



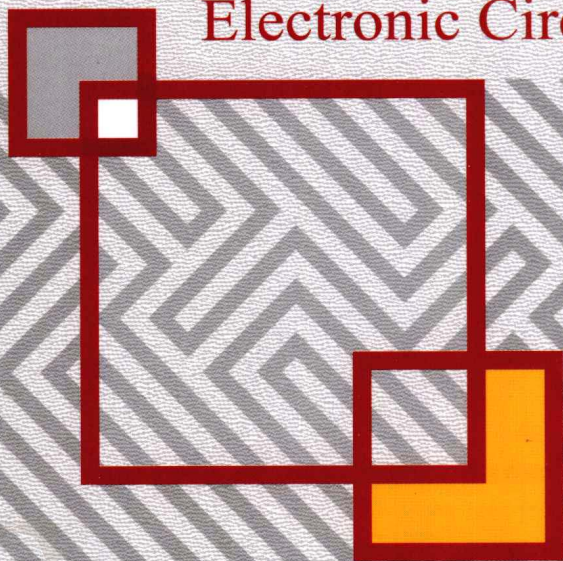
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

何丰 主编
林云 胡文江 副主编

低频电子电路

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Low Frequency
Electronic Circuits



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS


精品系列



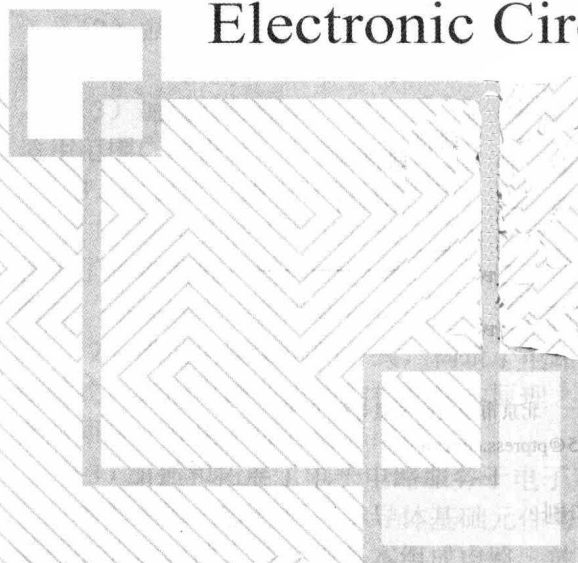
普通高等教育“十一五”
国家级规划教材

何丰 主编
林云 胡文江 副主编

低频电子电路

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Low Frequency
Electronic Circuits



人民邮电出版社
北京



精品系列

图书在版编目 (C I P) 数据

低频电子电路 / 何丰主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2011.5
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-25559-4

I. ①低… II. ①何… III. ①低频—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第147981号

内 容 提 要

本书主要内容包括半导体基础元件与非线性电路、半导体受控器件基础、半导体受控器件的分析、放大单元与基本组成电路、放大器频率特性基础、集成器件基础、反馈放大结构与应用、电路分析和电路构造案例分析。

本书涉及半导体元器件,放大电路和电流源电路,结构电路和电子电路目标分析,非线性电路分析的方法选择,电流模与滤波电路,以及比较器和直流稳压电路等内容。同时也讲解了电路仿真的一些基础概念、模拟和数字信号特点等相关问题。

全书以电信号为背景线索,以分析条件的选择和分析思路的独特性将各部分有机地联系在一起,并提供了相应的实用电路。

本书特别适用于以系统为着眼点的读者,对工程技术人员也有一定的参考作用。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
低频电子电路

-
- ◆ 主 编 何 丰
副 主 编 林 云 胡文江
责任编辑 李海涛
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.75 2011年5月第1版
字数: 335千字 2011年5月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-25559-4

定价: 28.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

本书是在多年课程建设基础上编写的。在写作中，力求站在教学改革和系列课程整体优化的高度来整合和组织内容，力求体现科学性、工程性和前瞻性。具体以电路和信号为背景，以分析条件的选择和分析思路的独特性将各部分有机地联系在一起，具体提出了如下的创新思路。

1. 课程定位

增强集成与分离的联系，加强分析思路、基础知识和信号背景知识的讲解。在学生掌握基本电路的前提下，为把握“电路模型”、“单元电路”和“结构电路”之间的联系和差异打下必要的基础。

2. 分析中体现出的一般性概念

(1) 加强对非线性的统一认识，将具体非线性元、器件的运用看成特例，以利于学生在分离与集成、模拟与数字的运用中形成“比较认识”的观念。

(2) 强调定性分析、定量分析和逻辑思维之间的工程意义，使分析与实际情况结合更为紧密。

(3) 加强等效观点，强化分析方法选择与信号目标间的联系。将计算机仿真仅作为一种适用范围广的设计、分析和计算工具加以利用。

3. 对日后电路设计的影响

(1) 强化了基本单元与结构电路单元的对比与定位，为电路设计和电路系统优化的引入打下了思维基础。同时，也增强了分析的模块化思维方法，为在日后课程中通过分层的方框图法，去理解电路需求和设计电路带来便利。

(2) 通过电路案例的方式，构筑了电路目标—信号需求—电路结构—电路实现的分析思维模式。突出电路与电路结构和基本原理之间的关系，以增强全书的连贯性、实用性和新颖性的同时，开拓了读者的思维能力。

(3) 加强和拓展了电子电路服务于电子系统的观点，增加了对数字电路服务的基础知识。

本书主要内容包括：半导体基础元件与非线性电路、半导体受控器件基础、半导体受控器件的分析、放大单元与基本组成电路、放大器频率特性基础、集成器件基础、反馈放大结构与应用、电路分析和电路构造案例分析。

本书涉及半导体元器件，基本放大电路，电流源电路，结构放大电路（差分放大器、乙类放大器、反馈放大器），电流模与滤波电路，比较电路，模拟运算电路，直流稳压电路，以及相关电路分析方法和分析方法选择等内容。同时，书中也涉及电路仿真、模拟和数字信号特点等相关问题。

本书由何丰任主编，林云、胡文江任副主编。何丰负责全书编写大纲的确定和统稿工作，并编写第1章、第4章、第7章和附录A，林云编写第2章、第3章，以及全书的电路仿真，胡文江编写第5章，曾浩编写第6章，管春编写第8章。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年3月

目 录

第 1 章 半导体基础元件与非线性电路.....1	思考与练习48
1.1 单一类型半导体的导电性能.....2	第 3 章 半导体受控器件的分析52
1.1.1 本征半导体的伏安特性.....3	3.1 非线性半导体元器件的分析概述.....52
1.1.2 杂质半导体的结构.....6	3.2 非线性受控电流器件的求解
1.2 半导体二极管的导电性能.....7	分析与应用53
1.2.1 无电压时 PN 结的载流子	3.2.1 晶体管非门基础电路53
分布与交换.....7	3.2.2 晶体管微变等效电路分析法及
1.2.2 有电压时 PN 结的导电能力.....9	其条件54
1.2.3 4 种常见二极管导电情况.....13	3.2.3 场效应管微变等效电路57
1.3 半导体非线性电路的分析基础.....16	3.3 直流工作点分析58
1.3.1 电阻特性分析初步与工程	3.3.1 工作点的建立及近似计算.....58
分析概念.....17	3.3.2 工作点的稳定性及其稳定
1.3.2 分析模型选择与典型运用	电路举例61
分析.....21	3.4 运用目标、非线性元器件的区域
1.4 半导体非线性电路的近似分析与	特性和分析方法的选取63
电路系统设计的关系.....23	思考与练习65
1.4.1 电路系统设计基础.....23	第 4 章 放大单元与基本组成电路69
1.4.2 电子仿真软件与单元电路的	4.1 放大器的恒流支撑电路70
关系24	4.1.1 晶体管恒流源70
1.4.3 单元电路与电路构造.....27	4.1.2 多路输出的场效应管恒流源.....73
1.5 低频电子电路的学习.....27	4.2 基础单元放大电路74
思考与练习28	4.2.1 晶体管基础单元放大电路.....76
第 2 章 半导体受控器件基础.....31	4.2.2 场效应管基础单元放大电路.....80
2.1 双极型晶体管的电量制约关系.....31	4.2.3 管子小信号电阻 r_{ce} (或 r_{ds}) 及
2.1.1 晶体管的导电原理.....32	其影响81
2.1.2 晶体管特性的进一步描述.....35	4.3 对称结构的单元放大电路及
2.1.3 晶体管应用举例与仿真	其优势82
模型基础.....37	4.3.1 差分放大器基础83
2.2 场效应管的电量制约关系.....38	4.3.2 乙类放大器基础90
2.2.1 绝缘栅型场效应管.....39	4.4 放大电路分析、设计的基础思路与
2.2.2 结型场效应管.....44	电路结构的认识97
2.2.3 场效应管与晶体管.....46	思考与练习99
2.3 元器件的模型研究与仿真的	第 5 章 放大器频率特性基础103
工程意义.....47	5.1 频率特性描述方法与基本增

益器件频率特性·····	103	7.3.1 负反馈结构对上、下限频率的 影响·····	160
5.1.1 频率特性的稳态描述方法·····	104	7.3.2 负反馈放大器的自激现象·····	160
5.1.2 基本增益器件的频率特性与 电路模型·····	109	7.3.3 负反馈放大器的相位补偿 原理·····	163
5.2 单元放大器频率特性基础·····	111	7.4 集成反馈放大结构的小信号运用 分析——工程近似算法·····	167
5.2.1 双极型单元放大电路的 频率特性·····	112	7.4.1 集成运放小信号时域分析和典 型运算电路·····	169
5.2.2 放大器频率特性分析举例·····	118	7.4.2 小信号的频域分析举例——有 源滤波器·····	174
思考与练习·····	121	思考与练习·····	179
第6章 集成器件基础 ·····	123	第8章 电路分析和电路构造案例分析 ·····	185
6.1 集成增益器件·····	123	8.1 精密整流与集成运放应用·····	185
6.1.1 双极型集成增益器件·····	125	8.2 比较指示器与集成运放的大 信号应用·····	186
6.1.2 MOS 集成增益器件·····	127	8.2.1 单限比较器电路分析·····	186
6.1.3 集成增益器件的技术指标·····	130	8.2.2 迟滞比较器电路分析·····	187
6.2 集成与非、或非门电路基础·····	133	8.3 电流模与电压模电路·····	188
思考与练习·····	137	8.3.1 跨导运算放大器·····	189
第7章 反馈放大结构与应用 ·····	141	8.3.2 跨导线性环·····	190
7.1 负反馈放大结构·····	142	8.4 直流稳压电源与运用·····	191
7.1.1 反馈放大结构的实现及标准 电量认定分析·····	143	8.4.1 线性直流稳压电源·····	191
7.1.2 负反馈的增益稳定性质与 负反馈电路·····	146	8.4.2 直流稳压电源的类型及 特点·····	198
7.2 负反馈放大结构的指标分析—— 方框图分析法·····	149	8.4.3 开关型稳压电源·····	199
7.2.1 反馈结构的基本放大器·····	151	思考与练习·····	202
7.2.2 反馈结构的输入输出 电阻变化·····	152	附录A 电路与模拟和数字信号 ·····	206
7.2.3 负反馈结构的方框图计算·····	154	附录B 常用符号 ·····	209
7.3 反馈放大结构的频率特性与 自激现象·····	160	参考文献 ·····	214

本课程所涉及的元器件，除了电阻、电容、电感等“电路分析”提到的元器件外，还使用了大量的半导体元器件，如晶体二极管、双极晶体管、场效应晶体管、光敏元件、热敏元件、集成电路等。

所有的半导体元器件均是以半导体独特的导电机理为基础，通过特殊的构造方式制造出来的。半导体元器件的分析可分成 3 个层次的问题来讨论。第 1 层以单一类型半导体材料的导电分析，来说明半导体的电阻性质；第 2 层以多类型半导体材料的不同简单组合，来说明晶体二极管、双极型晶体管、场效应晶体管的伏安特性；第 3 层为多类型半导体材料的复杂组合来说明最为特殊的半导体集成器件的伏安特性。通常将第 1 层次对应的实物，以及第 2 层次的晶体二极管统称为**半导体元件**，而将其余的半导体实物称为**半导体器件**。其中，第 3 层次的半导体器件也称**半导体集成器件**。

在深入学习的过程中，我们会发现第 3 层次的半导体集成器件具有如下特点。

(1) 如同简单电路单元可以组成复杂电路一样，半导体集成器件内部的半导体结构可以看成是由第 1、第 2 层次的基础半导体单元组合而成的。

(2) 基础半导体单元的组合方式多样性和复杂性导致了半导体集成器件电压电流关系各具特色。

(3) 基础半导体单元的具体组合方式应受到半导体制造水平的制约。

综上所述，可将上述第 1、第 2 层次对应的半导体元器件作为基本半导体元器件，而将第 3 层次的半导体器件看成是由第 1、第 2 层次对应元器件的不同组合，从而可将集成电路的半导体导电原理分析变成由第 1、第 2 层次对应元器件构成的等效电路的分析。这也是将集成半导体器件称为“**集成电路**”的来源。当然，这种等效的分析也由于等效的近似问题而存在局限性。但对于集成电路的应用者来说，通过等效电路展开的集成电路分析具有简单、快速的工程实用特点（对于集成电路的制造者可参见相关专业书籍）。

本章将在重点讲述第 1 层次 PN 结的电压电流关系基础上，对几种典型二极管实用元件的电压电流关系、等效模型、非线性分析方法和简单运用举例进行讨论。最后，也将对全书的学习方法进行介绍。至于半导体器件的分析将在第 2 章和第 6 章中分别讲解。典型半导体元器件的外观图如图 1-0-1 所示。

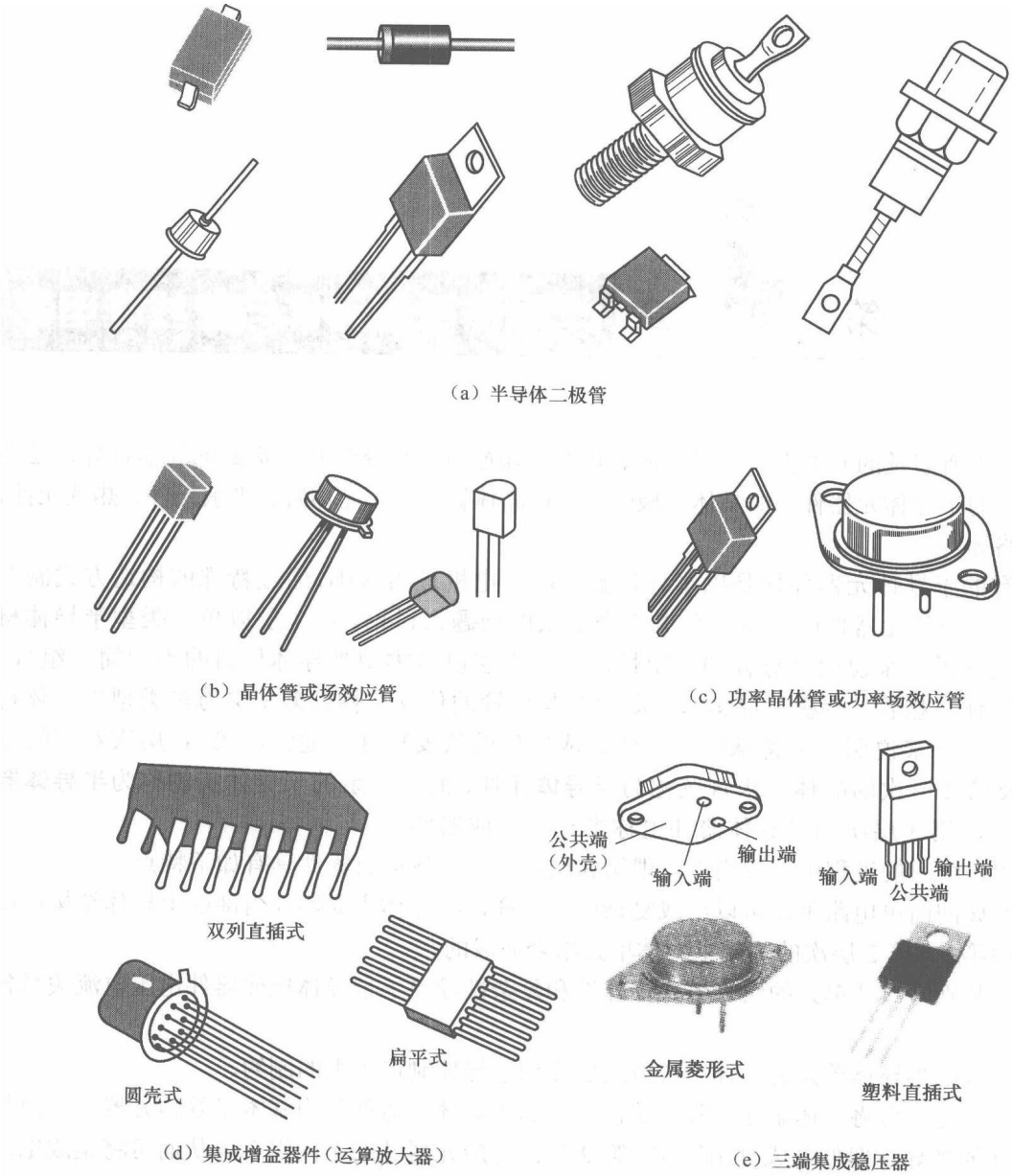


图 1-0-1 典型半导体元器件的外观图

1.1 单一类型半导体的导电性能

单一类型半导体可以分为本征半导体和杂质半导体两大类。其中杂质半导体又可以进一步分为 N 型半导体和 P 型半导体两小类。

从单一类型半导体的电气性能来看，无论是什么具体类型，均具有温控和光控的电阻特性。因此，相对于电路分析课程来说，本书必需面对时变元器件的电路分析问题。

一般来说，对于时变元器件的讨论，可采用电路分析中关于频率特性的相量分析思路，

即先以特定温度下元器件的特定参数为依据对电路进行分析讨论，并在此基础上再对温度带来的时变影响程度展开研究。

1.1.1 本征半导体的伏安特性

半导体是指具有下述两种特征的物质：一是它的导电能力应介于导体和绝缘体之间，即导电率为 $10^{-9} \sim 10^2 (\text{s} \cdot \text{cm}^{-1})$ 量级；二是它的各原子之间靠共价键的晶体结构相互结合在一起。就其本质来说，半导体（硅、锗、砷化镓等）的导电能力取决于原子的结合形式。

有关半导体导电分析中的电子运动的分析基础有共价键理论和能带理论两种。前者有利于理解半导体的晶体结构和电子轨道水平，后者有利于从宏观上理解半导体中电子的流动水平和流向能力，因此对半导体导电的分析后者更据普遍性和指导价值。本书将两种理论有机结合起来，并借助数学方法描述的载流子浓度分布曲线，向读者更准确地讲解半导体的导电机理。

1. 硅和锗晶体的共价键分析法

我们知道，以晶体方式构成的物质中，每个原子的外层电子除受到自身原子核的作用外，还受到相邻原子的作用。只有这样，原子的外层才能满足 8 个电子的稳定状态。原子最外层的电子为价电子，价电子是物质导电的基本电荷粒子。

每个硅（Si）或锗（Ge）原子在与相邻 4 个原子组成 4 个共价电子对时，应要求相邻原子的物理位置具有对称的分布方式，即整个半导体材料的原子呈现出规律排布的特征。同时，每个原子也只与它相邻的 4 个原子距离最近。由于立体图形不易制作，现以图 1-1-1（a）所示的平面图形来示意硅（或锗）的物质结构。

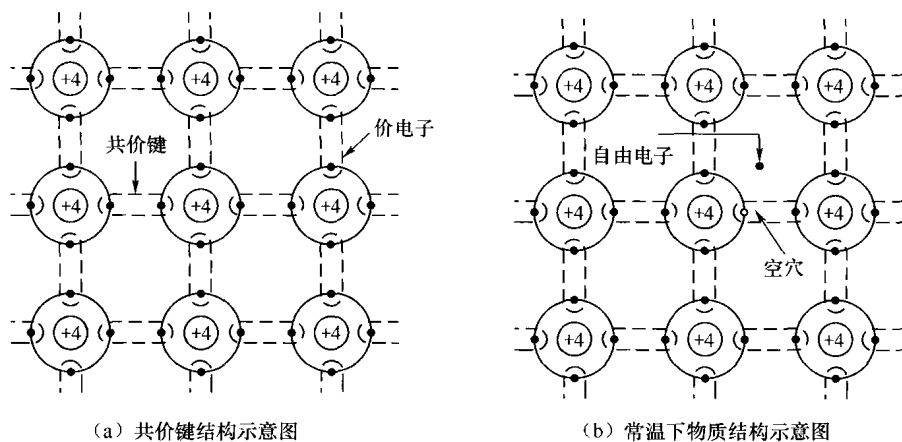


图 1-1-1 硅（或锗）的物质结构图

严格说来，由于外层价电子在共价键的作用下，已具有了稳定的结构，其导电能力已不存在。但由于半导体所处的实际外界环境，总会使原子的部分价电子在光照、热能等因素的影响下，获得足够能量挣脱束缚，进入另一个相对稳定的更高层的电子轨道区域，这一高层轨道离原子核更远，受核的束缚更弱。通常将高层轨道中的电子称为自由电子。

由此，有了如下一些重要概念。

概念 1 价电子层的电子受热或光照等能量的激励进入高层轨道的过程称为**激发**。相反，高层轨道中的电子也会在稳定性的要求下，通过释放能量（指变为光能或热能）后陷落于价电子轨道层中，这一过程称为**复合**。实际上，由于半导体中原子和电子热运动的存在，激发与复合现象随时都在发生，它们常处于动态平衡中。其中复合可以认为是物质本身具有的本能反应，而激发则是价电子获得能量后进行无规则运动的结果。由此，可以认为激发的程度与外界激励（如温度或光照）有关，而复合则与高层轨道中电子的数量有关。

概念 2 由于激发，价电子层次的电子数减少，价电子层次的电子轨道出现电子空缺，即**空穴**。显然，空穴的存在，可作为自由电子复合以及价电子层次轨道中其他电子移动的物质基础。为便于区分不同层次的电子运动，常称价电子层次的电子运动为**空穴运动**。空穴运动的方向应与价层电子的运动方向相反。空穴运动的能力与空穴的数量成正比，可用空穴的迁移率 μ_p 来表示，其值还与温度、半导体材料有关。

概念 3 高层轨道中的电子除具有原子核的较弱束缚外，还由于概念 1 的原因，原子自身以及相邻原子的同一轨道中电子数量太少的因素，使得高层次轨道中的电子具有了更大的活动余地，较容易受外力的影响发生运动。我们称这些高层轨道中的电子为**自由电子**。它的运动能力与自由电子数量成反比，可用自由电子迁移率 μ_n 来表示，其值也受温度和半导体材料的影响。与自由电子相对应的轨道称为**自由电子轨道层次**。

上述从原子出发，以共价键为基础的分析虽能决定半导体物质结构的构成，解释电子移动的某种规律。但仍存在如下两个方面的问题没有很好地解决。

第一，半导体中电子在同层次轨道中，以及各层次之间的移动中应遵循什么统一规律？

第二，在原子的同层次轨道中，空穴或自由电子的分布情况如何？

思考题 1.1.1 同层次轨道中的电子移动可采用什么名称的移动来表述？不同层次轨道中的电子移动又如何表述？

思考题 1.1.2 电子的激发与复合运动中，哪一种运动的数量规模决定了另一种运动的数量规模？

2. 硅或锗晶体中电子活动的能带分析法

硅或锗的电子分布除了可用共价键理论来解释外，还可用能带理论来描述。该理论是从整个物质出发，通过将物质中各电子的能量状态的描述来间接说明电子的分布情况。

由固体物理理论可知： n 个硅（或锗）原子构成的半导体内部，电子运行的轨道与单个原子中电子运行轨道是有区别的。具体说来半导体中的电子轨道应具有两个特点：一是轨道以不同的轨道群组合而成，各轨道群之间的物理位置相距较远；二是每个轨道群中又分成若干个具体的、相互非常接近的一系列轨道。每个轨道群与单个原子的电子层相对应，群内轨道数等于单个原子对应层轨道的 n 倍。因此，可以有**价电子轨道群**和**自由电子轨道群**之说。当然也可以简称为**价层次轨道**和**自由电子层次轨道**，而轨道的差异则采用轨道中电子具有的能量差异来描述，因此将图 1-1-2 (a) 称为**能级图**。若不考虑同一轨道群内的差异，则有图 1-1-2 (b) 所示的**能带图**。图 1-1-2 所示的**价带**对应于价层次轨道，**导带**对应于自由电子层次轨道。

概念 4 能级图在客观上反映了电子可通过吸收和释放能量来改变运行的物理轨道，而各能级间的间隔大小反映了电子进行轨道变更时需要的能量变更数值，即电子轨道转移的难

易程度。图 1-1-2 中能级间间隔最大的要数“禁带”。价带或导带内的电子受外界较小能量干预,就能极度活跃,电子要跨越禁带则需要较大的能量。我们仍将电子从价带进入导带的过程称为**激发**;电子从导带进入价带的过程称为**复合**。

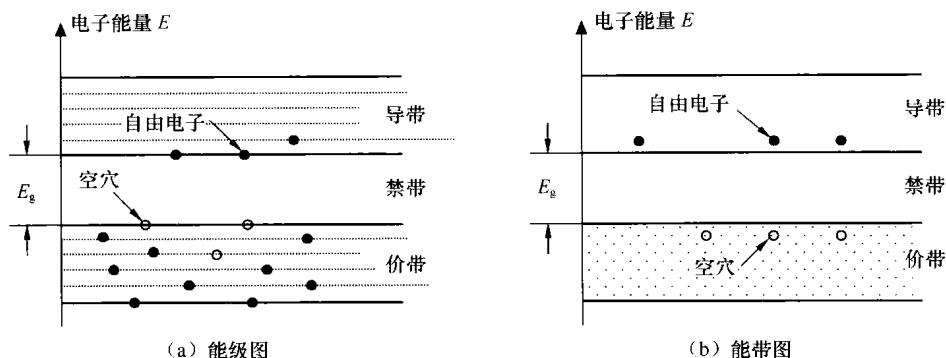


图 1-1-2 半导体的能级示意图

轨道群描述法的电子能量,即能带学说,为描述电子在各层次轨道内移动,以及各层次之间移动所应具备的能量等级条件给出了定量分析的基础。这种方法特别有利于解释不同类型半导体之间的电子运动情况,如隧道二极管的导电原理问题。

概念 5 为便于分析,仍将价带中的空位称为**空穴**,把导带中的电子称为**自由电子**。光照和温度的不同会对物质内的电子能量等级产生直接影响,并导致价带和导带轨道群中电子分布的改变,影响轨道群内电子运动的能力。

在保证物质电中性的情况下,空穴越多,价带内的电子活动余地越大;而自由电子的存在会使导带有了电子运动的可能。考虑到带内电子的轨道转换只需较小的能量,带内电子的活动空间就取决于带内电子的满员程度,而带内电子的满员程度又与环境温度和光照引起的激发和复合水平、邻近带内的电子轨道是否有空位,以及禁带的大小有关。

思考题 1.1.3 为什么空穴和自由电子在各自的轨道群内移动比激发更为容易?

3. 本征半导体的导电

同种粒子构成的半导体称为**本征半导体**。半导体的导电能力是指半导体在外电压的作用下,电子作定向移动的能力。外加电压如图 1-1-3 所示。

半导体内的电子移动可分成自由电子移动、空穴移动、激发和复合 4 种情况。前 2 种移动特指同层次轨道(或同群轨道)内的移动,后 2 种移动是不同层次轨道(或不同群轨道)间的相互移动。此外,在无外电场作用下,这 4 类移动均是在受热或光照的影响下显随机移动的特点,从统计角度来看,并无统计平均的电子定向运动存在。

当外加电场作用于半导体后,上述 4 种随机移动的过程就会受外电场力的作用形成统计平均的定向电流,即电子的定向运动。这一定向的电流因得到电源电子的不断补充和吸收,半导体内各层次轨道中电子分布仍将维持一种动态的平衡。半导体内的电中性也将保持不变。通常将电子受外电场作用形成的定向运动称为**漂移运动**。

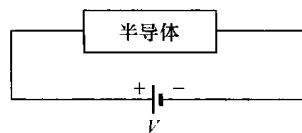


图 1-1-3 半导体导电图

概念 6 由概念 5 可知, 外电场将对导带中受热运动的电子运动产生重大影响, 这一影响将会提高电子的活跃程度, 使空穴的定向运动速度得到提高。同理, 对自由电子也有相类似的影响。由此看来, 自由电子和空穴的定向运动是半导体导电的主体。通常我们将与自由电子和空穴对应的两种导电粒子统称为**载流子**。显然, 半导体的导电能力受到了价带中空位较少造成的移动通路窄, 以及导带自由电子少的制约。

可以证明: 本征半导体中, 单位立方厘米的自由电子浓度值, 即空穴浓度为

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-E_{g0}/2kT} \quad (1-1-1)$$

式中, A 为常数 (硅为 $3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$; 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$), k 为波尔兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$, J 为焦耳), E_{g0} 是 $T = 0 \text{K}$ 时的禁带宽度 (硅为 1.21eV , 锗为 0.785eV)。

概念 7 由于锗和硅原子核的正电荷不同, 可定性得知锗原子核对电子的束缚能力比硅的要弱一些。因此, 在相同温度下, 锗更易激发, 相应的导电能力也更强。这可由式 (1-1-1) 得出。

由此看来, 本征半导体的电压电流关系可由等效的电阻元件来代替。但在概念 1 和概念 6 的条件下, 这一电阻的阻值会受到温度和光照的影响。

可以证明: 单一类型半导体的电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$) 可表达为

$$\rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)} \quad (1-1-2)$$

式中, n 和 p 分别为自由电子浓度和空穴浓度, 单位为 cm^{-3} ; μ_n 和 μ_p 分别为自由电子的迁移率和空穴的迁移率, 单位为 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$; q 为电子的电荷量, 其值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ (库仑)。

思考题 1.1.4 如何理解电子和原子的热运动是半导体导电的基本条件?

思考题 1.1.5 本征半导体中, 电子由高能级的轨道回落到低能级时产生的能量有哪些种类? 相应的电子运动类型是什么?

思考题 1.1.6 哪些外界因素可引起本征半导体的电子由低能级轨道跃升到高能级的轨道? 其相应的电子运动类型是什么?

1.1.2 杂质半导体的结构

杂质半导体是指在本征半导体中, 用其他为数不多的异种粒子 (也叫杂质) 来取代原本征半导体粒子后的晶体物质, 其结构如图 1-1-4 所示。通常, 称上述杂质的取代过程为**掺杂**。掺杂是半导体元器件制造中的一门关键技术, 这里不对它作分析。

杂质半导体可分为 **N 型** 和 **P 型** 两种。一般情况下, 可简单地将 **N 型半导体** 定义为掺有五价元素的杂质 (如磷、锑或砷等) 半导体。这时的共价键结构仍由多数粒子决定, 如图 1-1-4 (a) 所示, 五价杂质的富余价电子必然会通过释放能量进入导带成为自由电子, 这些自由电子与激发无关。因此, 在考虑到受光和光照等因素后, 杂质半导体中自由电子数应多于空穴数。**P 型半导体** 与 **N 型半导体** 相类似, 它掺杂的粒子是三价元素, 如硼、铝或镓等, 这时的多数载流子是空穴。

由于我们的注意力是半导体的导电性能, 因此在考虑激发条件时, 应将 **N 型半导体** 定义为自由电子多于空穴的半导体, **P 型半导体** 定义为空穴多于自由电子的半导体。至于多数载流子的形成方式, 则可能不止上述方式。

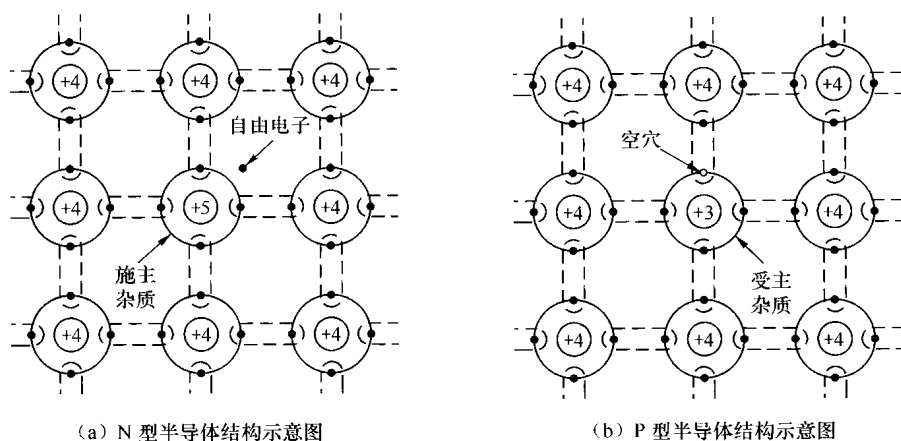


图 1-1-4 杂质半导体结构示意图

概念 8 通常将杂质半导体中的多数载流子类型称为多子，少数载流子类型称为少子。结合概念 1 可知：在杂质存在的条件下，杂质半导体极不利于激发的产生，半导体内的多子主要取决于杂质的数量。设 n_{n0} 和 p_{n0} 分别为杂质半导体中的自由电子浓度和空穴浓度。在理论上可证明

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2 \quad (1-1-3)$$

式中，下标 n 表示 N 型半导体，下标 0 表示热平衡条件。

概念 9 结合概念 1 可得：少数载流子的数量取决于激发。温度或光照对少数载流子的影响程度远大于对多数载流子的影响程度。

思考题 1.1.7 在高掺杂（半导体内杂质较多）的 N 型半导体中，再均匀掺杂极少量三价原子后，这时的半导体是否仍然为 N 型半导体？

思考题 1.1.8 杂质半导体能否用等效电阻来等效其电压电流关系？

1.2 半导体二极管的导电性能

半导体二极管是由 P 型和 N 型半导体以晶格连续为前提制成的半导体元件，它的 P 型和 N 型区域各接一个电极与外界连接，如图 1-2-1 所示。

显然，二极管属于二端元件，其半导体结构归于第 1 层次的半导体元件，对它的导电分析，应重点放在 P 区和 N 区的交界区域上。这一区域常称为 PN 结。

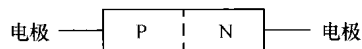


图 1-2-1 半导体二极管结构示意图

1.2.1 无电压时 P N 结的载流子分布与交换

PN 结可以根据 P 区和 N 区的掺杂浓度分为对称结和不对称结两大类。对称结是指 P 区和 N 区掺杂浓度一样的 PN 结，记为 **PN 结**；不对称结的 P 区和 N 区掺杂浓度各不相同。当 P 区掺杂浓度大于 N 区时，称为 **P⁺N 结**；N 区掺杂浓度大于 P 区时，称为 **PN⁺结**。下面仅以对称结——PN 结为例进行分析。

我们知道，电子的定向运动可分为同层次轨道中的运动和不同层次轨道中的运动两类。

同层次轨道中的定向运动除了在外电场作用下的漂移运动以外，还存在无外电场作用下的扩散运动；不同层次轨道中的定向运动则发生在“复合和激发”的过程中，当然也可以看成是某种意义上的“漂移运动”或“扩散运动”。为了便于讲述，我们将 P 型半导体和 N 型半导体之间的电子运动分为同层次轨道中的漂移运动和扩散运动，不同层次轨道中的复合运动和激发运动。

概念 1 扩散运动是基于电子相互排斥和相互碰撞理论建立的。具体含意是，同层次轨道上的电子会自动从电子相对集中的地方流向电子稀少的地方。这一流向不需要外界的电场作用，它是对电子的物理轨道层次来说的。扩散运动的动力应与同层次轨道中载流子浓度的分布变化率——即浓度变化率（也叫浓度梯度）成正比。

在 PN 结内，N 区的自由电子相对于 P 区来说，在数量上占优势，因而 N 区的多子（自由电子）会流向 P 区，使 P 区的少子（自由电子）相对增加。同理，P 区的多子（空穴）也会流向 N 区，使 N 区的少子（空穴）相对增加，如图 1-2-2 (a) 所示。由此，可得如下结论。

第一，上述扩散运动将使 PN 结交界区域的 N 区电子减少而带正电荷，P 区电子增多而带负电荷。这一交界区域也因此而称为空间电荷区。随着空间电荷区的建立，N 区和 P 区同层轨道之间的漂移运动就会出现，最终扩散和漂移运动达到了动态平衡。通常我们把动态平衡条件下，P 区和 N 区之间的统计平均电压差定义为内建电位差，用 v_B 来表示。 V_{B0} 为 PN 结间无外加电压条件下的内建电位差。可证得 V_{B0} 的计算公式为

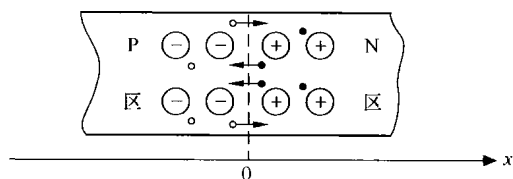
$$V_{B0} = V_T \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{p_{n0} n_i} \quad (1-2-1)$$

式中， $V_T = \frac{kT}{q}$ ，称为热电压，当 $T=300\text{K}$ 室温时， $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

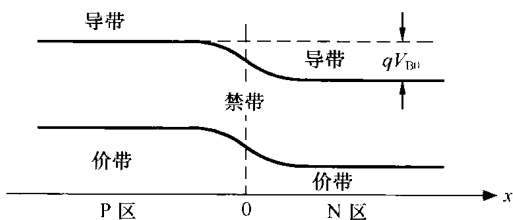
概念 2 由上可知：一旦扩散和漂移平衡后，N 区的电子就需克服 v_B 压差所对应的电子能量 qv_{B0} ，才能移向 P 区的同层轨道。由此，N 区和 P 区的同层电子轨道之间有了一个“势垒”差异。势垒所对应的物理区域称为势垒区，它与空间电荷区是同一区域。图 1-2-2 (b) 所示为相应的 PN 结能带图，它反应了电子在 PN 结区域内移动的难易程度。图中的 V_{B0} 表示无外加电压时的 v_B 。

第二，由 1.1 节的概念 1 可知，扩散引起 N 区空穴的增加将有利于 N 区复合的加强，从而减少了 N 区靠近 P 区区域的多子浓度。另一方面，P 区也存在类似的复合现象。总之，上述复合的加强，以及扩散的存在都使得 PN 结内载流子水平的下降，因而 PN 结所在的区域也称耗尽层。

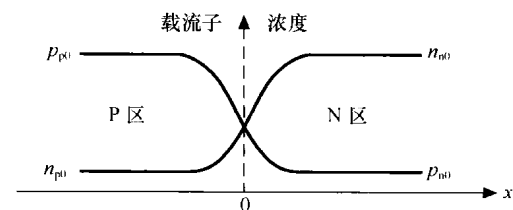
综合扩散引起的复合和漂移运动，可以认为自由电子和空穴的浓度在 PN 结内存在着一



(a) PN 结扩散模型



(b) PN 结能带图



(c) PN 结的载流子浓度分布

图 1-2-2 PN 结内载流子移动的难易程度讨论

个平稳过渡的现象，其分布如图 1-2-2 (c) 所示。

第三，由 PN 结的能带图 1-2-2 (b) 可以看出，相对于本征半导体而言，N 区导带与 P 区价带之间的电子转移更为容易。这一 PN 结不同轨道层次间的电子转移，从轨道层次看仍可称为复合或激发，但从所需能量角度看，它们在吸收或释放出小于禁带所表征的能量条件下就能实现移动。这里的“复合”和“激发”是由 P 区和 N 区之间的不同轨道层次电子转移所形成的，这样的转移会引起 PN 结间的电子流动。

概念 3 综合起来，可以说扩散和 PN 区间的“复合”均支持电流从 P 区流向 N 区；而由此建立的内建电场将支持漂移和 PN 区间的“激发”所形成的从 N 区流向 P 区的电流。这两种电流的平衡就是真正意义上的扩散与漂移的动态平衡。对于同层次轨道中的扩散规模应通过图 1-2-2 (c) 所示的载流子浓度分布曲线来分析；对于漂移、“复合”、“激发”则由图 1-2-2 (b) 来分析。因此，图 1-2-2 (b)、(c) 两图的结合是分析 PN 结间总电流的基础，图 1-2-2 (b)、(c) 各自所反应的仅是一个侧面。

思考题 1.2.1 在无外电场作用下，PN 结间电子的各种运动中，哪一个是主动的？

思考题 1.2.2 能否用能带理论中能级的高、低来近似说明 PN 结内原子核与电子之间的相对物理距离？为什么？

1.2.2 有电压时 PN 结的导电能力

下面仍以对称结为例进行 PN 结的讨论。

1. PN 结的电阻特性

通过前面的分析，我们很自然地想到：PN 结在外电场作用下，空间电荷区的电场强度会发生变化，从而打破了无外电压条件下扩散与漂移的动态平衡，最终使 PN 结间形成定向电流。图 1-2-3 (b) 所示为一实际 PN 结的电阻特性，常称为伏安特性。图中的 $V_{(BR)}$ 为反向击穿电压。

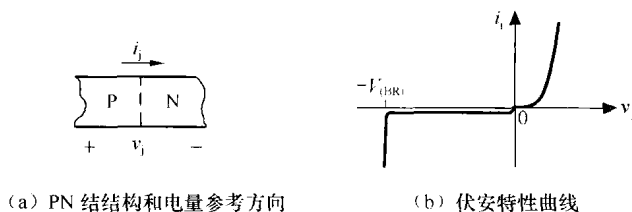


图 1-2-3 PN 结伏安特性

(1) 在外加结电压 $v_j > 0$ 时，PN 结的伏安特性。

$v_j > 0$ ， v_j 产生的电场正好与 PN 结固有的内建电场的方向相反，削弱了空间电荷区的总电场强度，载流子在 PN 结内的漂移加强。此外，外加电压的电源还具有不断吸走 P 区电子，不断补充 N 区电子的功能。也就是说电源正极吸收了 N 区流入 P 区的电子，电源负极补充了 N 区流向 P 区后的电子损失。由此可推知，外加电压将引起 PN 结中载流子作统计意义上的定向运动，以及改变 PN 结的载流子分布。现具体分析如下。

第一，在外电源对电子的吸收与补充之下，PN 结间的载流子分布将由图 1-2-4 (b) 中无外加电压时的虚线转变成实线所示。

第二，由于载流子的重新分布以及 PN 结的电中性，我们很自然地想到，这时的 $v_B < V_{B0}$ (v_B 为外电压作用下的 PN 结的实际内建电位差)。在 N 区的导带与 P 区的价带电子能量差较大时，可近似认为 P、N 区之间的载流子交换只在同层次轨道上进行。根据本节概念 1 和 2，可得 PN 结之间的同层电子轨道的扩散强于漂移，由此，形成了 PN 结之间大于零的正向电流 i_j ，相应大于零的 v_j 称为 PN 结的正向压降。

由上面的分析，可以推得：在 v_j 接近并大于 V_{B0} 后， i_j 随 v_j 的增长幅度将会变得较快；但无论 v_j 如何， v_B 是始终不会消失的， v_B 的变化量应随 v_j 的增大而变小，相应空间电荷区也应变窄。

(2) $-V_{(BR)} < v_j < 0$ 时，PN 结的伏安特性。

此时 v_j 形成的电场与 PN 结因扩散产生的内建电场方向一致，PN 结间的电子交换，将由 $v_j = 0$ 时的扩散与漂移相等的状态变为漂移大于扩散的新模式。这时，PN 结内建压差 v_B 增大 (大于 V_{B0})，P 区的自由电子供不应求 (不能维持 N 区自由电子向电源正极的移动)，所以，自由电子浓度的分布将由图 1-2-5 (b) 所示的虚线变为实线。其中 P 区的 n_p 分布为典型的供不应求图形。PN 结的空穴也有类似的分布。

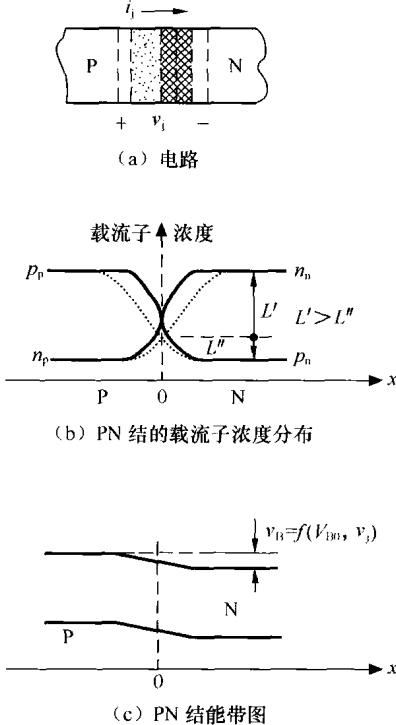


图 1-2-4 $v_j > 0$ 时的 PN 结导电分析

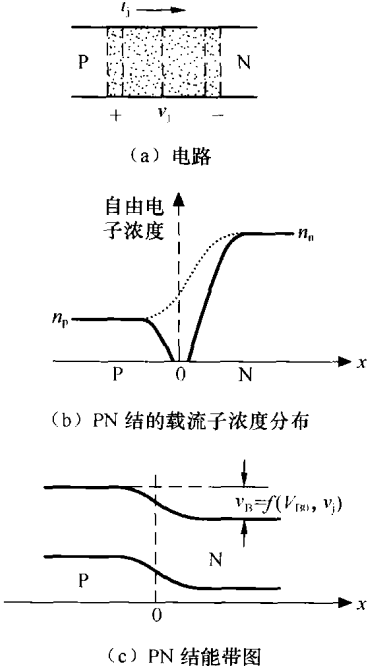


图 1-2-5 $-V_{(BR)} < v_j < 0$ 时的 PN 结导电分析

综上所述，在保证 PN 结的整体电中性原则下，空间电荷区将消耗较大的电压来形成 i_j ，而由于少数浓度关系， v_j 的反向增大 (即 v_j 减小)，会引起空间电荷区的加宽，但对 i_j 的影响甚微。

将上述 (1)、(2) 情况结合起来，可以证得 PN 结的近似电阻特性为