

高等学校教材

低频电子线路

第二版

张肃文 主编



高等教育出版社

高等学校教材

低频电子线路

第二版

张肃文 主编

高等教育出版社

内容简介

本书在第一版的基础上,进行了全面修订,仍与张肃文主编的《高频电子线路》教材配套使用。全书由原来的八章增为九章,内容有晶体二极管、三极管与场效应管的原理与特性,放大器基础,频率响应,负反馈放大器,低频功率放大器,集成运算放大器原理与应用,电流模电路等。与第一版比较,本版具有如下特点:基本概念进一步严密确切,删繁就简,循序渐进,内容力求少而精;例题和习题与内容匹配,便于教学。

本书可作为高等学校电子类专业的教材,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路/张肃文主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2003.12
ISBN 7-04-013041-6

I. 低… II. 张… III. 低频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 091951 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 化学工业出版社印刷厂

开 本	787×960 1/16	版 次	1987年5月第1版 2003年12月第2版
印 张	26.25	印 次	2003年12月第1次印刷
字 数	490 000	定 价	30.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑	张培东
责任编辑	李葛平
封面设计	于文燕
责任绘图	朱静
版式设计	胡志萍
责任校对	存怡
责任印制	孔源

序 言

本书自 1987 年问世以来，已经过了十几年的岁月。在此期间，电子技术继续迅猛地发展，我国的教学改革也在不断深入，因而本书的修订工作势在必行。

此次修订所遵循的指导思想仍然是“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”。由于本课程是一门技术基础课，因而它所涉及的基本理论、分析方法和基本单元电路等内容，应该是相对稳定的。因此在第一版的基础上，做了如下修订：

1. 调整内容，将差分放大器等内容调入放大器基础一章，BJT 集成电路工艺调至晶体三极管一章，并在场效应管一章中，补写了 MOS 集成电路工艺，目的是使学生尽早接触到集成电路的基础知识。

2. 尽可能删除陈旧过时的内容，补充集成电路的有关内容，并对各章习题做了修订补充，对习题参考答案进行订正。

3. 对一些章节进行了改写，例如混合电路的推导，放大器与负反馈放大器的基本概念等，力求更为简明扼要。

4. 增添集成电路典型电路介绍与电流模电路等新内容。

此次修订工作，第一版另二位作者——彭道义与肖华昌二位老师因故未参加，由编者一人独力承担，深感任务的沉重。幸经清华大学高文焕教授对修订初稿作了细心校订，提出许多中肯的修订意见，才使定稿质量得以提高。原使用此教材的兄弟院校的老师对第一版提出的批评与建议，均对修订工作有很大帮助。还应特别说明，没有彭、肖二位老师对第一版所做的贡献为基础，此次修订工作是不可能完成的。

谨对以上各位老师致以衷心谢忱，并恳请读者对本书不当之处不吝指正。

老妻陈礼瑛在生前对编者的写书工作，几十年来给予全力支持，此书也是在她生前的鼓励下进行修订的，此书的出版是对她最好的纪念。

张肃文

2003 年 6 月于武汉大学电信学院

第一版序言

本书是为了与张肃文主编的《高频电子线路》配套，根据1980年在成都召开的高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组所审订的1981~1985教材出版计划编写的。因此，本书的章、节编排格式与符号等均与《高频电子线路》(第二版)一书保持一致。全书共分八章，即：晶体二极管的基本特性，晶体三极管的基本特性，场效应管的基本特性，放大器基础，放大器的频率特性，负反馈放大器，低频功率放大器，集成运算放大器及其应用。各章内容取材基本上按照这次会议上所审订的《电子线路(I)(II)教学大纲》(无线电技术类四年制专业试用)，经过反复多次修改试用才定稿的。

由于无线电电子学的飞跃发展，新理论、新电路、新器件、新工艺层出不穷，日新月异，但同时某些基本理论与基本电路并未过时。《低频电子线路》主要是研究放大器的基本理论、分析方法与基本电路，因而其内容应该是相对稳定的。当然，陈旧部分应该删除，新的材料必须适当补充。目前，电子线路内容与学时之间的矛盾日益尖锐，如何坚决贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则，对于本课来说，就显得更为必要。本书力图遵循这一原则，但限于我们的思想认识与业务能力，做得还是很不够的，有待今后继续努力。

本书遵照国家标准计量局办公室1977年12月15日印发的《国际单位制及使用方法》，将过去通用的微微法改为皮法(pF)，毫微亨改为纳亨(nH)，千兆赫改为吉赫(GHz)，欧姆改为西门子(S)。书中插图符号基本上遵照电子工业部颁发的部标准SJ137-65。在编排上，各章加*号部分为选读或自学内容；每章之末附有思考题与习题，并列举了有关参考资料，供进一步学习之用；书末有习题答案，供参考使用。

本书由张肃文同志担任主编，具体执笔分工如下：

张肃文：第一、二章；

彭道义：第五、七、八章；

肖华昌：第三、四、六章。

最后由张肃文同志统审定稿。

本书初稿完成于1981年，经教学试用修改后，于1983年交出送审稿。由北京航空学院张风言同志主审，电子线路编审小组委托编委谢嘉奎同志复审。他们都认真负责地进行了审阅，提出了许多宝贵意见。华中工学院以及西安空

军工程学院、人民解放军石家庄军械学院等院校的有关老师在试用过程中，提出了修改意见。经我们反复修改，最后于1985年定稿。由于上述单位与张、谢等同志的大力协助，使书稿质量得以提高，谨致衷心的感谢。

限于我们的思想水平与业务能力，本书虽几经修改，但不妥与谬误之处仍可能存在。恳请使用本书的师生与广大读者不吝指正。意见请寄高等教育出版社电子编辑室或武汉大学无线电信息工程学系张肃文收。

编 者

1985年10月于武汉

目 录

第一章 晶体二极管	1
1.1 半导体的物理基础.....	1
1.1.1 锗、硅的晶体结构与特性.....	2
1.1.2 半导体内的导电过程.....	5
1.1.3 杂质对半导体特性的影响.....	11
1.1.4 非平衡载流子与寿命.....	13
1.2 PN 结与二极管特性.....	15
1.2.1 PN 结的形成与整流特性.....	16
1.2.2 通过 PN 结的电流方程.....	21
1.2.3 PN 结电容与势垒区宽度.....	21
1.2.4 PN 结击穿.....	26
1.2.5 温度对二极管特性的影响.....	28
1.3 二极管的等效电路.....	28
1.4 晶体二极管的应用.....	30
1.4.1 整流电路.....	30
1.4.2 稳压电路.....	31
附录 1.1 二极管方程的证明.....	32
附录 1.2 在反向偏置下 PN 结边界附近的少数载流子分布.....	33
附录 1.3 在 P 区与 N 区中的电子电流与空穴电流.....	35
思考题与习题.....	39
第二章 晶体三极管	43
2.1 概述.....	43
2.2 晶体三极管的工作原理.....	45
2.2.1 电流的传输过程.....	45
2.2.2 基区传输效率与发射效率.....	46
2.2.3 载流子浓度分布与电流的关系.....	47
2.3 艾伯斯-莫尔 (Ebers - Moll) 等效电路.....	50
2.4 晶体三极管的基本组态与伏安特性曲线.....	53
2.4.1 共基极组态.....	53
2.4.2 共发射极组态.....	58
2.5 晶体三极管的电容.....	64

2.6 晶体三极管的直流参数与极限参数	65
* 2.7 BJT 集成电路工艺简介	68
2.7.1 平面工艺简介	68
2.7.2 集成电路的制作过程	69
2.7.3 半导体集成电路元件及其特点	71
附录 2.1 艾伯斯-莫尔方程的证明	74
思考题与习题	76
第三章 场效应管	79
3.1 结型场效应管	79
3.1.1 结型场效应管的结构与工作原理	79
3.1.2 结型场效应管的输出特性与转移特性	83
3.2 绝缘栅场效应管 (MOSFET)	86
3.2.1 N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构、工作原理与特性曲线	86
3.2.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管的特点	90
3.3 场效应管的主要参数	92
3.4 场效应管与晶体管的比较	95
* 3.5 功率场效应管	96
3.5.1 V-MOS 管的结构与工作原理	96
3.5.2 V-MOS 管的输出特性与转移特性	97
3.5.3 V-MOS 管与普通 MOS 管的比较	98
* 3.6 MOS 集成工艺简介	99
思考题与习题	101
第四章 放大器基础	103
4.1 放大器的基本概念	103
4.1.1 共发射极放大器	103
4.1.2 偏置电路	107
4.1.3 温度对晶体管特性的影响	111
4.1.4 放大器的主要技术指标	112
4.2 分析放大器的基本方法(一)——图解分析法	119
4.3 分析放大器的基本方法(二)——等效电路分析法	125
4.3.1 晶体管的物理参数模型	126
4.3.2 放大器的等效电路分析法	129
4.3.3 三种基本组态放大器中频段放大特性的比较	139
4.4 多级放大器	139
4.4.1 级间耦合方式	140
4.4.2 总增益与单级增益的关系	141
* 4.5 场效应管放大电路	144

4.5.1 场效应管的放大原理及三种基本组态	145
4.5.2 场效应管放大器的偏置电路	145
4.5.3 场效应管放大器动态运用时的基本分析方法	146
4.6 差分放大器	153
4.6.1 基本差分放大电路 (differential amplifier)	153
4.6.2 超 β 管差分放大电路	163
4.6.3 互补差分放大电路	165
4.6.4 差分放大器的调零电路	165
4.7 电流源电路	166
4.7.1 基本电流源	166
4.7.2 威尔逊电流源	168
4.7.3 比例电流源	168
4.7.4 微电流源 (Widlar 电流源)	169
4.7.5 MOS 管镜像电流源	170
4.8 电平位移电路	171
4.8.1 互补型电平位移电路	171
4.8.2 用射极跟随器作电平位移电路	172
4.8.3 分压式电平位移电路	172
4.8.4 改进的分压式电平位移电路	173
思考题与习题	174
第五章 放大电路的频率特性	189
5.1 概述	189
* 5.2 线性系统的一般分析方法	190
5.2.1 传输函数和极零点	190
5.2.2 系统的频率响应	192
5.2.3 波特图的近似作法	195
5.3 晶体管的高频特性	201
5.3.1 共基短路电流传输系数 α 与频率的关系	201
5.3.2 共射短路电流传输系数 β 与频率的关系	202
* 5.3.3 α 和 β 的相位修正	203
5.4 阻容耦合共射放大级的频率特性	204
5.4.1 低频段频率特性	205
5.4.2 高频段频率特性	207
5.5 共基、共集放大电路的高频特性	211
5.5.1 共基电路	211
5.5.2 共集电路	212
5.6 多级放大器的频率特性	214

5.7 展宽频带的一般方法	216
5.7.1 补偿法	216
5.7.2 组合放大电路	220
思考题与习题	222
第六章 负反馈放大器	224
6.1 反馈的基本概念	224
6.2 负反馈放大器的类型	227
6.2.1 电流反馈与电压反馈	227
6.2.2 串联反馈与并联反馈	228
6.2.3 四种反馈类型的性能参数	233
6.3 负反馈对放大器性能的影响	238
6.3.1 放大器增益稳定性的提高	238
6.3.2 频带展宽	238
6.3.3 非线性失真减小	242
6.3.4 改变了放大器的输入电阻和输出电阻	244
6.4 深度负反馈	250
*6.5 单环负反馈放大器的方框图分析方法举例	252
6.6 提高输入电阻的自举电路	264
6.7 反馈放大器的稳定性	265
6.7.1 负反馈放大器的自激及稳定工作条件	265
6.7.2 多级反馈放大器工作的稳定性与反馈深度 ($F_0 = 1 + A_0 B_0$) 的关系	270
6.8 放大器的相位补偿	274
6.8.1 简单电容补偿 (滞后补偿)	275
6.8.2 阻容串联补偿	278
6.8.3 密勒电容补偿	280
6.8.4 超前补偿	284
6.9 反馈放大器电路举例	285
思考题与习题	286
第七章 低频功率放大器	297
7.1 概述	297
7.2 单管功率放大器	299
7.2.1 电路及工作原理	299
7.2.2 输出功率和效率	301
7.2.3 功率三角形和最佳负载	303
7.3 变压器耦合乙类推挽功率放大器	305
7.3.1 电路及工作原理	305
7.3.2 输出功率、效率和管耗	307

7.3.3 交越失真	310
7.4 无输出变压器功率放大器 (OTL 电路)	312
7.4.1 单端推挽电路	313
7.4.2 互补对称电路	315
7.4.3 准互补对称电路	316
7.4.4 无输出变压器乙类推挽电路中的能量关系	318
7.5 集成音频功率放大电路举例——LM380	319
*7.6 功率管的安全使用	321
7.6.1 功率管的散热	321
7.6.2 功率管的保护措施	326
思考题与习题	330
第八章 集成运算放大器及其应用	334
8.1 概述	334
8.2 输出级及其他辅助电路	335
8.2.1 双端变单端电路	335
8.2.2 有源负载	336
8.2.3 输出级及过载保护电路	337
8.3 集成运算放大器电路示例	339
8.3.1 FO07 集成运算放大器	339
8.3.2 MOS 集成运算放大器	341
8.4 运算放大器的特性参数	343
8.4.1 运算放大器的直流和低频参数	343
8.4.2 运算放大器的高频与大信号动态参数	346
8.5 集成运算放大器的应用	347
8.5.1 基本放大电路	347
8.5.2 数学运算电路	350
8.5.3 其他应用	354
8.6 运算放大器的误差	358
思考题与习题	363
第九章 电流模电路简介	369
9.1 概述	369
9.2 跨导线性回路原理	370
9.3 TL 回路构成电流放大电路	373
9.4 电流传输器	376
9.4.1 工作原理	376
9.4.2 应用举例	379
参考文献	382

部分习题答案	383
符号表	387
名词索引	401

第一章 晶体二极管

1.1 半导体的物理基础

半导体 (Semiconductor) 的发展历史, 正是事物螺旋式地发展的一个极生动的例子。19 世纪 90 年代发明无线电的时候, 就是利用某些物质的半导体特性来检取无线电信号的。1904 年, 真空二极管问世, 取代了初期那种“矿石检波器”的地位, 半导体不再为人注意。但随着工作频率的不断提高, 电子管的极间电容与电子渡越时间 (transit time) 的影响逐渐显著, 于是人们又重新注意到半导体, 对它进行了深入的研究, 终于使点接触型晶体管首先应用于厘米波段的混频与检波。但这已不是初期的矿石检波器, 而是上升到了一个新的阶段。1948 年第一只晶体三极管 (transistor) 的出现, 为无线电电子学的发展揭开了新的篇章。到现在, 各种类型的晶体管在许多方面已取代了电子管的传统地位, 成为极其重要的电子器件。20 世纪 60 年代开始出现的将“管”“路”结合起来的集成电路, 几十年来已取得极其巨大的成就, 中、大规模乃至超大规模集成电路的不断涌现, 已成为电子线路、特别是数字电路发展的主流, 对人类进入信息时代起了不可估量的推动作用。

晶体管与电子管 (electron tube) 虽然在电路特性方面有很多共同之处, 但它们的工作原理是截然不同的。电子管的作用区是在真空中, 在真空中形成电流的只有电子流动。而晶体管的作用区是在固体晶体中, 它的电流流动机理要复杂得多。造成复杂的原因是, 在半导体器件中, 电流的流动是由四种不同过程造成的: 半导体中一般存在着两种迁移的载流子 (多数载流子 majority carrier 与少数载流子 minority carrier), 每一种载流子既可借电势梯度 (电场 electric field) 所引起的漂移作用载运电流, 又可借浓度的扩散作用来载运电流, 因而共有四种电流的流动过程。而在电子管中只需考虑一种电流过程, 即由电势梯度所引起的一种载流子 (电子) 的漂移作用。

由此可知, 为了了解半导体器件的作用, 必须对半导体的某些物理性质进行必要的探讨。

从现象上来看, 半导体的电阻率介乎导体与绝缘体之间。例如, 铜的电阻率为 $1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, 良好的绝缘体——云母的电阻率为 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 最常用的半导体材料——纯锗 (germanium 简写为 Ge) 的电阻率在室温 27°C (300K)

下为 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ ，纯硅（silicon 简称为 Si）的电阻率为 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。由此可知，半导体的电阻率远大于金属的电阻率，这是半导体的第一个特点。除此之外，它与金属的电阻率相比，还有以下几个特点：

① 对温度的反应灵敏 金属的电阻率随温度的升高而略有上升，例如温度每上升 1°C ，铜的电阻率仅增加 0.4% 左右；但半导体的电阻率则随温度的上升而急剧下降，例如纯锗，温度从 20°C 上升到 30°C ，电阻率要降低一半左右。

② 杂质的影响显著 金属中含有少量杂质，电阻率不会发生显著变化。但是，极微量的杂质掺在半导体里，就会引起电阻率的极大改变。例如，在纯硅中加入百万分之一的硼，就可以使硅的电阻率从 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 急剧减小到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。

③ 光照可以改变电阻率 金属的电阻率不受光照的影响，但适当的光照可以使半导体的电阻率发生显著变化。半导体的这种物理属性叫作光电导。

温度、杂质、光照对半导体电阻率的上述控制作用是制作各种半导体器件的物理基础。

1.1.1 锗、硅的晶体结构与特性

众所周知，晶体管的基本材料是锗和硅^①。它们都是四价元素，也就是说，可以认为它们的原子（atom）是由四个价电子（valence electron）和一个具有 $+4$ 电荷的离子核心（即原子核 atomic nucleus）构成的，价电子环绕原子核运行，每个原子呈电中性。图 1.1.1 为这两种元素的单个原子结构示意图。对于这些四价元素来说，它们的原子之间的结构是如图 1.1.2 所示的金刚石结构。图中，每一个小球代表一个原子，每一个原子附近有四个邻近原子，彼此之间由价电子互相联系起来，组成所谓“共价键”（covalent bond），在图中用小棒来表示，每一小棒表示两个价电子在相邻两个原子之间结构。为了方便地表示图 1.1.2 的结构，可以用图 1.1.3 的平面形式来代表。图中，用两根平行短线来代表共价键。本图表示价电子都被束缚于共价键中，这是在极低温度（热力学温度，即绝对零度）下的情形，此时，半导体相当于绝缘体。这种纯净的、没有结构缺陷的半导体叫作本征半导体（intrinsic semiconductor）。

但是，价电子的这种被束缚状态并不是牢不可破的。只要给这些价电子以足够的能量，例如升高温度，就使原子在晶格中的热扰动加强，以致可以使价电子脱离共价键的束缚，成为自由电子（free electron），参加导电。这种现象叫作“本征激发”（intrinsic excitation）。本征激发所需的能量决定于物质的性

^① 目前，砷化镓（arseniuretted gallium 简称为 GaAs）也是晶体管的基本材料，尤其是作为微波晶体管的基本材料。

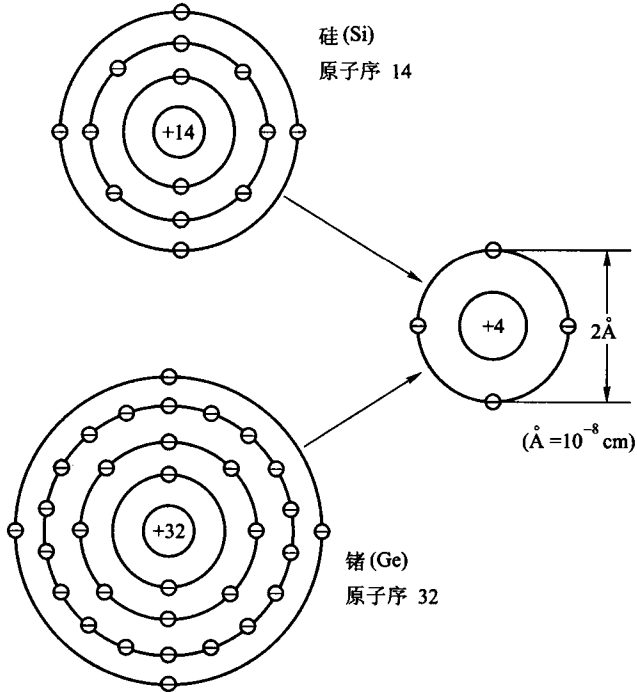


图 1.1.1 硅与锗的原子结构示意图

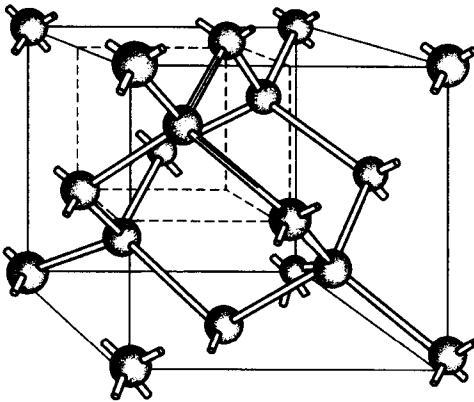


图 1.1.2 金刚石结构模型

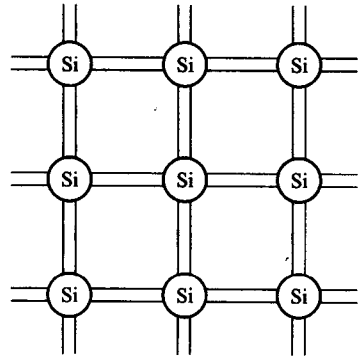


图 1.1.3 硅(或锗)的共价键结构平面示意图(温度极低时)

质。对于锗，至少需要 0.67 电子伏^① 的能量，才能激发出自由电子，硅则至

① 电子伏 (eV) 是一个电子在经过一伏电位差后，所获得的能量。1 eV \approx 1.6×10^{-19} J (焦耳)

少需要 1.1 电子伏的能量。

可以想见，当价电子挣脱束缚成为自由电子后，在原来的共价键处就留下一个空位。这个空位叫作“空穴” (hole)。空穴可以认为是一个与电子的负电荷 $-q$ 数值相等的正电荷 $+q$ 。这是因为，当原子失去一个价电子后，它本身不再是电中性的，而成为 $+q$ 了。它具有从另外原子中俘获一个电子的能力，这时空穴就移至另外的原子。这样，空穴也像自由电子一样，可以在晶格中自由移动，不过它移动的方向正好与自由电子运动的方向相反。图 1.1.4 表示本征激发产生的电子-空穴对。

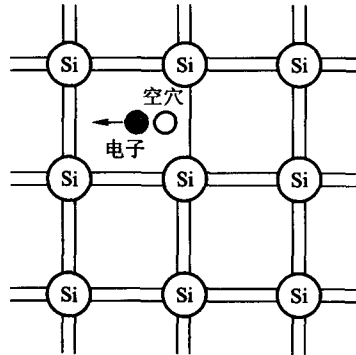


图 1.1.4 本征激发产生的
电子-空穴对

没有外电场时，电子和空穴的运动都是无规律的，不能形成电流。有了外电场，共价键的电子沿与电场相反的方向运动，填补空位。这就表现为空穴沿电场方向移动。因此空穴电流与电场方向相同，自由电子所形成的电子流则与电场方向相反，亦即电子所

形成的电流也与电场方向相同。半导体中的电流等于电子电流与空穴电流的总和。半导体具有电子导电与空穴导电两种作用，而金属则只有电子导电一种作用。这是二者导电机理的根本差别。

必须注意，空穴导电作用不能看成是正离子 (positive ion) 的运动，因为离子质量很大，它们被束缚在晶格内，本身不能移动。空穴导电归根到底还是电子运动的结果，不过不是导电电子，而是大量价电子运动的表现，相当于使一个电离的原子通过俘获另一个原子的价电子，将电离状态移至另一个原子的结果。空穴和导电电子都叫作载流子 (carrier)。

应当指出，由本征激发所产生的电子与空穴是成对的，二者数量完全相等，因此就整体来看，本征半导体仍然是电中性的。如用 n 代表导电电子的浓度，对于本征激发， p 代表空穴的浓度。则有如下的关系式：

$$n = p = n_i \quad \text{或} \quad np = n_i^2 \quad (1.1.1)$$

式中， n_i 称为本征载流子浓度，它代表本征激发所产生的导电电子或空穴的浓度。

在室温下，本征激发的数目是很小的。例如，锗在室温下大约 10^9 个原子才能产生一个本征激发电子空穴对；硅就更困难，大约要 10^{12} 个原子产生一个本征激发电子空穴对。当温度升高时，本征激发加强，载流子浓度增加，因而半导体的电阻率迅速下降。

为了进一步说明半导体的电阻率问题，我们来研究一下半导体内的导电