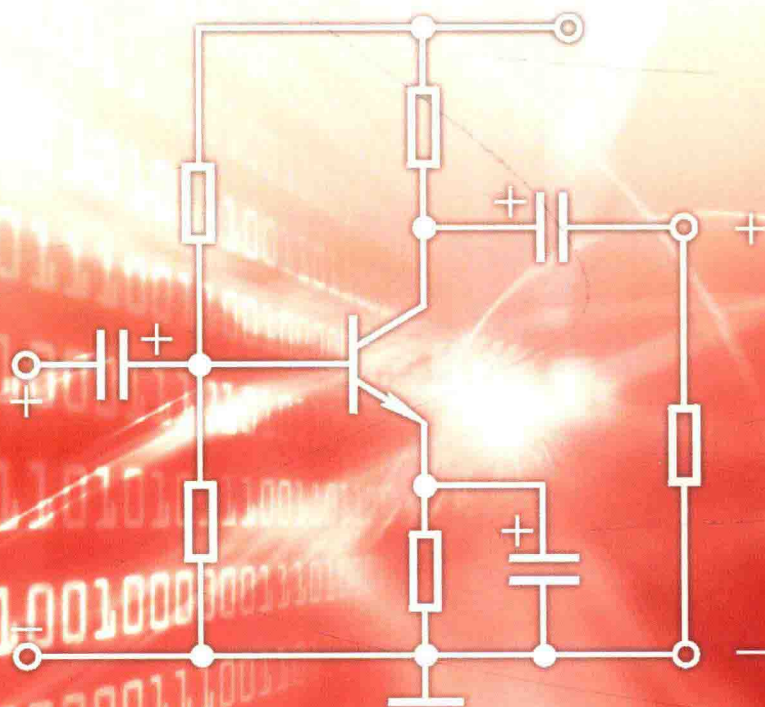
普通高等教育电子信息类“十三五”规划教材



西安交通大学 规划教材
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

模拟电子技术基础

李永安 张 辉 郝艳华 梁昌慧 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

教育电子信息类“十三五”规划教材

学

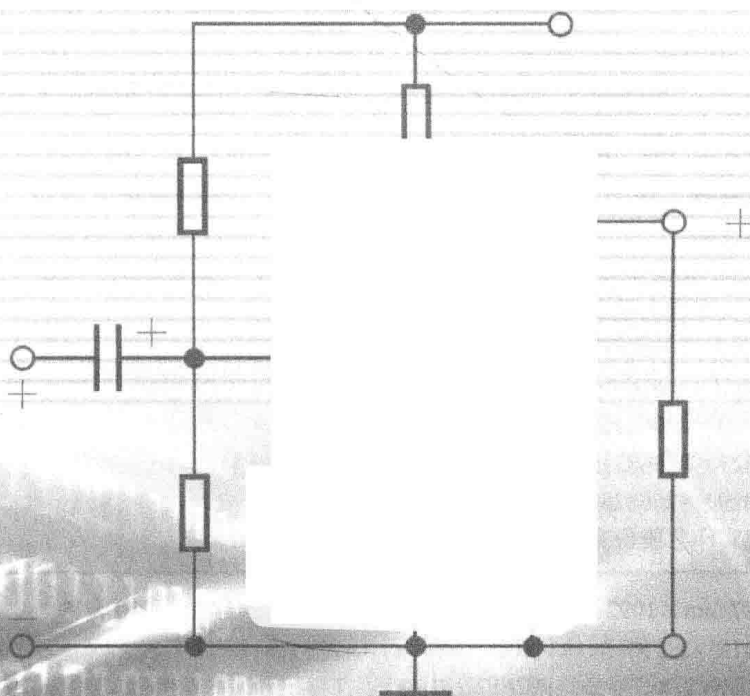
规划教材



XIAN JIAOTONG UNIVERSITY

模拟电子技术基础

李永安 张 辉 郝艳华 梁昌慧 编著



西安交通大学出版社
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书依据教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分会制定的《电子技术基础课程教学基本要求》编写，全书由半导体二极管及其应用、双极型晶体管及其基本放大电路、单极型晶体管及其基本放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大电路、负反馈放大电路、模拟信号运算电路、波形发生电路、功率放大电路和直流电源等10章组成。

本书力求做到知识点要全，分析过程要细，基础要扎实，内容要实用，视野要开阔，探究式教学要贯穿始终。每章前提出问题，每章后有小结、自测题和习题，以利于教学。

本书可作为高等院校电子、电气信息类专业模拟电子技术基础课程的教材，也可作为有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

模拟电子技术基础 / 李永安等编著. —西安：西安交通大学出版社，
2017.8

ISBN 978-7-5605-9926-7

I. ①模… II. ①李… 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（2017）第187633号

书 名	模拟电子技术基础
编 著	李永安 张 辉 郝艳华 梁昌慧
策划编辑	李慧娜
责任编辑	季苏平

出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029) 82668357 82667874 (发行中心) (029) 82668315 (总编办)
传 真	(029) 82668280
印 刷	虎彩印艺股份有限公司

开 本	787 mm×1092 mm 1/16	印张	30.375	字数	740千字
版次印次	2018年3月第1版	2018年3月第1次印刷			
书 号	ISBN 978-7-5605-9926-7				
定 价	69.00元				

读者购书、书店添货，如发现印装质量问题，请与本社发行中心联系、调换。

订购热线 (029) 82665248 (029) 82665249

投稿热线 (029) 82668135

电子信箱 64424057@qq.com

版权所有 侵权必究

前 言

模拟电子技术基础是电类专业的主干课程，是最重要的学科技术基础课之一。尽管国内已有非常成熟的高水平中文教材，例如童诗白、华成英主编的《模拟电子技术基础》，康华光主编的《电子技术基础》（模拟部分）等，但这些教材只适用于普通本科。近年来，我国应用型本科教育发展迅猛，但相应的教材却并不多见。为此，结合多年的教学与科研实践，我们编写了此书，其宗旨是打好基础，学以致用。

本教材以模拟电子技术的重要知识点和知识链为载体，注重加强学科理论基础，培养创新意识、科学思维方法，提高分析问题和解决问题的能力，力求做到知识点要全，分析过程要细，基础要扎实，内容要实用，视野要开阔，探究式教学要贯穿始终。具体如下：

1. 知识点要全。考虑到应用型本科仍属于本科教育，并且模拟电子技术基础又是专业基础课，因此我们力求保证基本概念、基本原理和基本分析方法，而不是以“必须”和“够用”为尺度，确保理论知识的系统性和完整性。为此，全书分 10 章：前 4 章介绍半导体器件与应用和频率响应，是全书的基础；第 5 章、第 6 章介绍运算放大器和反馈，是应用基础；后 4 章介绍运放应用、功放和稳压电源，属于应用。因此，教材覆盖了模拟电子技术基础全部知识点。相对于普通本科，由于应用型本科的专业面较窄，如果一些内容省略（比如振荡电路），很可能后续课程再也遇不到了。

2. 分析过程要细。相对而言，应用型本科生基础较差。多年来的实践表明，他们学习本课程较吃力。本着因材施教的原则，我们将半导体器件及其基本应用分成 3 章介绍，尽管双极型晶体管基本放大电路和单极型晶体管基本放大电路的分析过程似乎有些重复，但这样做既可分解难点又突出重点。对共基和共源放大电路，特别是有源负载放大电路，我们也做了详尽分析，因为这是学生进一步学习的基础，不宜只给结论，不给原因。对于一些数学推导不仅不能省略，而且推导过程很仔细，如第 4 章放大电路的频率响应部分。因为定性分析不能使人放心，只有结合定量分析，才能掌握本质，留下印象。实践证明，适宜学生实际。

3. 基础要扎实。考虑到半导体器件是应用的基础，而其原理学生不易掌握，因此本书前 3 章用了较大篇幅介绍器件和应用，并使器件与电路的结合更为紧密，尽管“管为路用，以路为主”是原则，但我们仍对器件工作原理做了尽可能详细的定性描述，以便读者更好地理解器件的外特性，为本课程及后续课程的应用奠定坚实的基础。另外，模拟电子技术课程的基础是电路分析。因此，我们经常有意回忆电路分析的知识，并利用它们解决问题。例如，应用基于叠加原理的拆环法分析非深度负反馈放大电路；又如利用二端网络等效电阻的概念求放大电路输入、输出电阻，还用信号与系统课程内容求解滤波器的参数等。电

路分析、模拟电子技术、信号与系统都是学科基础课，不要拘泥其中一门课。

4. 内容要实用。应用型本科应突出应用。为了突出应用，很多教材花很多篇幅介绍了运放、模拟乘法器和三端稳压器以外的集成电路。但我们认为，作为专业基础课更应该突出基础应用，因此本教材不再介绍 ICL8038、AF100、CD4060 等等，取而代之的是更基础的应用，如基于 MOS 差分放大器电路的三点式振荡电路，基于通用运放的音频放大电路等，此外，还强调了运放的供电。有了这些基本应用，相信读者很容易熟悉常见模拟集成电路芯片的使用。

5. 视野要开阔。由于模拟电子技术基础课程内容丰富，应用广泛，新器件、新技术不断出现，本教材也适度引入新概念。例如介绍传统文桥振荡电路的同时，还给出了接地电容文桥振荡电路，并指出它在现代电流模式电路中的应用；在介绍 T-T 滤波器的同时，还强调它在现代电流模式滤波器中的应用；在提到运放增益带宽积是常数外，又指出新型运放（CFA）的增益带宽积可以由设计者设定。这样做旨在培养学生举一反三的能力。

6. 探究式教学要贯穿始终。“模拟电子技术基础”课程具有知识跨度大、电路模型抽象、电路分析方法灵活多样等特点。诸多特点导致“模拟电子技术基础”是电子类本科教育较难以学习的课程，学生在学习过程中更易降低学习兴趣。为此，本教材力求由浅入深，由易到难，形象比喻，思路清晰。教材在重要分析后都进行讨论、归纳，提高规律性的结论；特别是在章节过渡时，都采用了问题导入法，在每一章节内，处处都能见到设问和思考，引导学生独立思考问题，养成深入思考的习惯，诱发兴趣，而不是人云亦云，从而形成进一步学习的动力；习题的编写也引用了大量的历史文献，旨在扩展教材内容并加以提高，同时对实际应用也具有较好的指导作用。

本书由李永安教授编写第 1、2、3、6、7、8 章，郝艳华副教授编写第 9、10 章，梁昌慧教授编写第 4、5 章。全书由李永安教授担任主编，张辉教授协助组稿、统稿及校对。

由于我们的能力和水平有限，加之时间仓促，书中一定存在不少错误和不妥之处，恳请读者批评指正，以便今后不断改进。

编者

2018 年 3 月于咸阳师范学院物理与电子工程学院

目 录

第 1 章 半导体二极管及其应用

1.1 半导体的基础知识.....	(001)
1.1.1 本征半导体.....	(001)
1.1.2 杂质半导体.....	(003)
1.1.3 PN 结.....	(005)
1.2 半导体二极管.....	(009)
1.2.1 半导体二极管的结构及类型.....	(009)
1.2.2 半导体二极管的主要特性.....	(010)
1.3 半导体二极管的应用.....	(012)
1.3.1 半导体二极管的等效电路模型.....	(013)
1.3.2 半导体二极管的基本应用.....	(016)
1.4 特殊二极管.....	(021)
1.4.1 稳压二极管.....	(021)
1.4.2 其它类型的二极管.....	(024)
本章小结.....	(026)
参考文献.....	(028)
自测题.....	(028)
习题.....	(030)

第 2 章 双极型晶体管及其基本放大电路

2.1 双极型晶体管的结构及其工作原理.....	(034)
2.1.1 BJT 的类型和结构.....	(034)
2.1.2 BJT 的工作原理.....	(035)
2.2 BJT 伏安特性曲线及参数.....	(039)
2.2.1 BJT 的共射特性曲线.....	(039)
2.2.2 BJT 的主要参数.....	(041)
2.2.3 温度对 BJT 特性的影响.....	(044)
2.3 BJT 工作状态分析.....	(046)

2.3.1	BJT 的直流模型	(046)
2.3.2	BJT 工作状态分析及偏置电路	(048)
2.4	放大电路的组成及其性能指标	(054)
2.4.1	放大的概念	(054)
2.4.2	放大电路组成	(055)
2.4.3	放大电路的主要性能指标	(055)
2.5	放大电路图解分析法	(060)
2.5.1	直流通路和交流通路	(060)
2.5.2	直流图解分析法	(061)
2.5.3	交流图解分析法	(062)
2.5.4	直流工作点与放大电路非线性失真的关系	(066)
2.5.5	直流负载线与交流负载线	(067)
2.5.6	图解法的适用范围	(068)
2.6	放大电路的交流等效电路分析法	(069)
2.6.1	BJT 交流小信号电路模型	(069)
2.6.2	共射放大电路的交流等效电路分析法	(074)
2.7	三种基本组态放大电路	(076)
2.7.1	共射放大电路	(076)
2.7.2	共集放大电路	(080)
2.7.3	共基放大电路	(083)
2.8	多级放大电路	(085)
2.8.1	级间耦合方式	(086)
2.8.2	多级放大电路的性能指标计算	(089)
2.8.3	组合放大电路	(091)
	本章小结	(093)
	参考文献	(096)
	自测题	(096)
	习题	(098)

第 3 章 单极型晶体管及其基本放大电路

3.1	结型场效应管	(105)
3.1.1	JFET 的类型和结构	(105)
3.1.2	JFET 的工作原理	(106)
3.1.3	特性曲线	(109)
3.2	绝缘栅场效应管	(113)

3.2.1 MOSFET 的类型和结构	(113)
3.2.2 MOSFET 的工作原理	(114)
3.2.3 MOSFET 的主要参数	(122)
3.2.4 MOSFET 的主要特点	(125)
3.3 场效应管放大电路	(125)
3.3.1 直流偏置电路与静态分析	(126)
3.3.2 FET 的微变等效电路	(129)
3.3.3 FET 的基本应用电路及其分析方法	(131)
3.3.3 有源负载放大电路	(137)
本章小结	(142)
参考文献	(144)
自测题	(145)
习题	(147)

第 4 章 放大电路的频率响应

4.1 频率响应概述	(151)
4.1.1 频率失真及不失真条件	(151)
4.1.2 简单 RC 电路的频率响应	(153)
4.2 单级共射放大电路的频率响应	(159)
4.2.1 BJT 的高频等效电路和频率参数	(159)
4.2.2 共射放大电路的频率响应分析	(164)
4.3 单级共源放大电路的频率响应	(170)
4.3.1 FET 的高频等效电路	(170)
4.3.2 共源放大电路的频率响应分析	(171)
4.4 多级放大电路的频率响应	(173)
4.4.1 多级放大电路频率响应的定性分析	(173)
4.4.2 截止频率的估算	(175)
4.5 共集、共基放大电路的频率响应分析	(179)
4.5.1 共集放大电路的频率响应分析	(179)
4.5.2 共基放大电路的频率响应分析	(180)
本章小结	(182)
参考文献	(184)
自测题	(185)
习题	(186)

第 5 章 集成运算放大电路

5.1 集成运算放大电路概述.....	(190)
5.1.1 集成运放的特点.....	(190)
5.1.2 集成运放电路的组成及其各部分的作用.....	(191)
5.2 差分放大电路.....	(192)
5.2.1 零点漂移.....	(192)
5.2.2 差分放大电路.....	(192)
5.3 电流源电路.....	(203)
5.3.1 基本电流源电路.....	(203)
5.3.2 改进型电流源电路.....	(206)
5.3.3 以电流源为有源负载的放大电路.....	(208)
5.4 集成运算放大电路的输出级电路.....	(210)
5.4.1 基本电路.....	(210)
5.4.2 消除交越失真的互补输出级.....	(211)
5.4.3 采用复合管的准互补输出级.....	(211)
5.5 集成运放电路举例.....	(214)
5.5.1 双极型集成运放.....	(214)
5.5.2 单极型集成运放.....	(218)
5.6 集成运放的电压传输特性及主要性能指标.....	(219)
5.6.1 集成运放的电压传输特性.....	(219)
5.6.2 集成运放的主要性能指标.....	(220)
5.6.3 集成运放的低频等效电路.....	(222)
5.7 集成运放的频率响应和频率补偿.....	(223)
5.7.1 集成运放的频率响应.....	(223)
5.7.2 集成运放的频率补偿.....	(224)
本章小结.....	(228)
参考文献.....	(229)
自测题.....	(230)
习题.....	(231)

第 6 章 负反馈放大电路

6.1 反馈的基本概念.....	(235)
6.1.1 什么是反馈.....	(235)
6.1.2 反馈的分类与判断.....	(236)

6.2	负反馈的四种组态.....	(240)
6.2.1	电压并联负反馈.....	(240)
6.2.2	电压串联负反馈.....	(241)
6.2.3	电流并联负反馈.....	(242)
6.2.4	电流串联负反馈.....	(243)
6.3	负反馈对放大电路性能的影响.....	(244)
6.3.1	方框图表示.....	(244)
6.3.2	负反馈对放大倍数的影响.....	(246)
6.3.3	负反馈对输入电阻的影响.....	(246)
6.3.4	负反馈对输出电阻的影响.....	(248)
6.3.5	负反馈对通频带的影响.....	(250)
6.3.6	负反馈对非线性失真的影响.....	(251)
6.3.7	放大电路中引入负反馈的一般原则.....	(252)
6.4	负反馈放大电路的分析方法.....	(253)
6.4.1	深度负反馈放大电路的分析方法.....	(253)
6.4.2	方框图分析法.....	(258)
6.4.3	拆环法.....	(261)
6.5	负反馈放大电路的稳定性.....	(263)
6.5.1	产生自激振荡的条件与原因.....	(263)
6.5.2	负反馈放大电路稳定性的判断.....	(265)
6.5.3	自激振荡的消除方法.....	(266)
	本章小结.....	(271)
	参考文献.....	(274)
	自测题	(274)
	习题	(277)

第 7 章 模拟信号运算和处理电路

7.1	概述.....	(282)
7.1.1	理想运放的两个工作区域.....	(282)
7.1.2	运放的供电.....	(284)
7.2	基本运算电路.....	(286)
7.2.1	比例电路.....	(286)
7.2.2	加减运算电路.....	(289)
7.2.3	积分电路与微分电路.....	(293)
7.2.4	指数和对数运算电路.....	(297)

7.2.5 利用对数和指数电路实现乘法和除法电路.....	(300)
7.3 模拟乘法器.....	(301)
7.3.1 模拟乘法器简介.....	(301)
7.3.2 变跨导式模拟乘法器.....	(302)
7.3.3 模拟乘法器在运算电路中的应用.....	(304)
7.4 有源滤波电路.....	(306)
7.4.1 滤波器概述.....	(307)
7.4.2 二阶低通有源滤波器.....	(311)
7.4.3 二阶高通有源滤波器.....	(313)
7.4.4 二阶带通有源滤波器.....	(314)
7.4.5 二阶带阻有源滤波器.....	(316)
7.5 运放应用电路的误差分析.....	(318)
7.5.1 实际运放的模型.....	(319)
7.5.2 同相、反相放大电路误差分析.....	(321)
7.5.3 反相积分电路误差分析.....	(324)
7.5.4 通用滤波器误差分析.....	(325)
本章小结.....	(328)
参考文献.....	(330)
自测题	(330)
习题	(333)

第 8 章 波形发生电路

8.1 正弦波振荡电路.....	(339)
8.1.1 概述.....	(339)
8.1.2 RC 正弦波振荡电路.....	(342)
8.1.3 LC 正弦波振荡电路.....	(349)
8.1.4 石英晶体正弦波振荡电路.....	(358)
8.2 电压比较器.....	(361)
8.2.1 概述.....	(362)
8.2.2 单限比较器.....	(363)
8.2.3 双限比较器.....	(366)
8.2.4 滞回比较器.....	(367)
8.3 非正弦波振荡电路.....	(370)
8.3.1 非正弦波振荡电路与正弦波振荡电路的区别.....	(370)
8.3.2 矩形波振荡电路.....	(371)

8.3.3 三角波振荡电路.....	(374)
8.3.4 锯齿波振荡电路.....	(376)
本章小结.....	(378)
参考文献.....	(379)
自测题	(380)
习题	(382)

第 9 章 功率放大电路

9.1 功率放大电路概述.....	(391)
9.1.1 功率放大电路的特点和分类.....	(391)
9.1.2 功率放大电路主要指标.....	(393)
9.1.3 功率放大电路组成.....	(394)
9.2 互补对称功率放大电路.....	(397)
9.2.1 乙类 OCL 互补对称功率放大电路.....	(397)
9.2.2 甲乙类 OCL 互补对称功率放大电路.....	(402)
9.2.3 OTL 互补对称功率放大电路.....	(407)
9.2.4 BTL 功率放大电路	(409)
9.2.5 功率晶体管器件.....	(410)
9.3 集成功率放大电路.....	(413)
9.3.1 集成功率放大电路分析.....	(413)
9.3.2 集成功率放大电路的应用.....	(415)
本章小结.....	(418)
参考文献.....	(420)
自测题	(420)
习题	(423)

第 10 章 直流电源

10.1 直流电源的组成.....	(428)
10.2 单相整流电路.....	(429)
10.2.1 单相半波整流电路.....	(429)
10.2.2 单相全波整流电路.....	(430)
10.2.3 单相桥式整流电路.....	(433)
10.3 滤波电路.....	(435)

10.3.1	电容滤波电路.....	(435)
10.3.2	电感滤波电路.....	(440)
10.3.3	其它形式滤波电路.....	(441)
10.4	倍压整流电路.....	(442)
10.4.1	二倍压整流电路.....	(442)
10.4.2	多倍压整流电路.....	(443)
10.5	稳压电路.....	(444)
10.5.1	稳压电路的主要技术指标.....	(444)
10.5.2	稳压管稳压电路.....	(445)
10.5.3	串联型稳压电路.....	(449)
10.6	集成稳压电路.....	(454)
10.6.1	固定式集成三端稳压器.....	(454)
10.6.2	输出可调的集成稳压器.....	(458)
10.7	开关型稳压电路.....	(461)
10.7.1	串联型开关稳压电路.....	(461)
10.7.2	并联型开关稳压电路.....	(463)
	本章小结.....	(465)
	参考文献.....	(467)
	自测题	(467)
	习题	(470)

第1章 半导体二极管及其应用

◎本章讨论的问题

(1) 什么是N型半导体？什么是P型半导体？两种半导体制作在一起会产生什么现象？

(2) 为什么PN结具有单向导电性？当PN结加正向电压，VAR符合欧姆定律吗？加反向电压果真没有电流吗？

(3) 当PN结无偏压时，扩散与漂移关系如何？正偏和反偏时，扩散与漂移关系又如何？半导体二极管的主要用途有哪些？

(4) 正常工作时，稳压管应工作在伏安特性的哪个区域？在击穿区，稳压管为什么不会损坏？

1.1 半导体的基础知识

按照导电能力的不同，可将物质分为导体、绝缘体和半导体（semiconductor）。半导体的导电能力比导体差，但比绝缘体好。与导体不同，在不同的条件下，半导体的导电能力有着显著的差异。例如，当受热或受光照时，半导体的导电率会显著增长，利用该特性，人们制作了半导体热敏元件和光敏元件。又如在纯净的半导体中掺入微量元素，其导电能力会猛增到几千、几万乃至上百万倍，利用该特性，人们制作了二极管、三极管、场效应管及集成电路。基于此，半导体受到了人们的高度重视。

为了了解半导体的特殊导电性质，现对半导体的内部结构、导电机理作一简单介绍。

1.1.1 本征半导体

所谓本征是指天然的、没有受到污染的半导体，因此我们把非常纯净的、原子排列很整齐的半导体称为本征半导体（intrinsic semiconductor），如单晶硅和单晶锗便是最常用的本征半导体。

一、本征半导体的原子结构

14号元素硅、32号元素锗的原子结构模型如图1.1.1(a)、(b)所示。两者的最外层都有四个价电子（valence electron），都是四价元素。为分析方便，可将硅和锗的原子结构简化为惯性核（inert ionic core）与价电子组成的一个整体，如图1.1.1(c)所示。惯性核是由原子核和内层电子组成的整体，它带正电并与价电子的总电量相同，以保证原子呈中性。

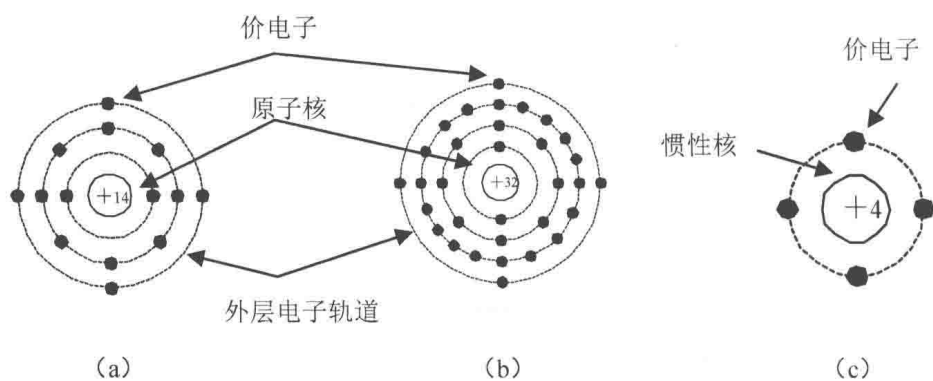


图 1.1.1 本征半导体的原子结构模型
(a) 硅原子；(b) 锗原子；(c) 简化原子结构模型

价电子直接影响物质的导电性能。对高价元素，价电子多于四个，价电子受原子核束缚很强，很难成为自由电子，导电能力极差，因而成为绝缘体；对低价元素，价电子少于四个，价电子受原子核束缚较弱，很容易成为自由电子，导电能力较强，因而成为导体；对四价元素而言，其价电子既不像导体那么容易挣脱原子核的束缚，也不像绝缘体那样受原子核束缚得那么紧，因而导电性能介于二者之间。

二、本征半导体的晶体结构

天然的硅和锗材料提炼成纯净的单晶体后，即为本征半导体。在本征半导体中，原子按照四角系统组成晶体点阵，每个原子间距相等，每个原子的四个价电子与相邻的四个原子的四个价电子组成四个电子对，这个电子对为两个相邻原子所共有，称之为共价键（covalent bond），如图 1.1.2 所示。具有这种共价键结构的物质才是稳定的。

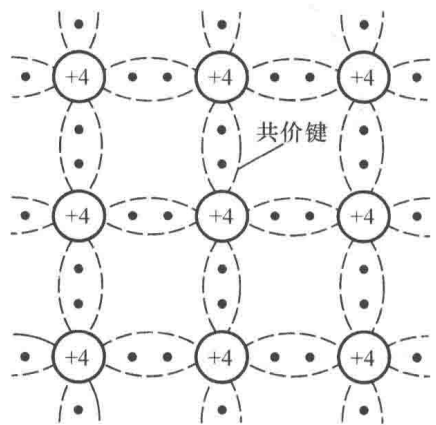


图 1.1.2 晶体的共价键结构

三、本征半导体中的两种载流子

本征半导体中的共价键具有很强的结合力，在常温下，只有极少数的价电子受热激发而获得足够的能量，从而挣脱原子核的束缚变成了自由电子（free electron），称其为本征激发。

与此同时，在共价键中留下一个空位置，称之为空穴（hole）。原子因失去一个价电子而带正电，可认为是空穴带正电。必须注意，自由电子与空穴是相伴而生，成对出现，数目相等，常称之为电子—空穴对，如图 1.1.3 所示。

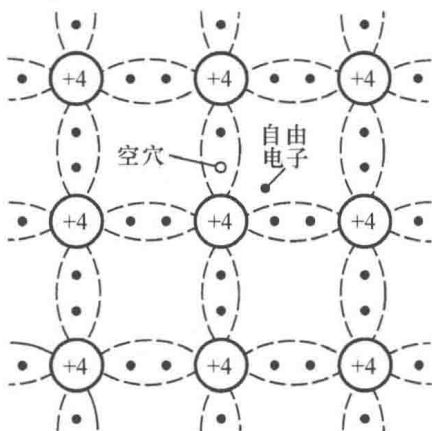


图 1.1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

当对本征半导体施加电场时，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，周围的价电子会按一定的方向填补空穴，从现象和效果上看，价电子填补空穴的运动可等效成带正电的空穴运动，也就是说空穴也产生定向移动，形成空穴电流。因此，在本征半导体中有两种载流子，即自由电子和空穴。当对本征半导体施加电场时，既有电子电流，也有空穴电流，这是半导体与金属导电机理的最大不同。

实验表明，温度一定时，一方面因本征激发，本征半导体中不断产生电子—空穴对；另一方面，自由电子在运动过程中还会与空穴相遇而填补空穴，使二者同时消失，这种现象称之为复合（recombination）。只要温度一定，这两个相反作用相等，处于动态平衡，载流子浓度是一定的，并且自由电子与空穴浓度相等。随着温度的升高，热激发的载流子数目增多，导电能力增强；反之，温度降低，热激发的载流子数目降低，导电能力变弱。因此，温度对半导体器件的特性有较大影响。可以证明^①，室温下，本征硅中约在 10^{12} 个原子中才有一个电子—空穴对，而本征锗中约在 10^9 个原子中就有一个电子—空穴对，虽然硅较锗受温度影响大，但在室温下，本征半导体中的载流子数仍很少，这对半导体技术毫无实用价值。

1.1.2 杂质半导体

要使半导体的导电特性得到极大的改善，必须在半导体中掺入微量元素，并能加以控制，形成所谓杂质半导体（doped semiconductor）。按掺入的杂质元素不同，杂质半导体可分为 N 型和 P 型两大类。

一、N 型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，掺入微量五价元素（如磷），这样，并不改变硅（或锗）

^①参见文献[1-1] 26~29 页。

的结构，只是晶体点阵中的某些硅（或锗）原子被磷原子所取代。杂质原子的四个价电子与周围的四个硅原子组成四对共价键后，多余了一个自由的价电子，形成了 N 型半导体^①，如图 1.1.4 所示。

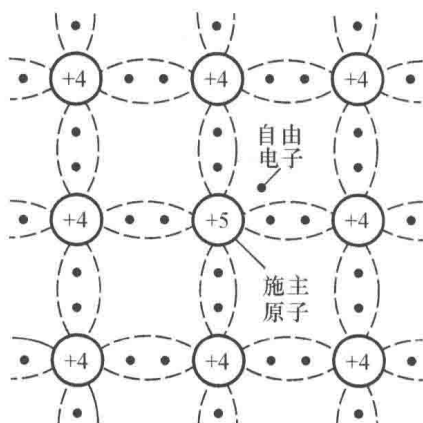


图 1.1.4 N 型半导体

在 N 型半导体中，除杂质原子提供的自由电子以外，还存在着本征激发所产生的电子—空穴对。因此，这类半导体中多数载流子（majority carriers）（简称为多子）是自由电子，少数载流子（minority carriers）（简称为少子）是空穴，多子数远大于少子数。当给 N 型半导体施加电场时，参与导电的主要是自由电子，故称其为电子型半导体，即 N 型半导体。提供多子（自由电子）的杂质原子，叫做施主原子（donor atom）。在该半导体中，掺杂越多，多子（自由电子）的浓度就越大，导电能力就越强。

二、P 型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，掺入微量三价元素（如硼），这样，并不改变硅（或锗）的结构，只是晶体点阵中的某些硅（或锗）原子被硼原子所取代。杂质原子的三个价电子与周围的四个硅原子组成三对共价键后，少了一个形成共价键的价电子，产生了一个空穴，形成了 P 型半导体，如图 1.1.5 所示。

在 P 型半导体中，除杂质原子提供的空穴以外，还存在着本征激发所产生的电子—空穴对。因此，这类半导体中多子是空穴，少子是自由电子，多子数远大于少子数。当给 P 型半导体施加电场时，参与导电的主要是空穴，故称其为空穴型半导体，即 P 型半导体^②。提供多子（空穴）的杂质原子，叫做受主原子（acceptor atom）。在该半导体中，掺杂越多，空穴的浓度就越大，导电能力就越强。

应该注意，无论是 N 型还是 P 型半导体，多子主要由掺杂浓度决定，与温度关系不大；少子主要与温度有关，与掺杂无关。掺杂越多，多子的浓度就越大，导电能力就越强；温度升高，会引起少子数急剧增大，因此，半导体器件对温度非常敏感。

①N 为 Negative 的字头，因电子带负电，故得此名。

②P 为 Positive 的字头，因空穴带正电，故得此名。