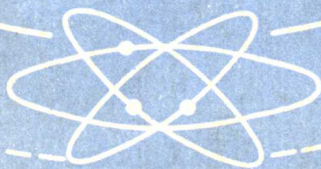


中等专业学校教材

计算机电路基础

金长义 哈长富 编



电子工业出版社

计算机电路基础

金长义 哈长富 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书由基础知识、模拟电路和脉冲数字电路等三部分构成。内容包括：半导体器件、低频小信号电压放大器、负反馈放大器、运算放大器、正弦波振荡器、分立元件脉冲电路、双极型集成门电路、双极型集成双稳态触发器、MOS 数字集成电路、晶体管直流稳压电源、D/A 与 A/D 转换电路。各章末均附有小结、思考题和习题。

本书可作为中专电子计算机专业试用教材，也可供具有一定电工基础知识的工程技术人员自学参考。

计 算 机 电 路 基 础

金长义 哈长霞 编
责任编辑 王善修

电子工业出版社出版（北京市万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
山东电子工业印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：23 字数：631千字
1986年5月第1版 1986年6月第1次印刷
印数：11500册 定价：3.35元
统一书号：15290·284

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作，从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由中专电子类教材编审委员会计算机编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由北京无线电工业学校金长义、哈长富编写，上海机械专科学校周国豪担任主审。编审者均依据计算机编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为132学时(实验课时数另订)，其主要内容由基础知识、模拟电路和脉冲数字电路等三部分构成，具体内容包括：绪言、半导体器件、低频小信号电压放大器、负反馈放大器、运算放大器、正弦波振荡器、分立元件脉冲电路、双极型集成门电路、双极型集成双稳态触发器、MOS集成数字电路、晶体管直流稳压电源、D/A与A/D转换电路。确定本教材的结构和具体内容时，主要考虑到如下三方面的关系：专业性和适应性的关系，本教材以专业性为主，主要满足有关后继专业课程对电路基础知识的需要，适当考虑为学生适应今后学习和工作需要奠定必要的基础；模拟电路和脉冲数字电路的关系，本教材从电子计算机专业需要出发，以脉冲数字电路为主，模拟电路为辅，所选模拟电路内容服从于计算机专业的需要，服从于脉冲数字电路对于模拟电路基础知识的需要；分立元件电路和集成电路的关系，本教材以集成电路为主，讲分立元件电路主要是为讲集成电路打基础。

在编审过程中，我们得到了许多同志的大力支持与帮助，在这里表示诚挚的感谢。由于我们水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者给予批评指正。

编 者

一九八五年三月

绪 论

一、电子技术的发展和应用

电子学是本世纪初从物理学中脱颖而出的一门技术科学，又称为电子技术。它的研究领域很广，大体可分为三个方面：研究电磁波及电子、离子的运动规律；研究信息传输、检测、处理的理论和技术；研制电子元件、器件、设备和系统。按照应用不同，电子技术又可分为通信、广播、电视、雷达、导航、测量、计算机、自控、遥感、遥测、电子对抗等等技术分支。

电子技术的发展十分迅速。从电子元、器件及设备、系统这一侧面来看，可分为三个阶段。第一阶段为电子管阶段，自1904年世界上第一只电子管诞生，经过三十多年的不断改进，电子管体积逐步缩小，使电子设备的体积有所压缩，但有些复杂的电子设备仍然庞大得惊人，例如1946年美国用上万只电子管和其它电子元件组装成的世界上第一台电子计算机，重三十吨、体积九十立方米，占满了整整一个大厅。第二阶段为晶体管阶段，1948年开始出现了晶体管，仅十多年的时间，就使电子器件和设备的小型化有了极大的发展。第三阶段为半导体集成电路阶段，1962年第一块集成电路问世，它是把构成一个电路的十几个元、器件和电路连线合为一体，做在一小块(几平方毫米)硅片上的小规模集成电路，到1966年，已经可以做出把数百个元、器件集成在一起的中规模集成电路，1970年出现了把上千个元、器件集成在一起的大规模集成电路，1977年又做出了集成15万个元、器件的超大规模集成电路。集成电路的应用，使电子设备的体积、重量大大减小，可靠性提高而成本降低，电子技术进入了一个崭新的时代。电子技术在八十年代的一个重要发展趋势，是各种电子设备和系统的全面大规模集成化。

电子技术的应用很广泛，它渗透到了国民经济各部门、国防和科学技术的各领域及人类社会生活的各方面，举例说明如下。电子技术在工业生产和工程施工方面的应用，主要是生产和施工的综合自动化，实际上就是电子计算机化。电子计算机可以进行辅助设计，在人的设计思想指导下，用计算机进行资料和数据检索、运算，得出产品或工程的最优化设计方案。此外，还可用计算机进行辅助制造、测试以及生产、施工的经营管理。工业机器人是自动控制和电子计算机相结合的产物，它们可以按照一定程序进行油漆、电镀、电焊、铸造及高温、深潜等对人体有害的作业。在交通运输的控制和自动化管理方面，用到很多电子技术。电子技术在农业方面的应用也很多，诸如种子处理、农机作业、气象、土地利用调查、农作物估产、病虫害预报、火情报警及市场动态等等，都离不开电子技术。

电子技术在国防上的应用更多，在侦察敌情、预报空袭、测距、测高、炮瞄、全球通讯、定位导航、自动驾驶、卫星的发射与回收、导弹的航行及寻找目标等方面，都有电子技术在起作用。执行这些任务，通常要用到多种技术装备，例如在反导弹战略防御系统中，雷达、电视、遥测、遥控等装备在电子计算机机群的集中控制下，及时完成

侦察、搜索、跟踪和反击任务，这是一个复杂的综合性体系，电子技术在这里起着头脑和神经的作用。

电子技术为其它学科的发展提供了模拟、实验、测试、分析的方法和设备，大大促进了各个学科的发展和提高。例如，在数学方面，由于高速度、大容量电子计算机的应用，过去许多无法运算和证明的问题（象长期天气预报的计算、地球质心准确位置的计算、

“四色定理”的证明等等）都已得到解决。在物理学方面，所有电的和非电的物理量的精确测量，都离不开电子技术提供的手段。在地质学方面，普遍采用了电子技术中的遥感技术，对地面、海面、地下、海下的资源和外貌特性进行探测。在医学及社会科学的许多方面，也都普遍用到电子技术。

在人类社会生活各方面，诸如商品流通、通信、文化、教育及家用电器等等，无不与电子技术有关。

可以预见，伴随着电子科学技术的发展，尤其是超大规模集成电路的发展与应用，必将大大加速各种电子设备和系统小型化的进程，从而对各个应用电子技术的领域带来更深远的影响。

电子技术水准是现代化的重要标志。当前，电子计算机和构成它的半导体大规模集成电路，它们的科学技术水平、生产规模和应用程度，已成为衡量一个国家电子技术水准的主要标志。能不能高速度、高水平地发展我国的电子技术，将直接影响到工业、农业、国防和科学技术各部门，影响到人民群众的物质和文化生活。我国要在本世纪内实现工业、农业、国防和科学技术现代化，就必须高度发展和广泛应用电子技术，把四个现代化提高到电子水准上来。

二、本课程的任务与主要内容

本课程是中专电子计算机专业的一门电路基础课，使学生具备作为计算机专业中级技术人员所应具备的电子线路基础知识。学习本课程，要求学生掌握有关物理概念、电路分析方法、有关单元电路的功能和原理，具有一定实验工作能力，初步学会合理地选择和使用有关器件，能分析判断电路的简单故障。

本课程主要内容：第一章为本课程的基础知识部分，主要讨论常用半导体器件的外特性及使用方法；第二至五章为模拟电路部分，包括低频小信号电压放大器、负反馈放大器、运算放大器和正弦波振荡器，主要讨论这些模拟单元电路的功能和原理；第六至第九章为脉冲数字电路部分，包括分立元件脉冲电路、双极型集成门电路和触发器、MOS集成数字电路，主要讨论这些脉冲数字单元电路的功能、外特性和正确使用方法；第十章晶体管直流稳压电源、第十一章 D/A 与 A/D 转换电路，主要讨论这些单元电路的功能和原理。

目 录

绪 论

第一章 半导体器件.....(1)

§ 1.1 PN结.....(1)

§ 1.2 半导体二极管.....(11)

§ 1.3 双极型半导体三极管.....(15)

§ 1.4 单极型半导体三极管.....(31)

本章小结.....(37)

思考题和习题.....(38)

附录1.1 国产半导体器件型号命名.....(44)

附录1.2 国产半导体器件参数举例.....(45)

附录1.3 常用半导体二极管的种类.....(53)

附录1.4 常用双极型半导体三极管种类.....(55)

附录1.5 有关特殊 MOS 器件简介.....(57)

第二章 低频小信号电压放大器.....(60)

§ 2.1 基本放大电路.....(61)

§ 2.2 放大器的分析方法.....(68)

§ 2.3 放大器静态工作点的稳定.....(77)

§ 2.4 多级放大器.....(80)

本章小结.....(83)

思考题和习题.....(84)

第三章 负反馈放大器.....(89)

§ 3.1 概述.....(89)

§ 3.2 负反馈对于放大器性能的影响.....(92)

§ 3.3 常用的负反馈放大电路.....(99)

本章小结.....(107)

思考题和习题.....(107)

第四章 运算放大器.....(110)

§ 4.1 直流放大器.....(110)

§ 4.2 典型集成运算放大器.....(121)

§ 4.3 运算放大器的基本性能.....(127)

§ 4.4 运算放大器的应用.....(132)

本章小结.....(139)

思考题和习题.....(139)

附录4.1 国产《半导体集成电路运算放大器系列品种》摘录 (5J1529-19-79).....(142)

第五章 正弦波振荡器.....(145)

§ 5.1 概述.....(145)

§ 5.2 LC 振荡器	(151)
§ 5.3 晶体振荡器	(155)
本章小结	(163)
思考题和习题	(164)
第六章 分立元件脉冲电路	(166)
§ 6.1 概述	(166)
§ 6.2 简单的波形变换电路	(169)
§ 6.3 基本逻辑门电路	(177)
§ 6.4 锯齿波电压发生器	(190)
§ 6.5 脉冲功率放大器	(195)
本章小结	(198)
思考题和习题	(191)
附录6.1 求简单 RC 电路时间常数的方法	(203)
第七章 双极型集成门电路	(206)
§ 7.1 TTL 门电路	(206)
§ 7.2 ECL 门电路	(228)
§ 7.3 TTL 集成门电路应用举例	(232)
本章小结	(240)
思考题和习题	(240)
附录7.1 电子工业部标准TTL集成电路型号命名方法	(242)
附录7.2 电子工业部关于外形、尺寸标准、半导体集成电路外形尺寸说明	(243)
附录7.3 用集成运算放大器构成的波形变换电路	(245)
第八章 双极型集成双稳态触发器	(249)
§ 8.1 R-S 触发器	(249)
§ 8.2 D 触发器	(253)
§ 8.3 J-K 触发器	(258)
§ 8.4 T 触发器	(263)
§ 8.5 不同类型触发器之间的转换	(264)
§ 8.6 TTL 触发器的电参数	(267)
§ 8.7 触发器的应用举例	(268)
本章小结	(269)
思考题和习题	(269)
附录8.1 “狄·摩根”定理	(271)
第九章 MOS 集成数字电路	(272)
§ 9.1 NMOS 门电路	(201)
§ 9.2 CMOS 门电路	(277)
§ 9.3 CMOS 触发器	(282)
§ 9.4 电平转换电路	(285)
本章小结	(290)
思考题和习题	(290)
附录9.1 CMOSIC 使用规则	(292)

第十章 晶体管直流稳压电源	(295)
§ 10.1 整流器与滤波器	(295)
§ 10.2 简单稳压器	(305)
§ 10.3 串联调整型稳压器	(308)
§ 10.4 开关型稳压器	(315)
§ 10.5 集成稳压器	(319)
本章小结	(322)
思考题和习题	(322)
附录10.1 国产集成稳压器型号及主要参数	(325)
第十一章 D/A与A/D转换电路	(326)
§ 11.1 并行D/A转换器	(326)
§ 11.2 串行D/A转换器	(337)
§ 11.3 A/D转换器	(337)
本章小结	(347)
思考题和习题	(348)
《计算机电路基础》符号说明	(349)
主要参考书目	(357)

第一章 半导体器件

由半导体材料制成的二极管、三极管和集成电路等等，统称为半导体器件，本章只讨论半导体二极管和三极管。半导体二极管和三极管是构成晶体管单元电路的核心，了解这些器件的特性，是认识各种单元电路工作原理的基础。大多数半导体器件具有一个或多个 PN 结，了解 PN 结的特性是认识各种半导体器件的基础。

§ 1.1 PN 结

一、半导体基本知识

1. 本征半导体

物质导电能力的强弱可用电阻率 (ρ) 表示。导电能力强 ($\rho < 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$) 的物质叫导体；导电能力弱 ($\rho > 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$) 的物质叫绝缘体；常温之下，导电能力居于导体和绝缘体之间的物质叫半导体。例如在 27°C 时，纯硅 (Si) 的电阻率是 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，纯锗 (Ge) 的电阻率是 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ 。硅和锗是制作半导体器件最常用的基本半导体材料。

物质由原子组成。原子按一定规律整齐排列的物质叫晶体，大部分半导体都是晶体。晶体中的原子按一定规律结合成晶格，这是构成晶体的基本单元。晶格按一定规律排列而构成的晶体叫单晶体；晶格杂乱无章堆砌成的晶体叫多晶体。纯净的、单晶结构的半导体叫本征半导体。现以硅和锗为例，对本征半导体讨论如下。

原子中的电子按一定轨道在空间围绕原子核旋转，每个电子旋转的轨迹都处于一定的壳层位置上，可以把硅和锗的原子结构画成平面示意图，如图 1.1(1) 所示。由图 1.1(1) 可知，硅和锗原子的电子数目虽不同，但外层电子都是四个。内层电子因受原子核的束缚力较强，很少有离开原来壳层的可能性，它们和原子核组成一个稳定的集团，叫作惯性核。惯性核所带正电量等于外层电子总负电量，原子呈电中性。常用简化平面示意图来表示原子结构，硅和锗原子结构简化平面示意图如图 1.1(2) 所示。

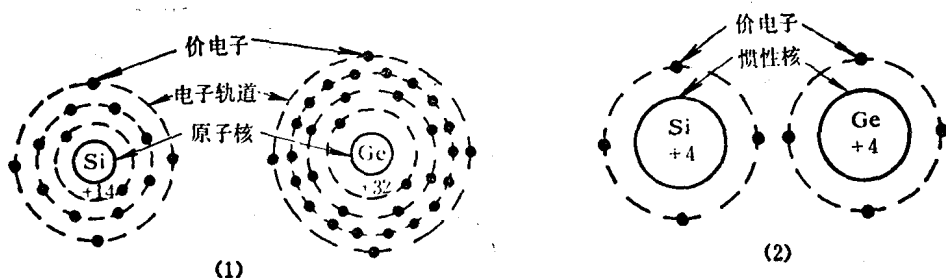


图 1.1 硅和锗的原子结构平面示意图

- (1) 原子结构平面示意图
(2) 简化示意图

原子外层的电子叫价电子。对于硅、锗等原子来说，只有当价电子数为8时，原子才处于稳定状态。硅或锗原子结合成晶体时，由于原子之间距离很近，价电子运动区域相重叠，如图1.2(1)所示，每个原子的价电子既受所属惯性核的束缚，又受相邻惯性核的束缚，每两个相邻惯性核之间都有一对价电子将二者结合起来。这种由共有价电子形成的结合作用叫“共价键”，可形象地用共价键图表示这种作用的存在，如图1.2(2)(3)所示。图中两条实线为“键”，表示结合力；线内黑点表示价电子，这些价电子若未接受外加能量，就不能挣脱共价键的束缚，称之为束缚电子。每个硅(锗)原子有四个价电子，它们与相邻四个原子的价电子形成四对共价键，使每个原子外层电子达到8个，成为稳定的共价键结构，称之为晶格。整块晶体就是由这样的晶格在空间按同一规律和一定方向重复排列而成的。

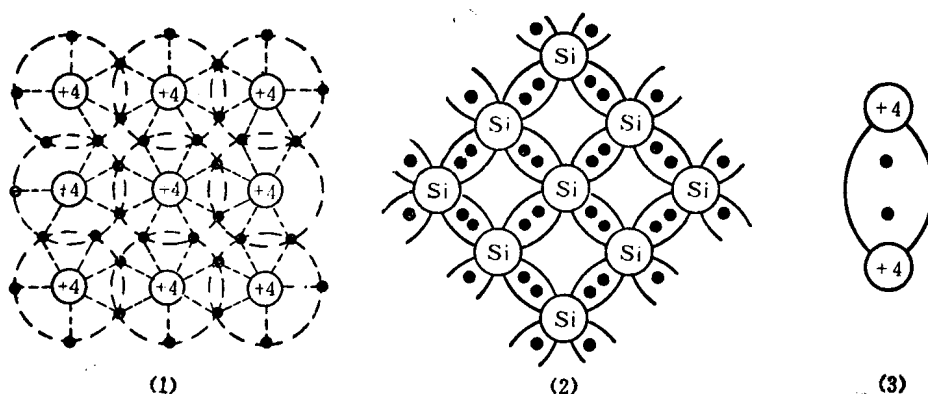


图 1.2 硅晶体结构平面示意图

- (1) 价电子运动区域重叠图
- (2) 共价键
- (3) 习惯画法

绝对温度零度(0K)之下，本征半导体硅(锗)的全部价电子均为束缚电子，和理想化绝缘体一样，不能导电。环境温度大于0K时，价电子自身能量由于从振动的原子及外界获得热能而增大，有极少数价电子当它们所具有的能量足够大时，便挣脱惯性核的束缚成为自由电子(例如室温下在纯硅中被冲破的共价键数约占总共价键数的二十亿分之一)，这种现象称为本征激发或热激发。自由电子是一种带负电的物质，无外加电场作用时，它们可以在半导体内自由地不定向运动，称为电子热运动，这些电子又叫电子载流子。在本征激发过程中，价电子成为自由电子的同时，于原来共价键位置上留下了一个空位，称之为空穴，如图1.3所示。在本征半导体内，自由电子和空穴是成对出现的，称之为电子-空穴对。空穴是一种带正电荷的物质，这因为：空穴所在的原子因失去一个价电子而变成正离子，正离子的电荷量可以看作是空穴所带的正电量。无外加电场作用时，由于空穴对附近价电子具有吸引力，以及这些价电子因获得热能而使其自身能量增大，便形成了空穴附近价电子的不定向辗转运动，如图1.4所示，可视为空穴作不定向运动，称为空穴热运动，所以空穴又叫空穴载流子。自由电子在运动过程中填入共价键内的空位时，自由电子和空穴重新结合使原子恢复为共价键结构，这种现象称为复合。在一定环境温度下，本征半导体内的热激发与复合现象并存，且热激发与复合的速率相

等,使半导体内维持一定数量的电子-空穴对,称为热平衡。此时,一个单位体积半导体中载流子的数目称为载流子浓度(个/ m^3)。本征半导体内电子载流子浓度(N_i)等于空穴载流子浓度(P_i),称为本征载流子浓度,其值甚微(300K之下,纯硅中本征载流子浓度为 $1.48 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$,锗为 $2.36 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$),且随温度上升而按指数律增大。这里的“N”代表“负”(Negative),“P”代表“正”(Positive)。

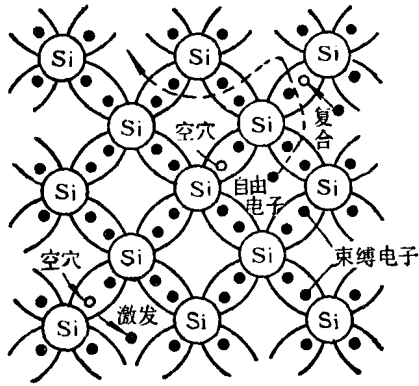


图 1.3 本征激发产生电子-空穴对

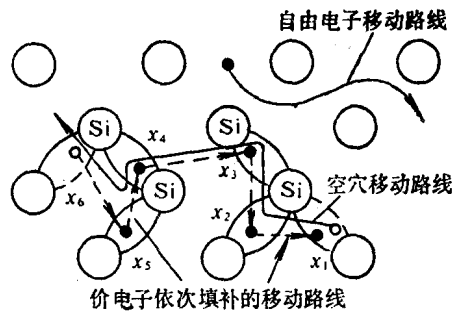


图 1.4 空穴移动方式

本征半导体内的载流子浓度很低,所以它的导电能力很弱。由于电子和空穴载流子浓度随环境温度升高而迅速增大,所以本征半导体的电阻率随环境温度升高而明显下降。本征半导体不能直接用来制作半导体器件,实际上制作半导体器件都是用掺杂半导体(又称为非本征半导体)。

2. 掺杂半导体

1) 掺杂半导体的种类

以半导体硅为例,半导体内所含除它本身(Si)以外的一切元素(如磷、硼、钠、铁、砷等等),都叫作半导体硅中的杂质。有些杂质是制造半导体材料时有意掺进的有用杂质(如磷和硼),有些杂质是无意掺进但由于工艺原因又不能完全排除的无用杂质(如钠、铁、砷等等)。这里所论掺杂半导体,仅指掺入有用杂质而不含无用杂质的理想化半导体。掺杂半导体是制造各种半导体器件的基本材料,按所掺杂质不同,可分为N型和P型两种。

(1) N型半导体:本征半导体硅(锗)中掺入微量 $\ominus$ 的五价元素磷(P),整个晶体结构基本不变,只是某些硅(锗)原子被磷原子所代替。一个磷原子与邻近的四个硅(锗)原子组成共价键只需四个价电子,还剩余一个价电子。这个剩余价电子不受共价键束缚,只受到惯性核很小的吸引力,当环境温度大于50K时,它所获得的热能足以使它摆脱磷惯性核的束缚成为自由电子,如图1.5(1)所示。五价元素磷掺入硅(锗)后,能释放出电子,称之为施主杂质。一个磷原子给出一个电子后就变成了正离子,称之为施主离子,如图1.5(2)所示,这种现象叫施主电离。常用的施主杂质除磷外还有砷和锑。本征半导体掺入五价元素的数量虽微,晶体内的自由电子数却因此骤增(以半导体硅为例,掺杂

① 每立方米半导体约有 10^{23} 个原子,掺杂密度至少要少几个数量级,典型的掺杂密度为每立方米 10^{21} 个原子,相当于晶体中每一亿个原子才有一个杂质原子。

后自由电子浓度可达到 10^{16} m^{-3} 量级，相比之下，在一定温度范围内本征激发所提供的本征载流子浓度可以忽略不计），使其导电能力大大提高。由于这种掺杂半导体的导电能力主要取决于电子载流子浓度，所以称为电子型半导体，简称N型半导体，并称其中自由电子为多数载流子（简称多子），称其中空穴为少数载流子（简称少子）。形成N型半导体的杂质叫N型杂质。

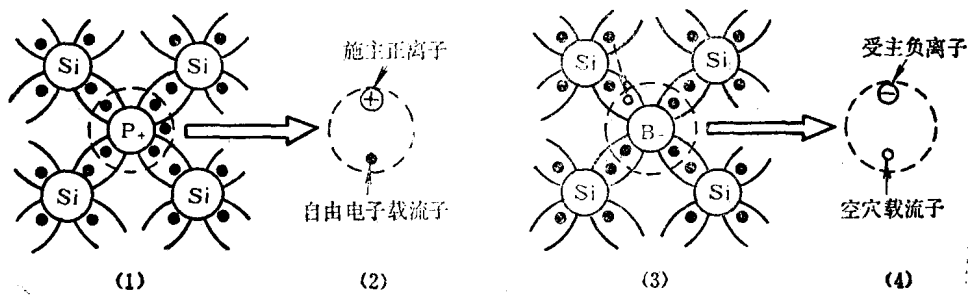


图 1.5 本征硅掺杂的示意图
 (1) 硅中掺磷形成电子载流子(N型)
 (2) 五价原子结构的简化示意图
 (3) 硅中掺硼形成空穴载流子(P型)
 (4) 三价原子结构的简化示意图

由于本征激发形成的自由电子和空穴成对出现，施主电离形成的自由电子和正离子成对出现，所以整个N型半导体呈电中性，其内部载流子分布示意图如图1.6(2)所示。

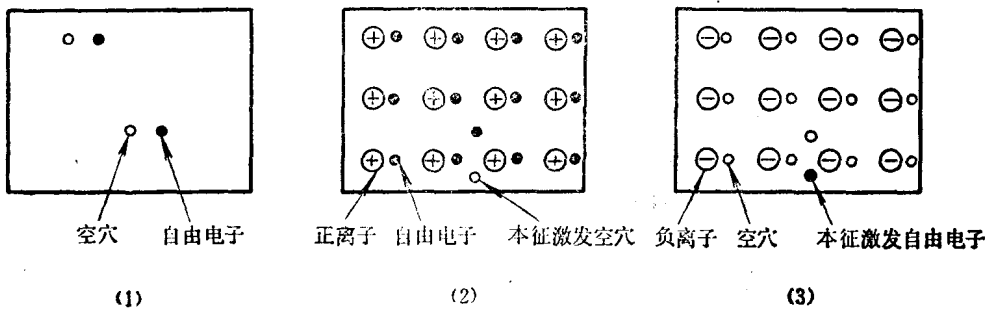


图 1.6 半导体内载流子分布示意图
 (1) 本征半导体
 (2) N型半导体
 (3) P型半导体

(2) P型半导体：本征半导体硅（锗）中掺入微量（典型数量级如前所述）的三价元素硼（B），整个晶体结构基本不变，只是某些硅（锗）原子被硼原子所代替。一个硼原子与邻近的四个硅（锗）原子组成共价键需要四个价电子，但它只有三个价电子，于是出现一个空位，如图1.5(3)所示。当环境温度大于 50K 时，空穴附近的价电子获得足够热能后很容易来填补这个空位，并使那个失去价电子的原子产生一个空穴。三价元素硼掺入硅（锗）后，能从附近硅（锗）原子获得价电子而使半导体内产生空穴，称之为受主杂质。一个硼原子获得一个电子后就变成了负离子，称之为受主离子，如图1.5(4)所示，这种现象称为受主电离。常用的受主杂质除硼外还有镓和铝。本征半导体掺入三价元素的数量

虽微，晶体内的空穴数却因此骤增（以半导体硅为例，掺杂后空穴浓度可达到 10^{16} cm^{-3} 量级，对比之下，在一定温度范围内本征激发所提供的本征载流子浓度可以忽略不计），使其导电能力大大提高。由于这种掺杂半导体的导电能力主要取决于空穴载流子浓度，所以称为空穴型半导体，简称 P 型半导体，并称其中空穴为多数载流子（简称多子），称其中自由电子为少数载流子（简称少子）。形成 P 型半导体的杂质叫 P 型杂质。

由于本征激发形成的自由电子和空穴成对出现，受主电离形成的空穴和负离子成对出现，所以整个 P 型半导体呈电中性，其内部载流子分布示意图如图 1.6(3) 所示。

凡涉及到器件物理的讨论中，除自由电子、空穴、施主离子、受主离子以外，其它带电粒子都受到有效地中和而被忽略。

在同一块半导体中，往往在同一区域既有 N 型杂质又有 P 型杂质，这时半导体的类型由浓度大的杂质决定，载流子浓度取决于两种杂质浓度之差。这种利用杂质相互补偿而改变掺杂半导体类型的过程，称为杂质补偿。例如，在本征半导体硅（锗）中掺入微量磷，可以做成 N 型半导体，如图 1.7 所示；在此 N 型半导体的局部区域掺入适量的硼，利用杂质补偿作用，可以把 N 型半导体这个局部区域变成 P 型半导体；在此 P 型半导体局部区域再掺入适量的磷，又可以把这局部区域变成 N 型半导体。于是，得到了 N-P-N 三个区域紧密相邻的结构，如图 1.7 所示。

2) 掺杂半导体的导电特性

在 N 型或 P 型半导体内，多数载流子由掺杂形成，其浓度远远大于本征激发所形成的少数载流子浓度。当环境温度大于 50K 时，由于全部杂质都已电离，所以多数载流子的浓度变成与温度无关的常数。在大于 50K 的一定环境温度范围内，掺杂半导体的导电能力主要取决于多数载流子浓度，因此和本征半导体比较，掺杂半导体的电阻率小且受温度影响小。

在两种情况下，掺杂半导体内将形成两种不同类型的电流：在电场作用下形成漂移电流；由于同性载流子浓度分布不均匀形成扩散电流。

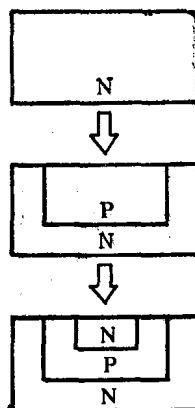
(1) 漂移电流：载流子在电场作用下定向运动，叫作漂移运动。载流子漂移运动所形成的电流，叫作漂移电流。见图 1.8，图 1.7 杂质补偿作用掺杂半导体外加电压时，半导体内形成电场，自由电子从低电位向高电位漂移形成电子漂移电流 I_{IN} ，空穴从高电位向低电位漂移形成空穴漂移电流 I_{IP} ，总漂移电流

$$I_I = I_{IN} + I_{IP}$$

在 N 型半导体中， $I_{IN} \gg I_{IP}$ ；在 P 型半导体中， $I_{IP} \gg I_{IN}$ 。

漂移电流是由电场驱动力所造成的电荷运动。只要有电场，不论该电场是由外加电压形成，还是由半导体内部的原因所引起的，都会出现漂移电流。

(2) 扩散电流：物质由高浓度的地方向低浓度的地方运动叫扩散运动。物质浓度差的存在形成扩散力，浓度差越大则扩散力越大，扩散运动进行得越快。在掺杂半导体里，如果由于某种原因使同性载流子浓度分布不均匀，如图 1.9 所示虚线 AA' 左右两边同性载流子浓度不均匀，载流子将由高浓度地方向低浓度地方扩散，由扩散运动形成的电流叫扩散电流 (I_D)，扩散电流大小与载流子扩散运动快慢成正比。载流子扩散运动快慢与



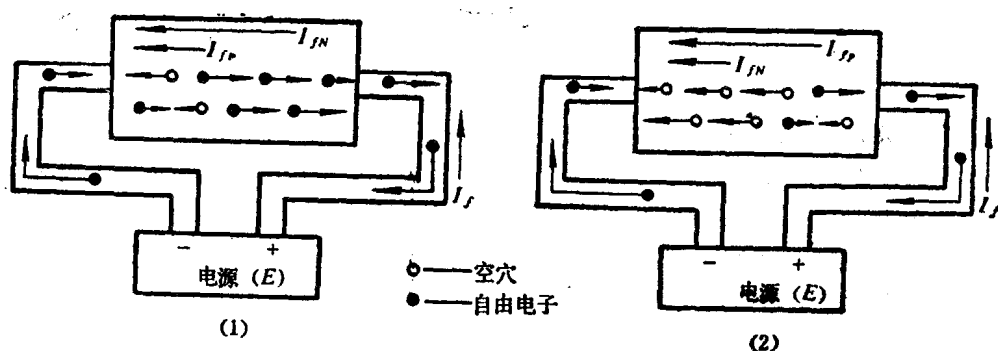


图 1.8 掺杂半导体中载流子的漂移运动示意图

(1) N 型半导体

(2) P 型半导体

同性载流子浓度差有关，而与载流子浓度本身无关，这是因为即使载流子浓度很大而浓度差为零时，扩散运动仍不能形成。

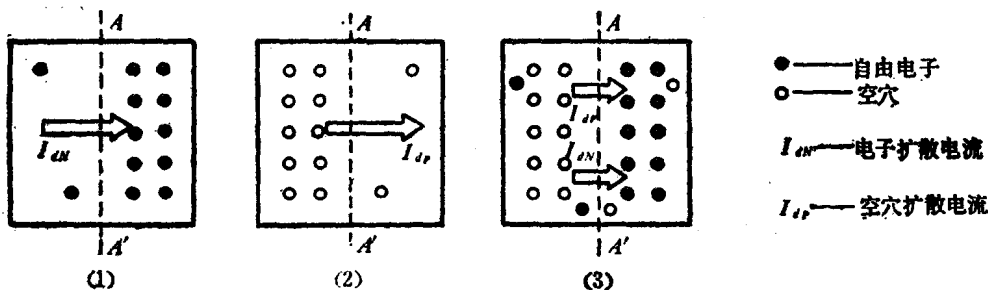


图 1.9 掺杂半导体中载流子的扩散运动

半导体之所以能做成各种电子器件，并不是由于它的导电能力居于导体和绝缘体之间，而是由于它具有以下几方面的特性：

掺杂特性——掺入微量杂质可使半导体的导电能力成百万倍地提高；掺入不同类型的杂质，可使半导体导电类型不同。利用这一特性，可以制成各种不同性质、不同用途的半导体器件。

热敏特性——有些半导体的电阻率与环境温度关系极大，只要温度稍微变化，它们的电阻率就会明显改变。利用这一特性，可以制成热敏元件，如热敏电阻等等。

光敏特性——有些半导体的电阻率与光照关系极大，有光照和无光照比较，它们的电阻率相差很大。利用这一特性，可以制成光电器件，如光电二极管、光敏电阻等等。

目前，制造各种半导体元、器件除使用元素半导体外，化合物半导体也得到了广泛应用，举例如表1.1所示。

表 1.1 常用的半导体材料

半 导 体 材 料		应 用 实 例	化 学 符 号
元 素	硅	二极管、三极管、集成电路、可控硅	Si
	锗	二极管、三极管、	Ge
	硒	整流器、光电池	Se
化 合 物	氧化铜	整流器、光电池	Cu ₂ O
	铁、锰、钴、镍的氧化物	热敏电阻	
	硫化镉	光电管	CdS
	硫化铅	光电管	PbS
	砷化镓	发光二极管、光电二极管、微波用场效应管	GaAs
	磷化镓	发光二极管	GaP
	磷化铟	光电管	InP

二、PN 结及其特性

1. PN 结形成的物理过程

利用杂质补偿作用，采用适当的工艺方法，可以做到使 P 型半导体和 N 型半导体紧密相邻，如图 1.10(1)所示。截取包括 P、N 两区在内的一小块局部，放大后的示意图如图 1.10(2)所示。

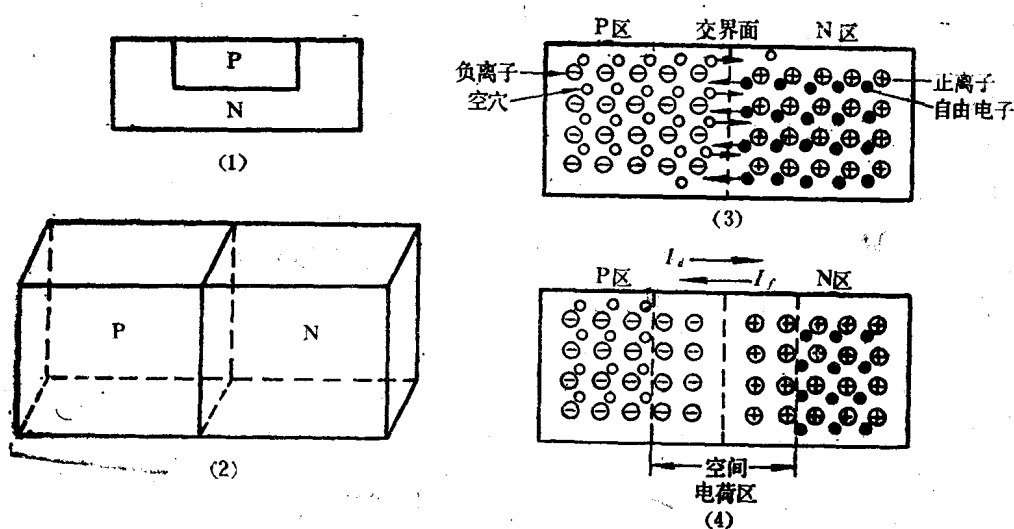


图 1.10 PN 结的形成