



yingyongxing Rencai Peiyang Xilie Jiaocai

应用型人才培

理 工 类

模拟电子 技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

宋忠能 主编



电子科技大学出版社

TN710/224

2009

yingyongxing Rencai Peiyang Xilie Jiaocai

应用型人才培养系列教材

模拟电子技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

	宋忠能	◎主 编
顾 平	李绪诚	◎副主编
吴 莘	王代强	◎主 审



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础 / 宋忠能主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2009. 1

(应用型人才培养系列教材. 理工类)

ISBN 978-7-81114-880-0

I. 模 … II. 宋… 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 (2008) 第 183182 号

应用型人才培养系列教材 (理工类)

模拟电子技术基础

宋忠能 主 编

顾 平 吴 莘 李绪诚 副主编

王代强 主 审

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 曾 艺 罗 雅

责任编辑: 罗 雅 曾 艺

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮件: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川省地质矿产局测绘队印刷厂

成品尺寸: 175mm×260mm 印张 14.5 字数 340 千字

版 次: 2009 年 1 月第一版

印 次: 2009 年 1 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-880-0

定 价: 26.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言



“模拟电子技术基础”是电子、通信、信息等电类专业和机电一体化等非电类专业的一门重要专业基础课，它是一门工程应用性质很强的课程。在教学中为了做到理论联系实际以提高学生学习的积极性、主动性，培养和提高学生应用理论分析和解决问题的能力以及培养学生的探索精神和创新精神就显得尤为重要。本书也是编者长期致力于模拟电路课程教学改革实践、探索的产物。

本教程主要是为高等院校三级本科学生学习专业课程和从事技术工作奠定模拟电子技术的理论基础，并使他们受到这方面必要基本技能的训练。为此，本教材对传统的内容做了精选和更新，避开了高深的理论，简明扼要地介绍学生最需要的基础知识和技术，通过通俗易懂的语言讲授基础知识，强化对集成电路的应用，着眼于方法和能力的培养。本书还通过实例、例题和习题加深学生对本书内容的掌握和理解，便于学生自学。

本书由贵州大学电子科学系部分教师编写，黄维超编写第一章和第二章；顾平编写第三章、第五章；李绪诚编写第四章并绘制全书的电路图；吴莘编写第六章、第七章；龙飞（贵州民族学院）编写第八章；田德永、王代强编写第九章；王继红编写第十章。全书由宋忠能担任主编，顾平、吴莘、李绪诚担任副主编，王代强博士担任主审，黄维超和田德永为全书的编排做了大量的工作。此外，丁召教授对全书从前期组织、策划到最后出版给予了很大的帮助和支持。在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免出现错误和不当之处，恳请读者指正。

李良荣
2008年6月

目 录

第一章 绪 论

1.1 电信号.....	2
1.2 电子信息系统.....	3
1.3 电子技术的历史及现状.....	3
本章小结.....	5

第二章 半导体二极管及基本应用电路

2.1 半导体的基本知识	8
2.1.1 本征半导体.....	8
2.1.2 杂质半导体.....	9
2.1.3 PN 结及其单向导电特性.....	11
2.2 半导体二极管及其基本应用电路.....	14
2.2.1 半导体二极管的几种常见结构.....	14
2.2.2 半导体二极管的伏安特性	15
2.2.3 二极管的主要参数.....	16
2.2.4 二极管的等效电路.....	17
2.2.5 二极管基本应用电路.....	19
2.3 稳压二极管及其基本应用电路.....	21
2.4 特殊二极管介绍.....	22
本章小结.....	23
习题二.....	24

第三章 晶体三极管及其基本放大电路

3.1 晶体三极管基础知识.....	28
3.1.1 晶体三极管的结构及类型.....	28
3.1.2 晶体三极管内载流子的运动及电流分配.....	29
3.1.3 晶体三极管的电流关系.....	30
3.1.4 晶体三极管的共射特性曲线.....	31
3.1.5 晶体三极管的参数.....	33
3.1.6 温度对三极管特性及参数的影响.....	37
3.1.7 晶体三极管的型号.....	38
3.2 放大电路的组成及其性能指标.....	40
3.2.1 放大电路的组成及放大原理.....	40
3.2.2 放大电路的性能指标.....	42
3.3 放大电路的基本分析方法.....	44
3.3.1 放大电路的静态分析.....	45
3.3.2 放大电路的动态分析.....	47



3.4 晶体管放大电路的三种基本接法	57
3.4.1 共射极组态基本放大电路	57
3.4.2 共集电极组态基本放大电路	60
3.4.3 共基极组态基本放大电路	63
3.4.4 三种接法基本放大电路的比较	65
本章小结	65
习题三	66

第四章 场效应管及其基本放大电路

4.1 场效应管基础知识	72
4.1.1 结型场效应管	72
4.1.2 MOS 型场效应管	76
4.1.3 场效应管的主要参数	79
4.1.4 场效应管与晶体管的比较	80
4.2 场效应管基本放大电路	81
4.2.1 静态工作点	81
4.2.2 共源组态基本放大电路	82
4.2.3 共漏组态基本放大电路 (源极输出器)	84
本章小结	87
习题四	88

第五章 集成运算放大电路

5.1 多级放大电路	92
5.1.1 多级放大电路的耦合方式	92
5.1.2 多级放大电路的分析	95
5.2 差分式放大电路	95
5.2.1 基本差分式放大电路	96
5.2.2 差分放大电路的工作原理	97
5.3 功率放大电路	105
5.3.1 功率放大电路概述	105
5.3.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	106
5.3.3 甲乙类互补对称功率放大电路	108
5.3.4 采用复合管的互补功率放大电路	111
5.4 集成运放中的电流源电路	112
5.4.1 镜像电流源	112
5.4.2 精密电流源	113
5.4.3 比例电流源	114
5.4.4 微电流源	115
5.4.5 多路电流源	115
5.5 集成运放的组成、原理及主要性能指标	116
5.5.1 集成运放的组成	117
5.5.2 运算放大器的工作原理	118

5.5.3 运算放大器的主要技术指标	124
5.5.4 运算放大器的种类、选择方法及使用	126
本章小结	129
习题五	130

第六章 放大电路中的反馈

6.1 反馈的基本概念及判断	138
6.1.1 反馈的基本概念	138
6.1.2 反馈的判断	139
6.2 负反馈放大电路的框图及一般表达式	140
6.2.1 负反馈放大电路的框图	140
6.2.2 反馈放大电路的一般表达式	140
6.3 深度负反馈放大电路放大倍数的分析计算	141
6.3.1 负反馈放大器的基本类型与判断	141
6.3.2 深度负反馈放大电路放大倍数的分析计算	145
6.4 负反馈对放大电路性能的影响	149
6.4.1 负反馈使放大倍数下降	149
6.4.2 负反馈放大倍数稳定性提高	149
6.4.3 负反馈使放大器的通频带展宽	150
6.4.4 负反馈使非线性失真减小, 输入动态范围展宽	151
6.4.5 负反馈使放大器内部产生的噪声与干扰的影响减小	152
6.4.6 负反馈稳定被取样的输出信号	152
6.4.7 负反馈对输入、输出电阻的影响	153
6.4.8 放大电路中引入负反馈的一般原则	155
本章小结	156
习题六	156

第七章 信号的运算和滤波电路

7.1 基本运算电路	162
7.1.1 比例运算电路	162
7.1.2 加法运算电路	164
7.1.3 减法运算电路	165
7.1.4 积分运算电路	166
7.1.5 微分运算电路	166
7.2 对数、指数、乘法和除法运算电路	167
7.2.1 对数运算电路	167
7.2.2 指数运算电路	168
7.2.3 乘法和除法运算	168
7.3 有源滤波电路	169
7.3.1 有源滤波的基本概念	169
7.3.2 一阶有源低通滤波电路	170
本章小结	172

习题七	172
-----------	-----

第八章 信号发生器

8.1 正弦波振荡电路的振荡条件	176
8.2 RC 正弦波振荡电路	177
8.2.1 RC 串并联网络的选频特性	177
8.2.2 RC 正弦波振荡电路	178
8.3 LC 正弦波振荡电路	178
8.3.1 LC 并联谐振电路的选频特性	178
8.3.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡电路	180
8.3.3 电容反馈式 LC 正弦波振荡电路	180
8.3.4 电感反馈式 LC 正弦波振荡电路	182
本章小结	182
习题八	183

第九章 直流稳压电源

9.1 直流稳压电源的一般组成	186
9.2 小功率整流滤波电路	186
9.2.1 单相整流电路	186
9.2.2 滤波电路	188
9.3 可控硅整流电路	190
9.3.1 晶闸管基本结构和原理	190
9.3.2 可控硅整流电路	192
9.4 串联反馈式稳压电源	194
9.4.1 稳压管稳压电路	194
9.4.2 串联反馈稳压电路	195
9.4.3 三端集成稳压器	197
9.5 开关电源	201
9.5.1 开关电源的基本控制原理	201
9.5.2 各类拓扑结构电源分析	202
9.5.3 开关电源的分类总结	207
本章小结	207
习题九	208

第十章 电子电路的计算机辅助分析

10.1 Multisim 概述	212
10.1.1 Multisim 的操作界面	212
10.1.2 建立电路	214
10.1.3 Multisim 分析功能	217
10.1.4 分析举例	219
10.2 可编程模拟电子器件简介	220
10.2.1 通用型可编程模拟器件内部结构与基本原理	221
10.2.2 芯片介绍	222

由于物理学的重大突破,在 20 世纪下半叶以微电子技术为标志的现代电子技术取得了空前的进步,推动了计算机、通信和网络等技术的发展。随着 21 世纪的到来,世界已进入信息时代。作为发展基础之一的电子技术必将以更快的速度前进。

电子技术的基本任务可称之为“信号的产生、传输、处理”,任务的完成取决于对电子器件、电子电路、电子系统的性能的研究。按照功能和构成原理的不同,电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类。本书着重讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本分析方法和基本应用。

1.1 电信号

“信号”是一个被广泛使用的名词。例如,无线电信号、电视信号、报警信号、交通信号等都是信息的一种物理体现。信号被定义为一个随时间变化的物理量。信号可以用来传输信息。信息既可以用语言、文字、图像来表示,也可以用人们事先规定的编码来表示。

但在很多情况下,这些表示信息的语言、文字、图像、编码不便于直接传输。为了便于信号的传输和处理,通常使用传感器把这些真实的物理信号转换成电信号来传送,即利用一种交换设备把各种信息转换为随时间变化的电压或电流进行传输。这种随信号作相应变化的电压或电流就是电信号。当电信号传送至目的地后,再利用一种与上述相反的变换设备,把电信号还原成原来的信息。

例如,在电视广播系统中,传输配有声音的景物时,先利用电视摄像机把景物的光线、色彩转变成图像信号(电压或电流),并利用话筒把声音转变成伴音信号(电压或电流),这些就是电视要传输的带有信息的电信号。然后把这些信号送入电视发射机进行处理,产生一种反映信息变化的便于传输的高频信号,再由天线将高频电信号转换为电磁波发射出去,在空间传播。电视观众用接收天线截获了电磁波很小一部分能量送入电视接收机,接收机的作用与发射机相反,它能将接收到的电磁波转换为高频电信号进行处理,从而恢复出原来的图像和伴音信号,并分别送入显像管和喇叭,供观众欣赏。

这个过程可用一个简单的方框图表示,如图 1.1.1 所示。其中,变换器指的是把表示信息的景物和声音转换为电信号的装置(如摄像机和话筒),或者反过来,把电信号转换为景物和声音的装置(如显像管和喇叭等)。

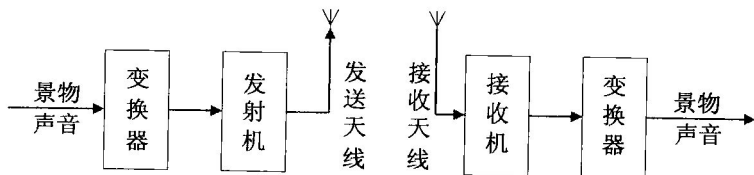


图 1.1.1 电视系统方框图

综上所述,在电子技术中谈到“信号”时,指的就是变化的电压或电流—电信号。

电信号可分为两大类，一类是信号的幅值随时间呈连续变化，称为模拟信号。模拟语音的音频信号，模拟图像的视频信号，模拟温度、压力这些物理量变化的信号都是模拟信号。

与模拟信号相对应的是数字信号，它的幅值变化在时间上是不连续的，如图 1.1.2 所示。像电灯的“亮”和“灭”，工厂产品数量的统计都是数字信号。产生和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路，如交、直流放大电路，音频信号产生电路等等。产生和处理数字信号的电路称为数字电路，如各种门电路、触发器、计数器等。

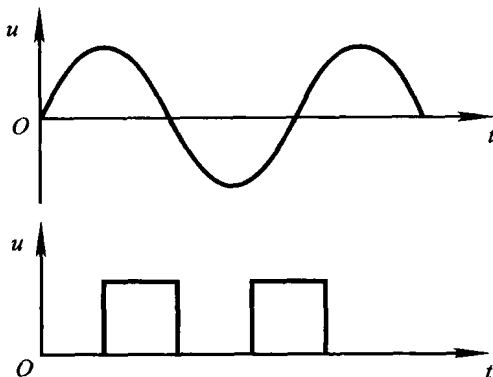


图 1.1.2 模拟信号与数字信号波形图

1.2 电子信息系统

如图 1.2.1 所示为电子系统的示意图。系统首先采集信号，这些信号来源于测试各种物理量的传感器、接收器，或者来源于信号发生器。所采集的信号经过处理后，最终应能驱动执行机构（负载）或者转换成为计算机可以处理的信号。



图 1.2.1 电子系统的示意图

实际上，传感器或接收器所提供的信号往往幅值很小，噪声很大，且易受干扰，有时甚至分不清什么是有用信号，什么是干扰或噪声。因此，信号处理分两个步骤：对信号加工前预处理（隔离、滤波、阻抗变换等）和加工（对信号进行运算、转换、比较、取样、保持等）。最后，一般要经过功率放大才能驱动负载，或者经过模拟信号到数字信号的转换才能输入计算机。

1.3 电子技术的历史及现状

电子技术就是如何制造和利用电子器件（二极管、三极管、场效应管、集成电路等）组成各种电路的一门科学。电子技术的应用，使人类进入了高新技术时代。电子技术诞生的历史虽短，但深入的领域却是最深、最广。它不仅是现代化社会的重

要标志,而且成为人类探索宏观世界和微观世界的物质技术基础。随着新型电子材料的发现,电子器件发生了深刻变革,从1904年第一支电子器件出现以来,世界电子技术经历了电子管、晶体管和集成电路等重要发展阶段。具体发展过程如下:

一、真空电子管的发明

1904年,费莱明(Fleming)发明了一种叫真空二极管的器件(在真空玻璃管内有两个电极P、K,P做成板型(称为屏极),K为灯丝(称为阴极)。通电灯丝发热,K就有一部分电子释放出来,如果在P、K间加上电压,则电流会从P流向K,反之则无电流)。二极管的特性是“单向导电性”:在一个方向上电流较大,而在另外一个方向上电流较小(理想情况的电流为0)。

电子技术的奠基器件是三极管,这是一种电压控制器件。1906年,美国人德弗雷斯特(Lee de Forest)发明了真空三极管:在二极管内部P、K极之间,加上一块栅栏型的极板G(称为栅极),G极一方面可以让电子穿过它的缝隙到达P极,另一方面它上面所加的电位高低会影响电子通过的数量,而控制P极的电流大小。

但真空电子管具有体积大(如美国人利用真空电子管制造的第一台计算机ENINC——电子数字积分和计算机 Electronic Numerical Integrator and Computer 占据了三间房子的体积,重达几十吨)、造价高、易破损等缺陷。这促使人们继续探索,做成其他材料的电子器件。

二、半导体材料的发现

半导体材料的出现,是以硅(Si)和锗(Ge)的应用为标志的。

1833年,法拉第首先发现了硫化银电阻率会随温度增加,1839年贝克勒尔(Becquerel)(法)发现了某些材料具有光电效应。这两种现象在当时是解释不了的,这就是一个世纪后才命名的半导体导电性质。

尽管人们早在1823年就发现了硅元素,但并未研究它的导电特性。1900年普朗克(Plank)(德)量子理论假说的出现和1905年爱因斯坦(Einstein)(美)对贝克勒尔光电效应的成功解释,推动了人们对半导体材料的研究。在这方面,取得成就最大的是美国贝尔(Bell)研究所。经过该研究所的肖克利(Shockley)、巴丁(Bardeen)、布拉顿(Brattain)等多位科学家的探索,人们发现了一种具有全新导电性质的固体材料——半导体。最典型的两种材料是晶体硅和晶体锗。

三、晶体管的产生

利用硅和锗这两种材料之一,美国人肖克利(Shockley)、巴丁(Bardeen)、布拉顿(Brattain)经过多次试验,终于在1947年12月23日制造出了晶体管,命名为Transistor。为此,三人获得了1956年度的诺贝尔奖。

虽然晶体管的出现使得各种电子装置体积大幅缩小、造价明显减少、可靠性大为提高,但人们仍然向着更高的目标前进。

四、集成电路的出现

在一小片半导体材料上,集中制造多个电阻、晶体管、导线,并将它们连接成电路,这就是集成电路IC(Integrated Circuit)。这样,电子装置的体积、造价会更大幅

的减少,可靠性会明显提高。

集成电路是由 TI 公司的科尔比(Kilby)(美)、费尔柴尔德公司的诺伊斯(Noyis)(美)两个人于 1959 年发明的。当时他们将平面技术、照相腐蚀技术和布线技术组合起来制成了人类史上第一片集成电路。

集成电路分类:按元器件集成度(芯片上所集成的元件数量)分为小规模集成电路(100 个元件以内)SSI(Small Scale Integrated)、中规模集成电路(100~1000 个元件)MSI(Medium Scale Integrated)、大规模集成电路(1000~100 000 个元件)LSI(Large Scale Integrated)、超大规模集成电路(100 000 个以上元件)VLSI(Very Large Scale Integrated)四种。现在集成度已达到数亿。

- 按制造工艺分为膜集成电路、半导体集成电路和混合集成电路。
 - 按电路功能分为模拟集成电路、数字集成电路、特殊集成电路。
 - 按有源器件类型分为双极型集成电路、单极型集成电路和混合型集成电路。
- 集成电路的出现,标志着人类进入了微电子时代。

五、先进电子材料的问世

电子器件的发展是以电子材料为标志的。而电子材料的发展史是从硅的发现与应用开始的。半导体材料的出现带来了电子器件的变革。但运用半导体材料制造的电子器件存在着某些限制(如规格、性能)。为了进一步缩小器件体积、提高器件性能,人们不断寻找着新的电子材料,即所谓的先进电子材料。现在这些材料已经找到,正运用在新型电子器件的制造研究之中。

现在已经发现的先进电子材料有:仿生智能材料、纳米材料、先进复合材料、低维材料(量子点、量子线、巴基球和巴基管)、高温超导材料和生物电子材料等。新型电子材料的问世,将使电子技术向更高层次发展。这些材料将使今后的电子器件具有功能化、智能化、结构功能一体化,使电子器件尺寸进一步缩小,功能更强,运算速度更快,为分子器件、单电子器件、分子计算机和生物计算机打下基础。

本章小结

1. 电子电路中的信号指的是包含信息的电压或电流信号,通常可分为模拟信号和数字信号,与此相对应,电子电路分为模拟电路和数字电路两大类。
2. 电子信息系统首先采集信号,这些信号来源于测试各种物理量的传感器、接收器,或者来源于信号发生器。所采集的信号经过处理后,最终应能驱动执行机构(负载)或者转换成为计算机可以接收的信号。
3. 电子技术就是由如何制造和利用电子器件(二极管、三极管、场效应管、集成电路等)组成各种电路的一门科学。世界电子技术经历了电子管、晶体管和集成电路等重要发展阶段。

第二章

本卷半野亭 1.1.5

《國語》子圖的卷目與圖面式一系相值並行，悉照主發字韻合，前於附圖則已而且而

© 半导体二极管及基本应用电路 第五版

◎ 半导体二极管及基本应用电路

示图 1.1.5 图例, 同形符号共式样, 统一

2.1 半导体的基本知识

自然界中的各种物质,按导电能力可划分为:导体、绝缘体、半导体。半导体导电能力介于导体和绝缘体之间。目前用来制造电子器件的半导体材料主要有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

2.1.1 本征半导体

纯净的单晶半导体称为本征半导体。它的导电性质具有如下特点:

1. 热敏性质

温度升高时,其电阻率迅速下降。利用本征半导体的热敏性质可制成各种热敏元件,如热敏电阻等。

2. 光敏性质

当一定强度的光照射在本征半导体的表面时,电阻率显著下降。利用这个特性,可制造出光电二极管和光电三极管及光敏电阻。

3. 掺杂性质

在本征半导体中掺入微量的特定杂质,其电阻率显著下降,导电能力增强。根据这种性质可制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件,例如二极管、三极管、场效应管等。

在电子器件中,用得最多的材料是硅和锗。硅和锗都是四价元素,最外层原子轨道上具有4个电子,称为价电子。每个原子的4个价电子不仅受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的4个原子发生联系。这些价电子一方面围绕自身的原子核运动,另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。相邻的原子就被共有的价电子联系在一起,称为共价键结构,如图2.1.1所示。

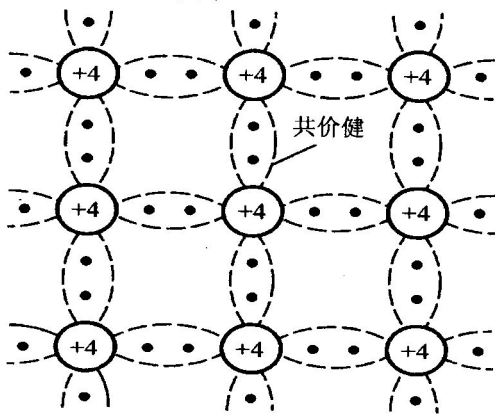


图 2.1.1 硅和锗的共价键结构

当温度升高或受光照时,由于半导体共价键中的价电子并不像在绝缘体中束缚得那样紧。价电子从外界获得一定的能量后,少数价电子会挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在原来共价键的相应位置上留下一个空位,这个空位称为空穴,如图

2.1.2 所示。自由电子和空穴是成对出现的，所以称它们为电子空穴对。在本征半导体中，电子与空穴的数量总是相等的。我们把在热或光的作用下、本征半导体中产生电子空穴对的现象，称为本征激发，又称为热激发。

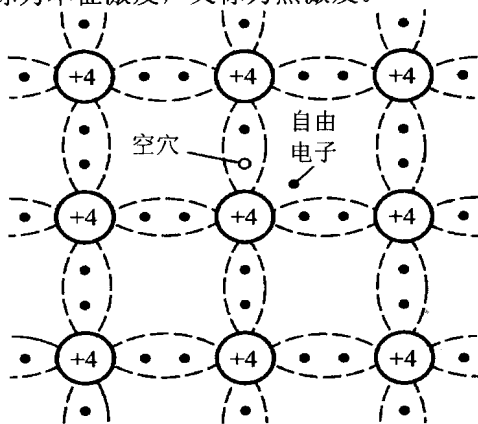


图 2.1.2 本征激发产生电子空穴对

由于共价键中出现了空位，在外电场或其他能量的作用下，邻近的价电子就可能填补到这个空穴上，而在这个价电子原来的位置上又留下新的空位，以后其他价电子又可转移到这个新的空位上。

为了区别于自由电子的运动，我们把这种价电子的填补运动称为空穴运动，认为空穴是一种带正电荷的载流子，它所带电荷和电子相等，符号相反。由此可见，本征半导体中存在两种载流子：电子和空穴；而金属导体中只有一种载流子——电子。本征半导体在外电场作用下，两种载流子的运动方向相反，如图 2.1.3 所示。

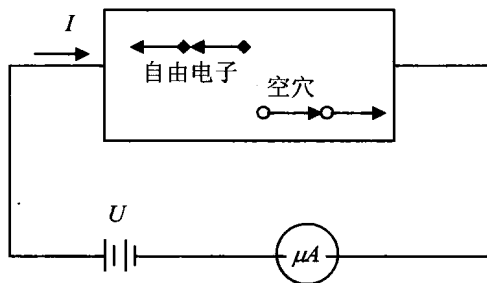


图 2.1.3 两种载流子在电场中的运动

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。由于正负电荷相吸引，因而，会使电子和空穴在运动过程中相遇。这时电子填入空位成为价电子，同时释放出相应的能量，从而消失一对电子、空穴，这一过程称为复合。显然，载流子浓度越大，复合的机会就越多。这样在一定温度下，当没有其他能量存在时，电子、空穴对的产生与复合最终会达到一种热平衡状态，使本征半导体中载流子的浓度恒定。

2.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子，但因本征载流子的浓度很低，所以它们的导