



21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

# 模拟电子技术与应用

李 曦 艾 武 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

# 模拟电子技术与应用



主编

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书以高等学校非电类专业的本科生为读者对象,以常见的基本放大电路结构与相关分析计算为主线,面向实际应用,强调以工程的概念分析问题、解决问题的一般性方法,既注重本学科基本概念、基本方法的传授,又注重学科之间的交叉融合,以及与相关课程教学内容的衔接,通过启发创新思维,培养学生主动实践的工程应用能力。全书共分8章,内容包括:半导体器件、放大电路分析基础、场效应管及其放大电路、放大电路中的负反馈、集成电路运算放大器及其应用、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电源等。编者在编写时,力求深入浅出、图文并茂,以便读者自学。本书还讨论了各种放大电路的分析方法在机电系统控制、测量等方面的实际应用,为电子技术在机电一体化领域的应用提供了必要的基础知识与方法。

本书由华中科技大学的多位教师结合近些年的教学和科研经验,综合机械制造自动化等专业的总体培养目标共同编写而成,可作为高等学校机械类专业、近机类专业的教学用书,也可供高等学校其他有关专业的师生和相关工程技术人员参考,可满足48~56学时本科教学的需要。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术与应用/李 曦 艾 武 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.1

ISBN 978-7-5609-8471-1

I. 模… II. ①李… ②艾… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257791 号

模拟电子技术与应用

李 曦 艾 武 主编

策划编辑:俞道凯

责任编辑:姚 幸

封面设计:李 嫚

责任校对:朱 玢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:18.25

字 数:384千字

版 次:2013年1月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

21 世纪高等学校  
机械设计制造及其自动化专业系列教材  
编审委员会

顾问： 姚福生                      黄文虎                      张启先  
(工程院院士)                      (工程院院士)                      (工程院院士)

谢友柏                      宋玉泉                      艾 兴  
(工程院院士)                      (科学院院士)                      (工程院院士)

熊有伦  
(科学院院士)

主任： 杨叔子                      周 济                      李培根  
(科学院院士)                      (工程院院士)                      (工程院院士)

委员： (按姓氏笔画顺序排列)

于骏一	王安麟	王连弟	王明智	毛志远
左武炘	卢文祥	朱承高	师汉民	刘太林
李 斌	杜彦良	杨家军	吴昌林	吴 波
吴宗泽	何玉林	何岭松	陈康宁	陈心昭
陈 明	陈定方	张春林	张福润	张 策
张健民	冷增祥	范华汉	周祖德	洪迈生
姜 楷	殷国富	宾鸿赞	黄纯颖	童秉枢
傅祥志	傅水根	廖效果	黎秋萍	戴 同

秘书： 刘 锦    徐正达    万亚军

# 21 世纪高等学校 机械设计制造及其自动化专业系列教材

## 总 序

“中心藏之，何日忘之”，在新中国成立 60 周年之际，时隔“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”出版 9 年之后，再次为此系列教材写序时，《诗经》中的这两句诗又一次涌上心头，衷心感谢作者们的辛勤写作，感谢多年来读者对这套系列教材的支持与信任，感谢为这套系列教材出版与完善作过努力的所有朋友们。

追思世纪交替之际，华中科技大学出版社在众多院士和专家的支持与指导下，根据 1998 年教育部颁布的新的普通高等学校专业目录，紧密结合“机械类专业人才培养方案体系改革的研究与实践”和“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革研究与实践”两个重大教学改革成果，约请全国 20 多所院校数十位长期从事教学和教学改革工作的教师，经多年辛勤劳动编写了“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”。这套系列教材共出版了 20 多本，涵盖了“机械设计制造及其自动化”专业的所有主要专业基础课程和部分专业方向选修课程，是一套改革力度比较大的教材，集中反映了华中科技大学和国内众多兄弟院校在改革机械工程类人才培养模式和课程内容体系方面所取得的成果。

这套系列教材出版发行 9 年来，已被全国数百所院校采用，受到了教师和学生的广泛欢迎。目前，已有 13 本列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，多本获国家级、省部级奖励。其中的一些教材（如《机械控制基础》《机电传动控制》《机械制造技术基础》等）已成为同类教材的佼佼者。更难得的是，“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”也已成为一个著名的丛书品牌。9 年前为这套教材作序的时候，我希望这套教材能加强各兄弟院校在教学改革方面的交流与合作，对机械

工程类专业人才培养质量的提高起到积极的促进作用,现在看来,这一目标很好地达到了,让人倍感欣慰。

李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。尽管这套系列教材取得了可喜的成绩,但毫无疑问,这套书中,某本书中,这样或那样的错误、不妥、疏漏与不足,必然会存在。何况形势总在不断地发展,更需要进一步来完善,与时俱进,奋发前进。较之9年前,机械工程学科有了很大的变化和发展,为了满足当前机械工程类专业人才培养的需要,华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下,对这套系列教材进行了全面修订,并在原基础上进一步拓展,在全国范围内约请了一大批知名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地更新和丰富“21世纪机械设计制造及其自动化专业系列教材”。此次修订可谓非常必要,十分及时,修订工作也极为认真。

“得时后代超前代,识路前贤励后贤。”这套系列教材能取得今天的成绩,是几代机械工程教育工作者和出版工作者共同努力的结果。我深信,对于这次计划进行修订的教材,编写者一定能在继承已出版教材优点的基础上,结合高等教育的深入推进与本门课程的教学发展形势,广泛听取使用者的意见与建议,将教材凝练为精品;对于这次新拓展的教材,编写者也一定能吸收和发展原教材的优点,结合自身的特色,写成高质量的教材,以适应“提高教育质量”这一要求。是的,我一贯认为我们的事业是集体的,我们深信由前贤、后贤一起一定能将我们的事业推向新的高度!

尽管这套系列教材正开始全面的修订,但真理不会穷尽,认识不是终结,进步没有止境。“嘤其鸣矣,求其友声”,我们衷心希望同行专家和读者继续不吝赐教,及时批评指正。

是为之序。

中国科学院院士

fan  
2009.9.9



# 前 言

随着电子技术的快速发展,尤其是微电子学与计算机科学的发展,电子技术已成为机电一体化技术的基础和重要组成部分。

为了适应我国制造业快速发展及国家振兴制造业的战略规划,遵循高等工院校教学规律的要求,根据教育部机械学科教学指导委员会教材编写的有关精神,结合多年来的教学及科研方面的实践经验,参考最新的国际动态资讯,我们编写了此书。在编写过程中,力求反映模拟电子技术的基本概念、基本方法和分析工程问题与解决工程问题的思路,兼顾理论与实际的需求,在内容的取舍上,注重先进性与实用性的统一,同时注重知识面的广阔性,在文字的叙述上,注意简练通俗、层次分明,并遵从由点到面、由浅入深的认识规律。本书既可作为高等工院校机械工程及自动化专业主干技术基础课程“模拟电子技术”的教材,也可供从事相关工作的工程技术人员参考使用。

全书共分8章。第1章简单介绍半导体器件及其工作原理和简单应用;第2章介绍了由分立元件所组成的基本放大电路的分析方法及工程测算方法,通过典型电路结构的分析,讨论了电路组成、工作状态分析和主要指标的计算;第3章阐述了场效应管及其放大电路;第4章讨论了负反馈的概念,以及如何通过负反馈改善电路的性能;第5章是集成电路运算放大器及其应用,重点由理论分析转向实际应用;包括比例放大、常用运算、比较、滤波等典型应用;第6章为波形产生与变换方面的应用;第7章为功率放大电路;第8章为直流稳压电源。附录还提供了进行各种仿真虚拟实验的素材,以便读者利用业余时间建立自己的实验室,不受约束地完成课程学习所需的实践环节。

本书由李曦和艾武负责主编。参加本书编写的有李曦(第1、2、3、6章,第7、8章的部分内容),张冈(第4、5章及附录的仿真实验部分),肖鹏(第7、8章的部分内容)。全书由艾武教授进行统稿。

本书在编写过程中,参阅了有关院校、科研机构、企业出版的教材、资

# 本书所用的主要符号说明

## 一、基本符号

$q$	电荷	$L$	电感
$\Phi, \phi$	磁通量	$C$	电容
$I, i$	电流	$M$	互感
$U, u$	电压	$Z$	阻抗
$P, p$	功率	$X$	电抗
$W, w$	能量	$Y$	导纳
$R, r$	电阻	$B$	电纳
$G, g$	电导	$A$	放大倍数

## 二、电压、电流符号

英文小写字母  $u(i)$ , 其下标若为英文小写字母, 则表示交流电压(电流)瞬时值, 如:  $u_o$  表示输出交流电压瞬时值。

英文小写字母  $u(i)$ , 其下标若为英文大写字母, 则表示含有直流的电压(电流)瞬时值, 如:  $u_o$  表示含有直流的输出电压瞬时值。

英文大写字母  $U(I)$ , 其下标若为英文小写字母, 则表示正弦电压(电流)有效值, 如:  $U_o$  表示输出正弦电压有效值。

英文大写字母  $U(I)$ , 其下标若为英文大写字母, 则表示直流电压(电流)值, 如:  $U_o$  表示输出直流电压值。

$\dot{U}, \dot{I}$	正弦电压、电流相量(复数量)
$U_Q, I_Q$	电压、电流的静态值
$U_f, I_f$	反馈电压、电流有效值
$U_{CC}, U_{EF}$	集电极、发射极直流电源电压
$U_{BB}$	基极直流电源电压
$U_{DD}, U_{SS}$	漏极和源极直流电源电压
$U_s, I_s$	直流电压源、电流源
$u_s, i_s$	正弦电压源、电流源
$U_i$	输入交流电压有效值
$u_i$	含有直流成分的输入电压瞬时值
$u_i, u_o$	输入、输出电压瞬时值



$U_o, I_o$	输出交流电压、电流有效值
$u_o$	含有直流成分的输出电压的瞬时值
$U_R$	基准电压、参考电压、二极管最大反向工作电压
$I_R$	参考电流、二极管反向电流
$U_+, I_+ (u_+, i_+)$	运放同相端输入电压、电流
$U_-, I_- (u_-, i_-)$	运放反相端输入电压、电流
$U_{id}$	差模输入电压信号
$U_{ic}$	共模输入电压信号
$U_{oim}$	整流或滤波电路输出电压中基波分量的幅值
$U_{CEQ}$	集电极、发射极间静态压降
$U_{oh}$	电压比较器输出的高电平电压
$U_{ol}$	电压比较器输出的低电平电压
$U_{th}$	电压比较器的阈值电压
$I_{BQ}$	基极静态电流
$I_{CQ}$	集电极静态电流
$\Delta U_{CE}$	直流变化量
$\Delta i_c$	瞬时值变化量

### 三、电阻符号

$R_s$	信号源内阻
$r_i$	输入电阻
$r_o$	输出电阻
$r_{if}$	具有反馈时的输入电阻
$r_{of}$	具有反馈时的输出电阻
$r_{id}$	差模输入电阻
$R_i (R')$	运放输入端的平衡电阻
$R_p (R_w)$	电位器(可变电阻器)
$R_c$	集电极外接电阻
$R_b$	基极偏置电阻
$R_e$	发射极外接电阻
$R_L$	负载电阻

### 四、放大倍数、反馈系数

$A_v$	电压放大倍数 $A_v = U_o / U_i$
$A_{vs}$	考虑信号源内阻时电压放大倍数 $A_{vs} = U_o / U_s$ , 即源电压放大倍数
$A_{vd}$	差模电压放大倍数
$A_{vc}$	共模电压放大倍数

## 本书所用的主要符号说明

$A_{od}$	开环差模电压放大倍数
$A_{vsm}$	中频电压放大倍数
$A_{vsl}$	低频电压放大倍数
$A_{vsh}$	高频电压放大倍数
$A_i$	开环电流放大倍数
$A_{if}$	闭环电流放大倍数
$F$	反馈系数
$A_p$	功率放大倍数

### 五、功率符号

$p$	瞬时功率
$P$	平均功率(有功功率)
$Q$	无功功率
$\tilde{S}$	复功率
$S$	视在功率
$\lambda$	功率因数
$P_o$	输出信号功率
$P_c$	集电极损耗功率
$P_E, P_S$	直流电源供给功率

### 六、频率符号

$f$	频率
$\omega$	角频率
$f_H(f_h)$	放大电路的上限截止频率。此时, $A_{vsh} = 0.707 A_{vsm}$
$f_L(f_l)$	放大电路的下限截止频率。此时, $A_{vsl} = 0.707 A_{vsm}$
$f_{BW}$	通频带(带宽), $f_{BW} = f_H - f_L$
$f_{hf}$	具有负反馈时放大电路的上限截止频率
$f_{lf}$	具有负反馈时放大电路的下限截止频率
$f_{BWi}$	具有负反馈时的通频带
$f_\alpha$	共基极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
$f_\beta$	共射极接法时三极管电流放大系数的上限截止频率
$f_T$	三极管的特征频率
$\omega_0$	谐振角频率、振荡角频率
$f_0$	振荡频率

### 七、器件符号

D	二极管
T	三极管
$U_T$	温度电压当量, $U_T = kT/q$ ; 增强型场效应管的开启电压

$I_D$	二极管电流,漏极电流
$I_S$	反向饱和电流,源极电流
$I_F$	最大整流电流
$U_{on}$	二极管开启电压
$U_B$	PN 结击穿电压,基极直流电压
$V_{DZ}$	稳压二极管
$U_Z$	稳压管稳定电压值
$I_Z$	稳压管工作电流
$I_{Z\max}$	最大稳定电流
$r_z$	稳压管的微变电阻
b、B	基极
c、C	集电极
e、E	发射极
$I_{CBO}$	发射极开路、集-基极间的反向饱和电流
$I_{CEO}$	基极开路、集-射极间的穿透电流
$I_{CM}$	集电极最大允许电流
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
$n$	电子浓度
$p$	空穴浓度
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
$r_{be}$	共射接法下,基-射极间的微变电阻
$r_{ce}$	共射接法下,基-射极间的微变电阻
$\alpha$	共基接法下,集电极电流的变化量与发射极电流的变化量之比,即 $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
$\bar{\alpha}$	从发射极到达集电极的载流子的百分数,或 $\bar{\alpha} = I_C / I_E$
$\beta$	共射接法下,集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比,即 $\beta = \Delta I_C / I_E$
$\bar{\beta}$	共射接法下,不考虑穿透电流时, $I_C$ 与 $I_B$ 的比值
$g_m$	跨导
$BU_{EBO}$	集电极开路时 e-b 间的击穿电压
$BU_{CEO}$	基极开路时 c-e 间的击穿电压
$U_{IO}, I_{IO}$	集成运放输入失调电压、失调电流
$I_{IB}$	集成运放输入偏置电流
$S_R$	集成运放的转换速率

D	场效应管漏极
G	场效应管栅极
S	场效应管源极
S	整流电路的脉动系数
$U_p$	场效应管夹断电压
$r_{DS}$	场效应管漏源间的等效电阻
$I_{DSS}$	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的 $I_D$ 值
CMRR	共模抑制比
CMR	用分贝表示的共模抑制比,即 $20 \lg \text{CMRR}$
Q	静态工作点、LC 回路的品质因数
$\tau$	时间常数
$\eta$	效率
$\varphi(\theta)$	相角
$\varphi_F$	反馈网络的相移
$\rho$	电阻率



---

<b>第 1 章 半导体器件</b> .....	(1)
1.1 半导体基础知识 .....	(1)
1.2 PN 结 .....	(4)
1.3 半导体二极管 .....	(7)
1.4 半导体三极管.....	(15)
思考题与习题 .....	(23)
<b>第 2 章 放大电路分析基础</b> .....	(27)
2.1 放大电路的性能指标.....	(27)
2.2 共射极放大电路的组成与工作原理.....	(28)
2.3 放大电路的分析方法.....	(31)
2.4 输出电压的最大幅度与非线性失真分析.....	(43)
2.5 静态工作点的稳定及其偏置电路.....	(46)
2.6 共集电极放大电路.....	(48)
2.7 多级放大电路.....	(50)
2.8 放大电路的频率特性 .....	(55)
思考题与习题 .....	(59)
<b>第 3 章 场效应管及其放大电路</b> .....	(63)
3.1 概述.....	(63)
3.2 结型场效应管.....	(64)
3.3 绝缘栅场效应管.....	(68)
3.4 场效应管的主要参数及特点.....	(71)
3.5 场效应管放大电路.....	(74)
思考题与习题 .....	(81)
<b>第 4 章 放大电路中的负反馈</b> .....	(83)
4.1 负反馈的基本概念.....	(83)
4.2 负反馈的组态及其对放大电路的影响.....	(85)
4.3 负反馈放大电路的计算 .....	(101)
4.4 负反馈放大电路的稳定性分析 .....	(106)

思考题与习题·····	(109)
<b>第 5 章 集成电路运算放大器及其应用</b> ·····	(113)
5.1 集成运算放大器的单元电路·····	(113)
5.2 差动放大电路·····	(115)
5.3 电流源电路·····	(127)
5.4 集成运放的应用基础·····	(132)
5.5 集成运放的典型应用电路·····	(138)
5.6 集成运算放大器的应用实例·····	(165)
思考题与习题·····	(168)
<b>第 6 章 信号产生电路</b> ·····	(177)
6.1 正弦波振荡电路·····	(177)
6.2 非正弦波信号产生电路·····	(186)
* 6.3 锁相环·····	(189)
思考题与习题·····	(190)
<b>第 7 章 功率放大电路</b> ·····	(192)
7.1 功率放大器的特点和分类·····	(192)
7.2 乙类互补对称功率放大电路·····	(194)
7.3 甲乙类互补对称功率放大电路·····	(199)
思考题与习题·····	(202)
<b>第 8 章 直流稳压电源</b> ·····	(203)
8.1 直流稳压电源的组成及性能指标·····	(203)
8.2 单相整流电路·····	(205)
8.3 滤波电路·····	(209)
8.4 稳压电路·····	(214)
思考题与习题·····	(226)
<b>附录 A 模拟电子电路虚拟仿真实验</b> ·····	(230)
A.1 虚拟仿真实验系统简介·····	(230)
A.2 基本放大电路虚拟实验·····	(231)
A.3 场效应管基本放大电路虚拟实验·····	(235)
A.4 多级放大电路虚拟实验·····	(237)
A.5 负反馈放大电路虚拟实验·····	(239)
A.6 差动放大电路虚拟实验·····	(242)
A.7 集成运算放大器虚拟实验·····	(246)
A.8 波形产生与变换虚拟实验·····	(255)
A.9 功率放大电路虚拟实验·····	(265)
A.10 直流稳压电源虚拟仿真实验·····	(267)
<b>附录 B ICL8038 精密波形发生器芯片及应用</b> ·····	(270)
<b>参考文献</b> ·····	(274)



# 半导体器件

本章内容是全书所需掌握知识的基础。半导体器件是构成信号放大电路与处理电路的核心单元部件,因此,在学习信号放大电路之前有必要了解半导体的性质及其导电特性,了解各种半导体器件的基本结构与原理。

## 1.1 半导体基础知识

根据物体导电能力(电阻率)的不同,可将物质分为导体、绝缘体和半导体。

(1)导体 导体是指电阻率 $\rho < 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质。如铜、银、铝等金属材料,由于其最外层电子受原子核的束缚力较小,极易脱离原子核的束缚而成为自由电子,这些自由电子在外电场的作用下产生定向运动(称为漂移运动)形成电流,呈现良好的导电性。

(2)绝缘体 绝缘体是指电阻率 $\rho > 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 物质。如橡胶、塑料等,它们与金属材料相反,最外层电子受原子核的束缚力极强,故导电性很差。

(3)半导体 半导体的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。典型的半导体有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)及其他聚合物材料等,其导电性介于导体与绝缘体之间。

### 1.1.1 本征半导体及其导电性

完全纯净的、不含其他杂质且具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

#### 1. 本征半导体的共价键结构

硅(Si)和锗(Ge)都是四价元素,在原子最外层轨道上的4个电子称为价电子,其中硅原子及其简化模型结构如图1-1所示。它们分别与周围的4个原子的价电子形成共价键。共价键中的价电子为这些原子所共有,并为它们所束缚,在空间形成排列有序的结构,如图1-2所示。



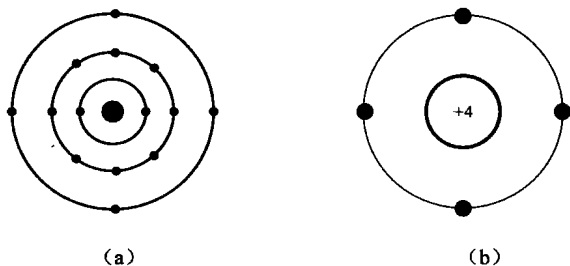


图 1-1 硅原子及其简化模型  
(a) 硅的原子结构 (b) 简化模型

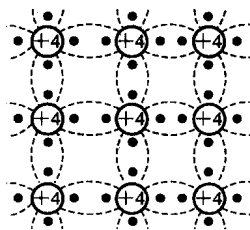


图 1-2 简化模型共价键平面结构

## 2. 半导体中的常用术语和特性

(1) 本征激发 一般来说,本征半导体共价键中的价电子不完全像绝缘体中价电子所受束缚那样强,如果能从外界获得一定的能量(如光照、温升、电磁场激发等),一些价电子就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。理论和实验表明:在常温( $T=300\text{K}$ )下,硅共价键中的价电子只要获得大于电离能  $E_g$ (也可用禁带宽度衡量,硅本征半导体的  $E_g=1.1\text{eV}$ )的能量便可激发成为自由电子。锗本征半导体的电离能更小,只有  $0.72\text{eV}$ 。这一现象称为本征激发,也称热激发。

(2) 电子空穴对 当自由电子产生时,在原来的共价键中的位置就出现了一个空位,原子的电中性被破坏,呈现出正电性,其正电量与电子的负电量相等,人们常称呈现正电性的这个空位为空穴。可见因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的,称为电子空穴对,如图 1-3(a)所示。

(3) 复合 游离的部分自由电子在运动过程中遇到空穴时可能回到空穴中去,该现象称为复合,如图 1-3(b)所示,很显然,复合与激发是一对可逆的过程。

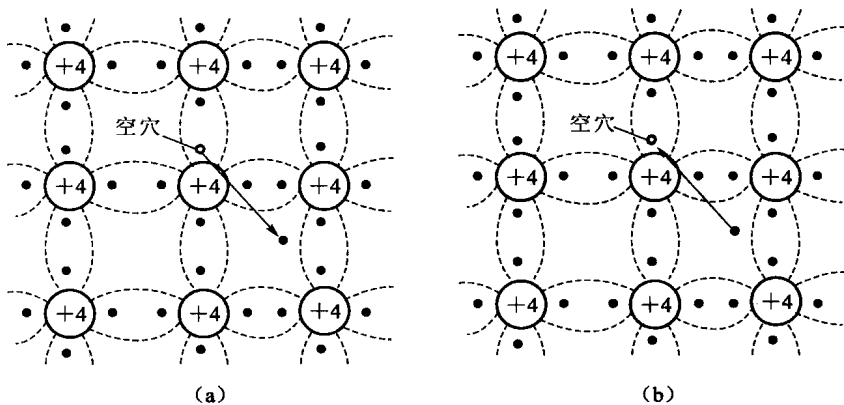


图 1-3 本征激发与复合过程  
(a) 电子空穴对 (b) 复合

(4) 空穴的移动 自由电子的定向运动形成了电子电流,空穴的定向运动也可形成空穴电流,它们的方向相反。当空穴出现时,相邻原子的价电子比较容易离开它所

在的共价键而填补到这个空穴中来,使该价电子原来所在的共价键中出现一个新的空穴,这个空穴又可能被相邻原子的价电子填补,再出现新的空穴。价电子填补空穴的这种运动无论在形式上还是效果上都相当于带正电荷的空穴在运动,只不过空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的,因此,空穴的导电能力不如自由电子。

(5)动态平衡 在一定温度条件下,产生的“电子-空穴对”和复合的“电子-空穴对”数量相等时,形成相对平衡,这种相对平衡属于动态平衡,达到动态平衡时“电子-空穴对”维持一定的数目。

可见,在半导体中存在着自由电子和空穴两种载流子,而金属导体中只有自由电子一种载流子,这也是半导体与导体导电方式的不同之处。

(6)半导体材料的热敏性与光敏性 半导体材料的电阻率随温度的变化会发生明显地改变,如锗元素半导体,温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,它的电阻率就大约减小一半;半导体材料的电阻率对光的变化也十分敏感,如硫化镉在没有光照时,电阻值可高达几兆欧,而受到光照时,电阻值降到几十千欧。这些特性都广泛地应用于自动控制 and 无线电技术中。

(7)半导体材料的掺杂性 在纯净的半导体中掺入极微量的杂质元素,就会使它的电阻率发生巨大变化,如在纯硅中掺入百万分之一的硼元素,其电阻率就会从  $214\ 000\ \Omega \cdot \text{cm}$  急剧减小为  $0.4\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,也就是说硅的导电能力提高了 50 多万倍。

## 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入杂质后的本征半导体称为杂质半导体。

### 1. N型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素,例如磷,可形成 N 型半导体,也称电子型半导体。因五价杂质原子中只有 4 个价电子能与周围 4 个半导体原子中的价电子形成共价键,而多余的 1 个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。

提供自由电子的五价杂质原子因自由电子脱离而带正电荷成为正离子,因此,五价杂质原子也被称为施主杂质。N 型半导体的结构示意图如图 1-4 所示。由于在 N 型半导体中自由电子的浓度远大于空穴的浓度,即  $n \gg p$ 。在 N 型半导体中自由电子称为多数载流子(简称多子),空穴称为少数载流子(简称少子)。