编者的话

物理学是研究物质结构和物质运动的最一般规律的学科。它的研究内容十分广泛，已取得的成就极为辉煌；它的创造性进展以及它和各门自然学科、工程技术的相互结合和相互渗透，深刻地影响着人类的自然观和人类的社会生活。

杨振宁博士曾经说过：“物理学最重要的部分是与现象有关的。”[①] 这就是说物理学的绝大部分内容是从现象中来的，所以现象是物理学的根源。一个人如果不与现象接触就容易误入本本主义的歧途，并且对物理学的了解不会切中要害。朱棣文博士也曾经说过：“一名优秀的物理学家所具备的素质，首先必须要有好奇心，对于自然的好奇，对于普遍事物的好奇。”[②] 确实，优秀的物理学家对于所有事物都非常好奇，他们想探知事物的规律，他们具有看到事物最为本质一面的本领。伦琴发现 X 射线，普朗克的量子论，玻尔的原子结构模型，爱因斯坦的相对论和李振道、杨振宁的弱相互作用中宇称不守恒等都反映了这一点。同样，要成为一名优秀的物理教师，除了要学习书本知识外，一定不能拘泥于书本知识，还要开拓视野，联系实际，用已经学到的物理知识去认识和理解周围出现的物理现象，并

① 《杨振宁文集》，华东师范大学出版社，1998，第 508 页。

② 《科学家应具备哪些素质——朱棣文对本报记者谈他的成功之道》，《文汇报》，1998.8.8

需要全本请访问 www.ertongbook.com

在这过程中，进一步发现和提出新的问题，通过思索和分析，解决新问题，对物理学教学有所作为。

我们生活的大千世界是一个物质世界，物质世界最本质的现象是运动，所以，它也是一个充满着丰富物理学内涵的世界。从我们每天的衣、食、住、行、休闲、娱乐、医疗和保健，到工、农业生产和保卫祖国等方面，都有大量的物理学问题。我们应该从物理学角度考虑提高工农业的生产水平和我们的生活质量。本书就是从这一侧面向读者介绍上述有关领域中的物理学知识和物理学手段的作用，希望能引起读者对周围世界的兴趣，并深入下去，进而有所贡献；并对中学物理学教学实践和改革有所助益。

本书的写作特点是每章只详细介绍一二个问题，对其他一些问题只是点到为止，而不是面面俱到，给读者留有较多的独立思考的余地，可以收到联系实际的效果。读者如需对某一问题作进一步深入钻研，每一章后面列有相应的参考读物，可供借鉴。

本书共分八章 第一章是“计算机中的物理学”。在介绍微电子学对计算机发展中的作用的基础上，通过介绍先进的半导体工艺技术向读者展示计算机中的物理学原理，并展望和近代物理学密切相关的新一代计算机——光计算机和超导计算机。第二章是“汽车中的物理学”。汽车是人们普遍使用的交通工具，发动机的热效率是物理学问题。除此之外，为了做到安全和舒适，在汽车中广泛应用的各种传感器及电子设备，这其中也有不少物理学问题。第三章是“居室中的物理学”。为了提高生活质量，一个优雅、舒适和安全的居住环境是十分必要的，光、电、磁、声和分子运动等物理学问题在居住条件、环境布置和装潢材料的选择中起着至关重要的作用。第四章是“音乐中的物理学”。简要介绍物理学中定义的声学量和音乐中定义的声学量之间的关系，重点对钢琴（弦乐）和管乐中的物理学问题进行剖析，同时对现代电声音乐中的物理学问题也作了简单的介绍。第五章是“体育、保健中的物理学”。从肌肉力学出发，结合群众喜爱

的某些运动项目对其中的力学问题进行分析，同时简要介绍光电技术在竞技体育中的作用和地位，最后对若干保健设备中的物理学问题进行剖析。第六章是“医学诊断和治疗中的物理学”。物理学原理及先进的物理仪器对提高医疗质量起着十分重要的作用，这章重点向读者介绍核磁共振成象及超声技术在医学诊断中的作用，并简要说明细胞刀、超声手术刀、激光刀和 γ 刀的基本物理学原理。第七章是“农业中的物理学”。围绕栽培、育种、水产养殖、桑蚕孵化和食品保质中的物理学问题展开讨论，重点介绍由我国科学工作者做得比较多的电磁生物效应。第八章是“军事中的物理学”。介绍力、光、电磁和原子物理学对现代军事技术中的作用以及展示自由电子激光和微波、红外遥感技术在军事侦察、进攻和防御中的地位。

本书第一章由王云珍编写，第二章至第四章由马葭生编写，第五章至第八章由陈家森编写。由于本书涉及的内容十分广泛，这里只对某些特例进行介绍。希望读者在应用中予以充实、丰富和提高，并对本书提出宝贵意见。

陈家森

于上海华东师范大学

1999 年 12 月

第一章　计算机中的物理学

【摘要】 在世纪之交的今日，信息化已成为时代的特征。世界各国纷纷登上信息高速公路的快车道。而作为信息时代的宠儿——计算机，正在给人类社会的经济发展、生活方式，甚至思维模式带来了翻天覆地的变化

纵观计算机的发展史，人们不难发现，现代计算机所以能如此迅速地升级换代，主要得益于微电子技术的超前发展。半导体集成电路、各种半导体存贮器、运算器及控制器组成了现代计算机的核心。可见 20 世纪后半叶，微电子技术的发展主要是适应了计算机和整个信息技术的需求。但微电子技术发展的创新历程却是近代物理学基础研究成果不断应用的缩影，本章将就这些问题进行介绍和讨论。

物理学的成就赋予计算机无限的生命力。现在，微电子技术已由微米级进入亚微米级，这种发展势头还会持续多久？我们不妨从剖析计算机中的物理学问题来寻找答案。

§1.1　计算机的发展历程和展望

1. 计算机开创信息时代

计算机问世的初期，主要是为了满足当时国防和科研大量繁重的计算工作的需要，神奇的计算速度是它引人注目的特征。随后，它广泛地应用于控制、管理、通信等领域，实现了计算机控制下的联机操作，从而推动了各行各业的自动化进程。计算机逾越了它的计算

功能，开始作为个具有记忆、逻辑判断等功能的信息加工系统，可以模拟人的某些思维功能，代替人的部分脑力劳动、因而被冠以“电脑”的美名。20世纪80年代，随着微电子技术的日益成熟，早期的主机系统被功能齐全的个人计算机——微机所替代。微机的异军突起不仅使计算机更快、更深入地渗透到人类社会活动的各个方面，进入作为社会细胞的千家万户，引发了人们生活方式的深刻变革，迎来了工厂自动化、办公自动化、家庭自动化的时代。进入90年代，信息与通信相结合的技术迅速发展，特别是全球规模的计算机网络运作，更使计算机如虎添翼，正在日益显示出未来信息社会的美妙前景。近年来，信息产业的发展更致力于构想将电信网、广播电视网和因特网合成高层次的统一网络，采用统一的数字信号和网络协议，提供包括声音、图象和数据在内的一元化信息服务，加速开通信息高速公路的进程。

生产自动化、社会信息化、生活数字化，计算机为我们描绘出一个多姿多彩的新世界。

今天的信息技术，是以微电子学、激光光学、光电子学、超导电子学等为基础，集计算机技术、通信技术、自动控制技术、激光技术、光电子技术和人工智能技术之大成，涉及信息的收集、加工、处理、存贮和传输。由于它的渗透和应用领域日益广阔，已成为当前高科技产业的核心。

计算机进入教育领域，已使传统的学校教学活动超越时空间隔，无时不在，无地不能；通过资源共享使得名校的成功教学管理经验以及名师的丰富教学经验和学术成果成为全人类文明的共同财富；运用多媒体手段可以实现计算机辅助教学，代替教师对学生随时随地进行解惑；通过网络可以实现国与国之间的文化教育交流，开办各种网上大学，发展世界规模的远程教育，为人类在新世纪实现终身教育、全民教育、全球性教育提供有力的物质保障。

计算机进入医疗卫生领域，与各种专用医疗诊断仪器相结合，加

需要全本请访问 www.ertongbook.com

快了诊治过程，提高了诊断的正确性，大大地改善了治疗效果；CT（轴向断层 X射线扫描摄影）帮助医生更正确地鉴定病人的病症；细胞刀帮助医生更精确地切除癌细胞所在的病灶，使疑难重病不再成为不治之症；将各家名医的诊治经验和医疗技术编制成各种医疗诊断的专家系统，通过网络可以造福全人类；在网络上进行的危急疑难病症的国际医疗会诊，更是促进国际医务界协力攻关，帮助病人转危为安。

计算机进入管理领域，极大地提高了管理工作的效率，实现办公自动化；办公人员不必囿于办公室环境，可以随时在不同场合处理公务，有利于部分企事业单位实现弹性工作制，更有利于跨国公司的异地业务的统一管理和调度；用计算机网络装备起来的办公大楼，设备运行、监控一体化，通信手段完善，办公条件优越，赢得了“智能化大厦”的美名。同样，对于家庭内务的管理，也可用计算机实现各种符合主人心意的自动化。

计算机和商务、服务行业相结合，出现了一种新的产业形式——电子商务。网络将推倒横亘在供应商、中介机构和顾客之间的重重高墙，以现代电子手段快速有效地进行各类事务沟通，传输和处理各种票证和单据。网上购物，网上贸易，网上咨询，网上点播影视节目，网上订阅电子书刊，网上订购车票、船票、机票，几乎无所不能。电子商务的发展，大大地降低了企业的成本，极大地提高了工作效率，有力地增强了企业的竞争能力。

计算机网络进入金融界，大大地推动了金融业的电子化。通过网上的信息交换，方便灵活地处理金融支付业务。网络银行使用的电子货币，其实不过是在网上活动的种种信息流之一。人们用各种金融信息卡（磁卡、IC卡等）为媒介，就能迅速、方便地实现电子货币的存储和转账。网络银行可以没有办公地点，只有网址；营业厅就是它的首页画面；所有交易都在网络上进行，大大地简化了银行工作机构。

人类跨入了信息时代。计算机网络的拓展和广泛应用，多方面地使通常的事物演变为数字化的虚拟对象。这种变化本身就将导致社会经济乃至整个人类社会活动发生质的飞跃。人们在叹服计算机的‘神机妙算”,并赋予‘电脑’美名的同时,也不禁会追问是何方神力造就了这信息时代的天之骄子？

2. 计算机的硬件和软件

计算机是一种用电子元件构成的自动、高效的信息处理机。它包含有硬件和软件两大部分。

计算机的物理实体部分称为“硬件”。它包括主机和外部设备主机的功能是处理数据；而外部设备是辅助主机，输入主机所需要的数据和输出经主机处理后的结果。

主机包括中央处理器（CPU)、存贮器、主板、电源、显卡、声卡以及处理其他数据的各种卡。外部设备包括键盘、鼠标、显示器、声盒、光盘驱动器(CD-ROM)、软盘驱动器、磁盘机（硬盘）、调制解调器(Modem)、打印机和磁带录音机。主机和外部设备通过总线互相连接进行工作。

中央处理器是计算机的核心，它是运算器和控制器的合称。运算器用来对数据进行运算和处理，控制器用来指挥和协调计算机各部件的工作。它们都是用半导体集成电路芯片制成的。

存贮器有内存贮器和外存贮器两种，简称为“内存”和“外存”。内存大都采用半导体存贮器，它存取速度快，但容量小，只能用作存贮计算机当前执行的程序和数据；外存多采用磁盘机，它的容量大，但存取速度慢，所以作为内存的后备，当需要时就可把存贮在外存的程序和数据调入内存，以供使用。

当然，使用者可以根据自己的工作需要来决定硬件的总体配置，如选择各种各样的卡，使计算机具备各种功能，形象地说，把各种硬件“挂”到总线上就组成了一台计算机。

计算机的软件就是使计算机工作的，由指令、程序组成的逻辑信息集合，再加上使用它们的方法。计算机软件是个多方面、多层次的复杂体系，它集中了人类使用计算机的大量经验和智慧，是典型的智力产品，并已成为人类进入知识经济社会的先兆。计算机的软件有系统软件和应用软件两种。系统软件是为了更有效、更方便地使用计算机而编制的程序，具有通用性，通常由计算机厂家提供，使用者一般没有变化的余地。但软件供应商几乎年年推出新的版本，不断完善它们的功能，如广泛使用的操作系统 DOS、WINDOWS 和 UNIX。应用软件是为了完成某个具体任务而编制的程序，因此专用性很强。使用者可以根据自己的需要，自己编制，也可向软件供应商定购。

3. 计算机的‘家谱’

1946 年，世界上诞生了第一台计算机，命名为“埃尼阿克”(ENIAC)。它共有 18000 多只电子管、1500 个继电器、几十万枚电阻和电容，自重 30t，耗电 200kW，是个庞然大物。它以 5000 次／s 的运算速度，第一次运算操作时间短于炮弹实际飞行的时间，求出了 40cm(16in)海军炮的炮弹弹道，比人工计算效率高出约 1 万倍，创造了当时的奇迹。

美国科学家冯·诺伊曼在计算机研制的初级阶段就提出了一个重要的工作原理：先存贮程序，再执行程序，即把计算机应执行的一串指令(由它们组成程序)，像数据一样放在存贮器里，然后由计算机按次序自动取来加以分析，遵照执行。这样在研制计算机时就根本不必考虑将来它要解决什么具体问题（或解微分方程，或是编制工资表，或是提出防空作战方案等等），保证了计算机的最广泛的通用性。只要用指令写出正确的程序，计算机就可以根据程序，不需要人的干预自动完成任务。于是要做的事情都可以通过“编码”，变成一种同数据一样的对象，和数据一样放在存贮器中。迄今为至的计算机都遵循这一原则，它大大地加快了计算机的发展。

在 20 世纪 40 年代到 50 年代产生的第一代计算机是以电子管为核心，它体积庞大、重量重、运算速度慢、耗能高。1947 年，在美国贝尔实验室里诞生了世界上第一只用半导体材料制作的晶体管。晶体管具有体积小、重量轻、能耗低、可靠性高等优点。更为重要的是，它的制造技术打开了电子元件集成化的通道。这样在 20 世纪的 50 年代到 60 年代之间，就有了用晶体管组成的计算机——第二代计算机。这是美国 MIT（麻省理工学院）首先研制成功的。紧随着美国 IBM（国际商用机器公司）也推出了晶体管计算机。第二代计算机用了 5000 只晶体管，体积只有落地音箱那么大，耗电仅为 160W。在 1960～1970 年期间，用晶体管和集成电路混合组装的第三代计算机问世随着集成化程度的日益提高，人们开始用集成电路的集成度高低来续写计算机的“家谱”，通常把小规模集成电路和中规模集成电路制成的计算机称为“第三代计算机”，而以大规模集成电路和超大规模集成电路为核心的计算机作为“第四代计算机”。第四代计算机的运算速度已达到每秒上亿次，甚至几千亿次，而且重量只有 1kg 左右，把它放入手提包里还绰绰有余。影响更为深远的是，以大规模集成电路芯片的微处理器为核心的计算机——微机，异军突起，以其小型、方便、功能齐全和自动化等优点很快进入了各行各业，并渗透入娱乐和普通家庭，掀起了计算机技术发展史上又一个新的高潮，并极大地推动了全球进入网络世界。

1959 年 9 月，我国第一台计算机通过国家鉴定正式宣告制成。这台代号为 104 的计算机是使用了 4200 只电子管和 4000 多只二极管，每秒可进行 10000 次浮点运算。

4. 智能化计算机的发展

1981 年 10 月，日本公开了耗资达 1000 亿日元的第五代计算机的开发计划，当时曾引起全世界的关注。它向人们展示了人类将制造出“会思索”的智能化第五代计算机的美好前景。自从有了计 算机

以后，已经把科学家从繁琐的计算中解放出来，计算机运算的高速和精确，的确使人赞叹不已。然而，在我们日常所遇见的问题中，还有大量是非数学性的，许多问题需要通过思考，通过推理和判断，而不是通过计算来解决的。于是如何赋予计算机以智能，使它能模拟人类的思维，理智地处理各种信息，近年来一直是计算机科学研究的热点。

第五代计算机是把信息采集、信息存贮、信息处理、信息传输同人工智能结合在一起的智能化计算机。计算机的运算速度要达到每秒执行 1000 亿条指令的水平。简单归纳起来，这类计算机系统是由问题求解和推理、知识库管理、智能化人机接口三个基本部分组成。其实计算机的推理和证明、自然语言的理解和翻译、图象识别和计算机视觉系统、机器人、计算机下棋、各种专家系统等等都属于人工智能的范畴。

人工智能化的研究，把人脑解决问题的方法变成计算机的程序，即启发式程序。人们提出不再根据事先编好的、刻板的固定算法程序解题(即冯·诺伊曼模式),而是将人脑的思维方式、技巧、规则以及策略等编制为程序，它们与已在计算机中存贮的一些公理相结合，促使计算机自己去探索解决方案，从而构成启发式程序。人工智能的最终目的是使计算机能像人那样进行推理、联想和学习，甚至有人那样的“感情”。

智能化计算机中颇受关注的是神经网络计算机。它能模仿人脑的学习功能和形象思维能力。现在，人们已经研制出了模仿神经细胞功能的电子神经网络元件，创造出了神经网络计算机的实验模型。

冯·诺伊曼曾经说过：“人类的语言不是数学语言，即使人类知道了每一个神经元的结构，并不意味着对整个大脑有了透彻的了解。”而当代奇才英国著名物理学家斯蒂芬·霍金则乐观地认为，未来计算机在其功能复杂性方面可以与人脑媲美。计算机的进一步发展，智能化是必由之路。

§1.2 微电子学的辉煌

计算机的“神机妙算”，得力于近代物理学的重大成果和高新技术的广泛应用。而微电子学的巧夺天工，又大大地加速了计算机的发展。微电子学的辉煌仍然离不开对近代物理学渊源深长的依托。

1.“点石成金”的半导体

半导体的能带结构 半导体科学崛起于20世纪40年代。由于固体能带理论的建立，使人们对物质的导电属性有了更深入的了解。能带理论揭示了固体导电的微观机制。从不同的能带结构，我们就可以正确地区分固体材料是导体，还是绝缘体。图1.1是简化的能带图。从能带图中可以看出金属导体的能带结构有两种：一种为不满的导带，如钠的能带[图 1.1(a)]；另一种是交叠的导带和价带，如镁的能带[图 1.1(b)]。这样的结构就保证了金属导体内的电子在外电场作用下可以运动，因而使金属具有很强的导电能力。金属的室温电导率高达 $10^4 \sim 10^6\ (\Omega \cdot \mathrm{cm})^{-1}$。绝缘体的能带结构见图1.1(c)，是被电子全部填满的能量较低的价带(称为“满带”)和

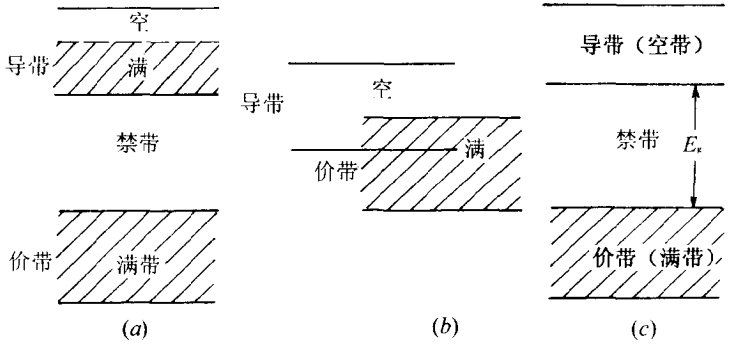


图1.1 导体、绝缘体能带图

(a)导体；(b)导体；(c)绝缘体

需要全本请访问 www.ertongbook.com

完全空的能量较高的导带(称为“空带”),而中间被称为“禁带”的能隙隔开。禁带宽度 E_g 一般大于 4eV,如碳晶体的 E_g 为 5.4eV。一般情况下，绝缘体中价带的电子不能跨越禁带进入导带，即导带内没有电子 而价带内又都被电子填满,电子没有运动的“空间”。因而除非有很强的外电场，绝缘体是不会导电的。绝缘体的电导率低达 $10^{-22} \sim 10^{-10}(\Omega \cdot cm)^{-1}$。重要的是，能带理论还预示了导电性能介于导体和绝缘体之间的固体材料的存在，这种材料被称为“半导体”。

20 世纪 40 年代末，人们终于把从砂砾中找到的半导体材料锗(Ge)和硅(Si) 制备成单晶。它们的能带图如图 1.2 所示。可见半导体与绝缘体的能带结构形式是一样的。但半导体的禁带宽度 E_g 分

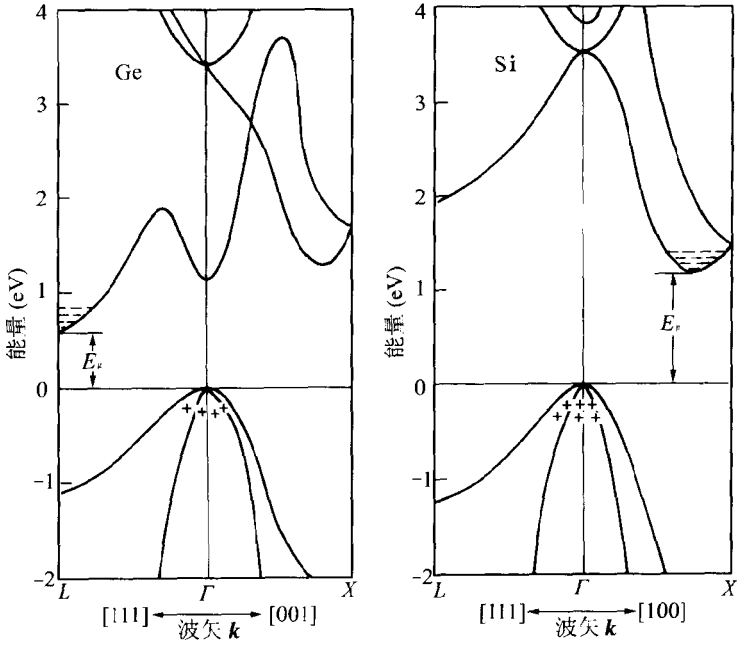


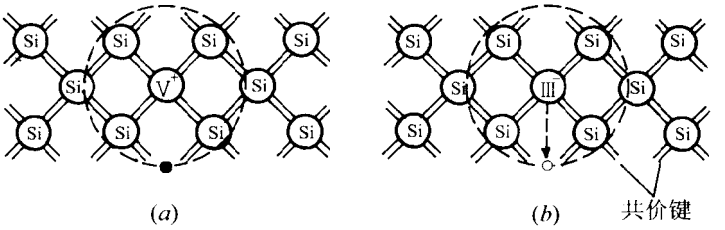
图 1.2　锗和硅的能带结构

别为 0.75eV(Ge)和 1.16eV(Si)(在 T 为 0K 时），是大大地低于绝缘体的。因此，在室温下，半导体价带内的电子是容易跨过禁带进入导带的,使导带中有了电子,价带中有了空穴,在外电场的作用下,它们的运动就会产生电流。所以说，半导体中有两种载流子：导带中的电子和价带中的空穴。半导体的电导率在 $10^{-9} \sim 10^{3}(\Omega \cdot cm)^{-1}$,介于导体和绝缘体之间。

半导体具有些奇妙的特性：①它的电阻率随着温度的增加而减小(称为“负温度系数”);②微量的杂质对半导体的导电性能产生极大的影响;③光照可以改变半导体的电阻率。

现代科学技术的发展，也推动了新材料的研制。就半导体而言，现在不仅有元素半导体锗、硅等，还有化合物半导体砷化镓(GaAs)、锑化铟(InSb)等；不仅有晶态半导体，还发展了非晶和多晶半导体材料。作为新材料的佼佼者——半导体，已构成了一个光彩夺目的材料大家族。

n 型半导体和 p 型半导体　硅的原料取自遍地都是的砂砾。在陆地表面层的元素中，硅占了 90%以上。但经提炼后的硅单晶半导体，必需经过掺杂才能成为制造晶体管、集成电路的材料。如果在一块没有其他杂质原子的纯净半导体(称为“本征半导体”)中掺入百万分之一的杂质，半导体的导电能力一下子就提高了 100 万倍。可见，半导体的许多奇妙性质原来出自半导体的掺杂。硅、锗是四族元素，作为杂质的元素有三族元素硼（B)、铝(Al)和五族元素磷(P)、砷(As)等。若在本征半导体内掺入微量（如 10^{-6}）的五族杂质元素，因为这些元素的原子有五个价电子，当它们进入硅半导体取代硅原子与周围的硅原子结合时，除了其中四个价电子与近邻的四个硅原子组成四个共价键外，还多了一个可导电的电子，见图 1.3(a)。图 1.3(a)中“·”表示电子。由此可见，一个五族杂质元素的原子向硅半导体提供了一个自由电子，本身成为一个带正电的杂质离子，被称为“施主杂质”。室温时,杂质原子完全被电离,每个杂质原子施


Si
V
Si
Si
Si

我们还引入了半导体的费米能级 E_F，来表示一定温度时半导体内电子数目的多少。在本征半导体内，电子数和空穴数相等，它的费米能级 E_F 就在禁带中央，以 E_i 表示；在 n 型半导体内电子数 n 大于空穴数 p，所以它的费米能级 E_F 就在 E_i 的上面，靠向导带底 E_c；对于 p 型半导体内，空穴数 p 大于电子数 n，所以费米能级 E_F 就在 E_i 的下面，靠向价带顶，如图 1.4 所示。这样我们就可以从 E_F 的高低来判断半导体材料的导电类型。

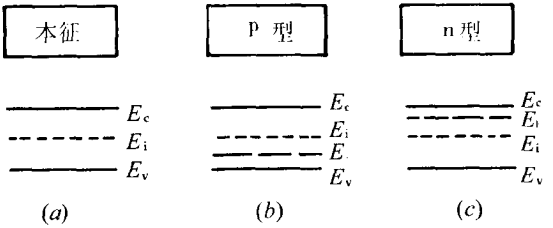


图 1.4 半导体的费米能级

$(a)E_F = E_i$；$(b)E_F < E_i$；$(c)E_F > E_i$

2. pn 结—— 晶体管的核心

1947 年 12月 23 日，在美国著名的贝尔实验室里诞生了世界上第一只晶体管。这是由半导体锗晶体做成的点接触型晶体管。晶体管具有体积小、重量轻、耗电少和可靠性高等优点，由它取代电子管后使电子设备向微型化迈出了重要的一步，并由此引发了电子工业和其他工业的深刻变化。发明晶体管的三位科学家肖克莱、巴丁和布拉顿因此荣获了 1956 年的诺贝尔物理学奖。

自从晶体管问世以来的半个多世纪里，全世界已生产的晶体管是形形色色、五花八门的。但按其结构及制造工艺来分有合金管、合金扩散管、台面管和平面管等几种。其中平面管是最常用的、性能较好的一种。此外，平面工艺适宜于器件的集成化，因此在集成电路里的晶体管也大都是平面型的。晶体管作为放大器，按其电流传输方

式可以分为双极型晶体管和场效应晶体管两大类。

pn 结　pn 结是结型晶体管的核心。所谓 pn 结是指 p 型半导体和 n 型半导体连接处形成的一个特殊结构。图 1.5 是一个平衡 pn

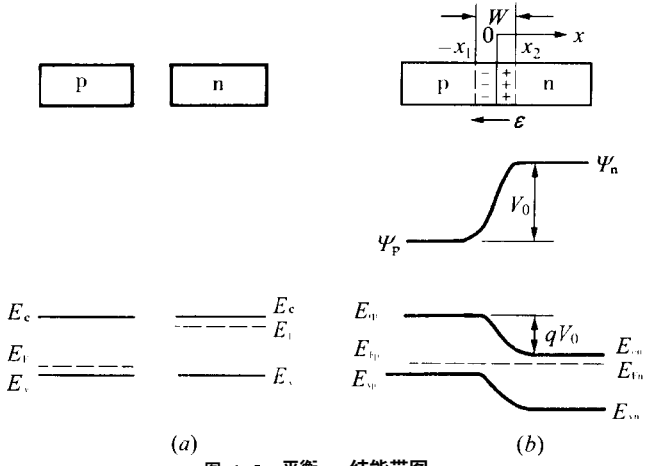


图 1.5　平衡 pn 结能带图

(a) 未形成结的能带图；(b) pn结在过渡区 W 中的空间电荷、接触电热和能带图

结的能带图。我们已知 p 型半导体内的空穴数比 n 型半导体多，因此 p 区和 n 区的空穴浓度不同，空穴就要从高浓度的 p 区经过 p、n 区的交界面向 n 区扩散 同样，由于 n 区的电子浓度大于 p 区，电子也会从 n 区经 p、n 交界面向 p 区扩散。那末，这种扩散运动是不是会无止境地进行下去呢？事实上，当空穴从 p 区扩散到 n 区时，在 p 区一侧留下带负电的受主离子；同样，当电子从 n 区扩散到 p 区时，在 n 型一侧留下带正电的施主离子。这些带负电的受主离子和带正电的施主离子，它们在界面两侧分别形成负、正两个电荷层（厚度分别为 x_1 和 x_2），这个位于界面，宽度为 $W(W = x_1 + x_2)$ 的正、负电荷区域被称为“空间电荷区”。在空间电荷区内，导电类型是从 p 区的空穴导电过渡到 n 区的电子导电（反过来说是从 n 区的电子型过渡

到 p 区的空穴型），所以空间电荷区又被称为“过渡区”。由于在过渡区内存在着一个正、负电荷层，会产生一个静电场 ε，这个静电场被称为“内建场”。静电场的方向从正电荷层指向负电荷层，电场强度随空间电荷层的增加而增强在内建场的作用下，空穴要从 n 区漂移到 p 区，而电子要从 p 区漂移到 n 区。可见，电子、空穴的漂移运动与它们的扩散运动方向恰好相反。当这两种运动相互抵消时，半导体的净电流就为零，此时标志界面两侧的半导体达到了一个新的平衡状态，这个界面区域就被称为“pn 结”。

平衡 pn 结形成后，空间电荷区内的内建场 ε 指向电势降落的方向，也就是说，n 区的电势高于 p 区的电势，其差值 V_0 被称为“接触电势”。这样电子在 n 区的势能比 p 区降低了 $|qV_0|$ 值（因为电子电荷为负，所以电子在电势高的区域其势能反而降低），这种情况表现在电子能带图中 n 区的能带比 p 区下降 $|qV_0|$ 值，如图 1.5(b) 所示。当然，对空穴而言，它在 n 区的能带要比 p 区的高出 $|qV_0|$。显然可见，由于 pn 结的形成，半导体的能带发生了弯曲。这时电子要从 n 区向 p 区扩散时，由于电子在 n 区的能带比 p 区的低，就必须跨越这个高度为 $|qV_0|$ 的势垒。同样，空穴要从 p 区向 n 区扩散，由于空穴在 p 区的势能比 n 区的低，所以也必须跨越 $|qV_0|$ 的势垒。由于过渡区的存在，电子和空穴在扩散时都要受到阻碍，它是载流子前进道路上的“壁垒关隘”，因此过渡区又被称为“势垒区”。

最简单的晶体二极管就是一个 pn 结。pn 结具有整流特性、击穿特性和电容特性。

将二极管正向连接，即 p 区接正电位，n 区接负电位时，二极管内就有较大的正向电流 I 流过 pn 结，如图 1.6 所示。

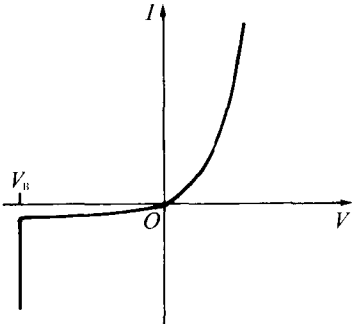


图 1.6 pn 结的 $I-V$ 特性

需要全本请访问 www.ertongbook.com