

中等专业学校教材

低频电子线路

宁世新 主编



电子工业出版社

内 容 简 介

本书是根据电子工业部系统《中等专业学校无线电技术专业〈低频电子线路〉教学大纲（试行）》编写、做为教材出版的，也可供其它专业学生、从事无线电电子技术的工程技术人员及业余自学者参考。全书内容包括：晶体二极管与三极管，小信号放大电路，场效应管及其放大电路，放大电路的负反馈，直流放大电路，线性集成运算放大器，功率放大电路，整流、滤波及稳压电路和电子管及其电路。书中通过对电子器件及其电路的分析，着重阐明电子线路中的基本原理、基本概念和基本分析方法。各部分内容均介绍了电路实例，并选配一定数量的例题、思考题和练习题。

低频电子线路

宁世新 编

责任编辑：王小民

*

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

北京市昌平区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 $1/16$ 印张：22 字数：507千字

1986年3月第1版 1986年4月第1次印刷

印数：10000册 定价：3.15元

统一书号：15290·313

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。并制定了一九八二到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

本教材是根据电子工业部《中等专业学校无线电技术专业〈低频电子线路〉教学大纲》编写的。

《低频电子线路》是无线电技术专业的重要专业基础课之一。它的研究对象是电子器件及其低频电路。“低频”是指工作于较低的频率范围,在此范围内器件的频率参数基本上可以不予考虑。本课程主要研究放大电路、整流电路和稳压电路。

学习本课程的目的,是使学生了解基本电子器件(晶体二极管和三极管、场效应管和电子管等)的工作原理、特性曲线和参数,牢固掌握各种放大、整流和稳压电路的工作原理和分析方法,并具备计算能力和一定的实验技能,为学习《高频电子线路》等后续专业基础课和专业课铺平道路。

《电工基础》研究的是线性元件和独立源的问题。本课程开始接触非线性元件和受控源(有源器件),并建立起一套非线性电路的分析和计算方法。无疑,打好这个基础,对于电子技术人员来说是十分重要的。

电子器件与电子线路是本课所涉及的两大分支,二者相辅相成,在发展中相互促进。各类电子器件的发明,丰富了电子线路的功能和应用范围;电子线路在实际使用中对性能指标的需求,又推动了电子器件的改进和创新。

最早的电子器件是电子管(真空管)。1904年英国电学家弗莱明根据爱迪生效应发明了电子二极管。同年,意大利的马可尼就使用二极管做跨洋无线电通信的检波器。1906年,美国电学家德富雷斯特发明电子三极管,为近代无线电电子工业的迅速发展奠定了重要基础。二十年代到三十年代出现四极管、五极管,使电子管的性能不断改善。

第二次世界大战结束(1945年)后,各国加紧了对电子器件小型化的研究。1948年贝尔实验室的物理学家巴享、肖克莱发明了晶体三极管,导致了无线电电子学领域的一场革命。1953年,世界上第一批晶体管收音机投放市场。

为进一步使无线电电子设备缩小体积、减轻重量、降低能耗和提高可靠性,五十年代末提出集成电路(将二极管、三极管、电阻、电容及它们的连线制作在同一晶片上)的设想。1962年这一设想付诸实践,世界上出现第一块集成电路(数字电路)的正式产品。1964年线性集成运算放大电路问世。1967年和1977年分别诞生了第一块大规模和超大规模集成电路(均为数字电路)。

人们通常将电子管称为电子器件的第一代,晶体管为第二代,集成电路为第三代,大规模集成电路为第四代。二十世纪的七十年间,电子器件经历了新老四代,可见无线电电子技术发展速度之快是十分惊人的。

电子线路的进展也十分迅速。目前,灵敏度高、失真小、输出功率大和噪声低的放大电路,高稳定度的直流电源,低漂移的直流放大电路和高精度的运算电路已很普遍。特别是集成电路的迅速发展,打破了器件和电路的界限,使电路的性能得到改善,功能不断扩大。

面对电子技术的飞速发展,未来的电子技术人员必须着眼于基本理论、基本知识的学习和基本技能的训练。只有打好基础,才能适应工作的需要。

本着这种精神,本书加强了基本概念的阐述,并结合中等专业学校的特点,努力做到既

不使内容偏深、篇幅过长，同时尽可能多地联系实际和更新一部分内容。所有这些尝试，都没有离开教学大纲要求的范围。

学习本课程时，要特别注意基本概念（如非线性的电子器件、非独立的受控源、电路的反馈等）的建立，基本原理的理解和基本方法（非线性电路在各种条件下的近似分析方法及负反馈电路的分析方法等）的掌握，并通过每章后面的思考题和练习题来增强基本概念与原理的理解和基本运算能力的培养。同时，作为一门实践性较强的课程，还必须通过实验课中对各种电路的调整和测试来加强基本技能的训练。

书中标题前注有*号的为大纲中规定的选学内容或编者认为有必要选入的内容，教学过程中，各校可根据自己的具体情况加以取舍。

本书在编写过程中参考了本校周正六讲师、穆天宝老师编写的讲义初稿的部分内容，他们对原稿也提出了一些意见。辽宁电子工业学校领导及专业科负责人对本书的编写工作给予了大力支持，为本书的成熟创造了有利的条件。

南京无线电工业学校俞家琦副教授、郑应光老师审查了本书的初稿及修改稿，提出了许多修改意见。大连电子工业学校讲师张绪华审定了第六章的修改稿。编者对此表示衷心的感谢。

限于编者水平，错误及不当之处难免，诚恳希望广大读者提出宝贵意见。

目 录

第一章 晶体二极管与三极管	(1)
§ 1-1 半导体及其导电性能	(1)
§ 1-2 晶体管基础—— PN 结	(5)
§ 1-3 晶体二极管	(10)
§ 1-4 晶体三极管	(17)
附录	(29)
本章小结	(32)
思考题	(33)
练习题	(34)
第二章 小信号放大电路	(36)
§ 2-1 放大电路基础	(36)
§ 2-2 用图解法分析放大电路	(46)
§ 2-3 等效电路分析法	(53)
§ 2-4 静态工作点的稳定	(61)
§ 2-5 共集电极电路和共基极电路	(66)
§ 2-6 多级放大电路	(74)
§ 2-7 放大电路的频率特性	(81)
本章小结	(91)
思考题	(92)
练习题	(94)
第三章 场效应管及其放大电路	(98)
§ 3-1 结型场效应管	(98)
§ 3-2 绝缘栅场效应管	(105)
§ 3-3 场效应管的特点及使用常识	(109)
§ 3-4 场效应管放大电路	(110)
本章小结	(117)
思考题	(118)
练习题	(119)
第四章 放大电路的负反馈	(121)
§ 4-1 反馈的基本概念	(121)
§ 4-2 负反馈对放大电路性能的影响	(129)
§ 4-3 负反馈放大电路的方框图分析法	(135)
§ 4-4 负反馈放大电路分析计算举例	(141)
§ 4-5 放大电路的自激振荡及其防止	(146)
附 录	(150)
本章小结	(151)
思考题	(152)
练习题	(155)
第五章 直流放大电路	(157)
§ 5-1 直流放大电路的特殊问题	(157)
§ 5-2 差动放大电路原理及性能分析	(161)
§ 5-3 差动放大电路性能的进一步提高	(169)

§ 5-4 单端输入式差动放大电路	(176)
本章小结	(178)
思考题	(179)
练习题	(179)
第六章 线性集成运算放大器	(182)
§ 6-1 半导体集成电路简介	(182)
§ 6-2 集成运放基础	(186)
§ 6-3 集成运放在信号运算电路中的应用	(194)
§ 6-4 集成运放其它应用举例	(201)
§ 6-5 集成运放电路的一般结构	(208)
§ 6-6 集成运放内部电路举例	(217)
§ 6-7 集成运放应用中的一些问题	(223)
本章小结	(231)
思考题	(231)
练习题	(232)
第七章 功率放大电路	(235)
§ 7-1 概述	(235)
§ 7-2 射极输出器功率效率分析	(238)
§ 7-3 互补对称电路的原理及类型	(241)
§ 7-4 变压器耦合功率放大电路	(253)
§ 7-5 功率放大电路的非线性失真	(260)
§ 7-6 功率管的安全使用	(263)
本章小结	(269)
思考题	(270)
练习题	(271)
第八章 整流、滤波和稳压电路	(272)
§ 8-1 整流电路	(273)
§ 8-2 滤波电路	(277)
§ 8-3 硅稳压管稳压电路	(285)
§ 8-4 串联型晶体管稳压电路	(289)
* § 8-5 开关式稳压电路	(305)
§ 8-6 集成电路稳压器	(307)
本章小结	(313)
思考题	(313)
练习题	(314)
第九章 电子管及其电路	(316)
§ 9-1 二极管及整流电路	(316)
§ 9-2 三极管	(320)
§ 9-3 四极管、五极管和束射管	(323)
§ 9-4 电子管的定额及使用常识	(329)
§ 9-5 电子管电路分析举例—阻容耦合电压放大器	(331)
本章小结	(337)
思考题	(338)
练习题	(338)

第一章 晶体二极管与三极管

电子线路中含有电子器件，它与《电工基础》中学过的普通电路元件相比，功能比较复杂，用途也很广泛。最常用的电子器件是晶体二极管与三极管。因此，学习电子线路必须首先了解晶体管的原理、掌握其性能。由于制造晶体管（包括场效应管、集成电路等）的原材料是半导体，所以本章先介绍半导体的导电性能，进而分析作为晶体管的基础的 PN 结，然后分别讨论晶体二极管、三极管的原理、特性和参数等。

§1-1 半导体及其导电性能

从物理学中可知，自然界的一切物质按导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三类。导体的导电能力最强，绝缘体的导电能力很差。顾名思义，半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，电阻率 ρ 值的大致范围为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。例如，室温下硅的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ；锗为 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体之所以成为近代电子工业最重要的材料，并不在于它导电能力的强弱，而主要是其导电能力（ ρ 值）会因下列因素而产生显著变化：

（1）掺杂特性 半导体的电阻率受掺入杂质的影响很大，这一点和导体、绝缘体截然不同。在半导体中，即使掺入极微量的杂质，便能使其 ρ 值大为降低。如在纯净硅中加入百万分之一的硼， ρ 值就降为 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ ；而在金属或绝缘体中，即便加入千分之一的杂质，对 ρ 值的影响也微不足道。正是利用它的这一特点，才能制成各种半导体器件。

（2）热敏和光敏特性 当半导体受热或被光照射时，导电能力将明显增强， ρ 值大大减小，分别称为热敏和光敏特性。而金属导体受热时， ρ 值则略有增大。

半导体的上述特性是由其原子结构所决定的，下面按照不同情况分别加以说明。

一、本征半导体

目前用得最多的半导体材料是硅和锗。二者的原子序数（即原子核外的电子数）分别为 14 和 32，原子结构如图 1-1 (a) 所示。最外层电子称为价电子，它决定了元素的化学性质和导电性能。硅和锗都有四个价电子，均为四价元素。因价电子是要研究的对象，为了简化，

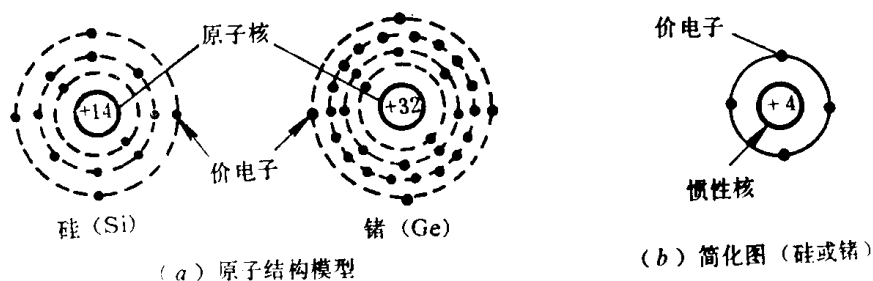


图 1-1 硅和锗原子结构模型及其简化图

可把原子核和内层电子看成一个比较稳定的整体，称为惯性核。硅或锗的惯性核都带有四个

电子电量的正电，因而两者的原子结构模型简化图具有相同的形式，如图 1-1(b)所示。

半导体材料都要先制成晶体（称为“拉单晶”），然后再用来制造晶体管。晶体的原子是按一定规则整齐地排列着。硅或锗原子组成晶体后，原子之间靠得很近，通过由价电子组成的“共价键”把相邻的原子牢固地联系在一起。共价键是指两相邻原子各拿出一个价电子作为“共用电子对”所形成的束缚作用。由于共价键上的价电子受到原子核的吸引，不能自由移动，所以称为束缚电子。硅或锗的每个原子和相邻的四个原子构成四个共价键，晶格结构如图 1-2 所示。高度提纯后，几乎不含杂质的半导体称为本征半导体。“本征”的意义是来自其本身的特征，而没有掺杂的影响。

共价键结构较为稳定。在绝对零度（ -273°C ）时，价电子没有能力摆脱共价键的束缚，因而不存在自由电子，这时的半导体就象绝缘体一样，不能导电。但当温度升高后，情况又是怎样呢？

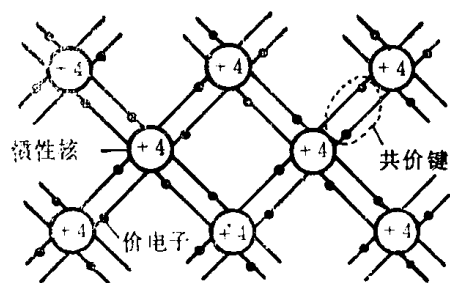


图 1-2 硅或锗晶体共价键结构示意图

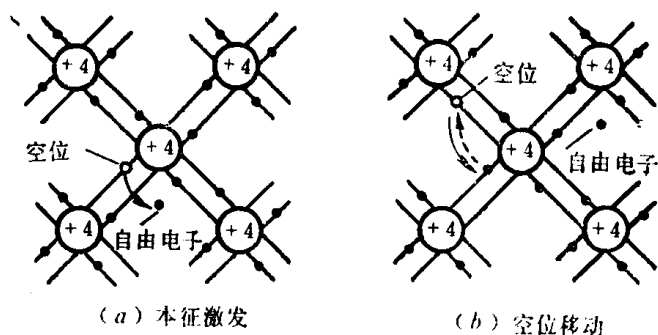


图 1-3 本征激发和空位的移动

1. 本征激发

半导体的共价键不象绝缘体那样牢固。当温度升高或受光照射时，价电子从外界获得能量，其中一部分将摆脱共价键的束缚而成为可以在晶体中随意运动的自由电子，同时在共价键中留下了相等数量的“空位”，这种现象称为本征激发或热激发，如图 1-3(a)所示。

2. 两种载流子

本征激发使晶体中出现了自由电子，这是不难理解的。同时还应看到，当出现空位时，邻近共价键上的电子由于热运动很容易跳过来予以填补，从而使空位转移到另外的共价键上，如图 1-3(b)所示，其中虚线箭头表示空位的移动方向，而实线箭头表示价电子的移动方向。而后，新的空位又被其相邻的价电子填补。上述过程的进行，就相当于空位在晶体中移动。显然，带负电荷的价电子依次填补空位的作用与带正电荷的粒子作反方向运动是等效的。人们将空位看做带正电荷（电量与电子相等但符号相反）的粒子，并称之为“空穴”。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。半导体中的自由电子（可简称为电子）和空穴都是运载电流的粒子，称为载流子。本征激发时，电子和空穴总是成对出现的，被称做“电子-空穴对”。

需要强调的是，空穴的移动是人们根据共价键中出现空位的特性虚拟出来的。实际上，它的移动始终是束缚电子在共价键中的移动，与自由电子的移动不同。

3. “激发”与“复合”的动态平衡

由上可见，室温下的本征半导体已不能再看做绝缘体。当半导体中出现了电子-空穴对后，并非静止不动，而是不停地运动着；一方面由于本征激发产生电子-空穴对，另一方面，

在运动过程中某些电子和空穴可能相遇，空穴将被自由电子填入，电子-空穴对消失，共价键得到恢复，这种现象称为“复合”。在本征半导体中不断地进行着“激发”与“复合”两种相反的过程。在恒定的温度下，两种过程将达到动态平衡，载流子浓度（即 1cm^3 晶体中的电子或空穴数）保持在一定值。

温度升高时，将破坏原来的平衡，而转化为新的平衡，结果载流子数量增多。室温下的硅或锗，大约温度每升高 10°C ，载流子浓度增加一倍。由于导电能力的强弱取决于载流子数量的多少，于是，热敏和光敏特性得以解释，同时可知，温度是影响半导体性能的一个十分重要的外部因素。

在相同的温度下，本征激发的载流子浓度，锗远大于硅。这是因为锗原子中价电子处于第四层（硅则处于第三层），更容易摆脱共价键的束缚。尽管如此，本征半导体中的载流子数量还是很少，且随温度而剧烈变化，故其实际用处不多。

二、掺杂半导体

在本征半导体中人为地掺入微量其它元素（称为杂质），便得到掺杂半导体，其导电能力将大为增强，可用来制造各类半导体器件。按掺入杂质性质的不同，可分为两大类，下面以本征硅为例来说明。

1. N型半导体

在本征硅中，掺入微量五价元素磷（或锑）后，磷原子将均匀散布于硅原子中，当其原子取代一个硅原子时，以四个价电子与相邻硅原子组成共价键，必多余一个价电子，由于它不受共价键的束缚，在室温下极易成为自由电子，如图1-4所示。每掺入一个杂质原子，便产生（施给）一个自由电子，故常将掺入的五价元素称为施主杂质。

施主杂质原子失去电子后，本身即成为正离子，被束缚在晶格结构中，不起导电作用，这与本征激发不同。

通常，由掺杂所产生的自由电子数目大大超过本征激发产生的电子-空穴对数目，于是晶体中的自由电子数目远大于空穴数目，故这种半导体中的自由电子为多数载流子，简称多子；空穴为少数载流子，简称少子。因其导电主要靠自由电子，故称这种半导体为电子型半导体或N型半导体。

在N型半导体中，尽管自由电子数目远多于空穴数目，但由于同时存在许多对应的正离子，故从整体看，它仍是电中性的。

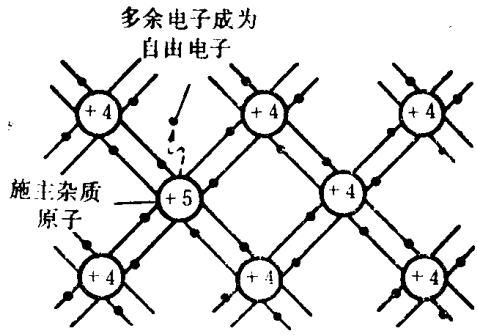


图1-4 N型半导体结构示意图

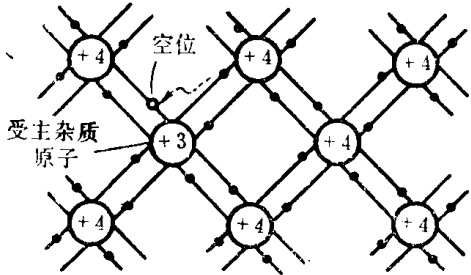


图1-5 P型半导体结构示意图

2. P 型半导体

在本征硅中，掺入微量的三价元素硼（或钢）后，硼原子也均匀散布于硅原子中，当其原子取代一个硅原子时，必缺少一个价电子，因而产生一空位。室温下极易被邻近硅原子的价电子所填补（见图1-5），从而产生一空穴。由于掺入的三价元素原子接受价电子而成为负离子，故将其称为受主杂质。

受主杂质原子接受电子后，本身即成为负离子，被束缚在晶格结构中，不起导电作用。

这种半导体中，空穴为多子，自由电子为少子，故称为空穴型半导体或P型半导体。掺杂后的整个半导体仍是电中性的。

如果在半导体中既掺施主杂质，又掺受主杂质，则其导电类型决定于浓度大的杂质。杂质浓度通常用 1 cm^3 晶体中的杂质原子数目表示。也就是说，当两种性质相反的杂质共存于半导体时，其类型取决于二者的比例，工程上常靠控制掺杂的性质和浓度来实现半导体在N型和P型之间相互转化。上述过程称为杂质补偿，它是制造PN结的基本方法。

制造晶体管的材料除硅、锗等元素半导体外，还有化合物半导体。它是将元素周期表的Ⅲ族和Ⅴ族元素用人工合成的方法制成的半导体材料，目前常用的有砷化镓、磷化镓和磷化铟等。当在其中掺入微量的六价元素或二价元素时，则可分别制成N型或P型半导体。本书限于篇幅，不作介绍。

三、半导体中的电流

载流子做定向运动就形成电流。半导体中载流子的定向运动有两种方式：在电场作用下的漂移运动和由于载流子浓度不均匀而产生的扩散运动。前者形成漂移电流，后者形成扩散电流。

1. 漂移电流

在半导体两端加一定电压，半导体内便存在外电场。这时，自由电子将逆着外电场方向、空穴将沿着外电场方向移动，这种有规则的运动形成的电流称为漂移电流（见图1-6）。

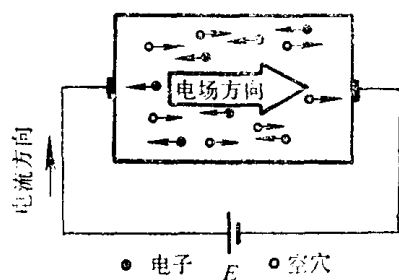


图1-6 半导体中的漂移电流

半导体中的漂移电流与金属中自由电子的传导电流相类似。但是，半导体中有两种载流子参与导电，自由电子和空穴电荷性质相反，运动的方向也相反，它们形成的电流方向却是一致的。象这样由两种载流子提供的导电称为“双极性导电”。对本征半导体来说，自由电子导电的同时，必然也有空穴导电；而对杂质半导体来说，漂移电流主要是多子形成的，少子的漂移电流则可忽略不计。

必须指出，杂质半导体中虽然多子对导电性能起着决定性作用，但由于本征激发产生的少数数量与温度密切相关，它形成的电流将对器件和电路的温度特性有很大的影响。

电流的大小为单位时间通过半导体横截面的电荷量。因此，它不仅和载流子浓度成正比，还和载流子定向运动的速度成正比。在相同的电场强度下，自由电子和空穴的定向运动速度是不同的，而且还和温度有关。在室温下，硅中自由电子定向运动的速度约为空穴的三倍，故在本征硅中自由电子产生的漂移电流约为空穴漂移电流的三倍。

2. 扩散电流

物质由浓度较高的区域向浓度较低的区域散开的过程称为扩散运动，它是自然界中一种普遍的物理现象。扩散运动是由浓度差引起的，浓度差越大，扩散运动进行得就越剧烈。

半导体中也有类似的现象。如果在半导体内的某两部分出现了载流子浓度高低差异的情况，即使没有电场作用，载流子也会从浓度较高的区域向浓度较低的区域扩散。这时，载流子的无规则热运动就具有扩散运动的性质。由于扩散而产生的载流子定向运动所形成的电流称为扩散电流。

可见，载流子分布不均匀将引起扩散电流，其大小正比于载流子的浓度差（即浓度随距离的变化率，数学上叫做“浓度梯度”），而与载流子浓度的大小没有直接关系。因为即使浓度很高，只要各处分布均匀，扩散运动也不会发生。

应该特别指出，尽管扩散运动与电场无关，但欲维持半导体中的扩散电流，就必须由电源不断地从外部注入载流子，以保持半导体中载流子的浓度差。离开电源，任何形式的电流都不能维持。

扩散电流是半导体区别于导体的一种特有的电流。在晶体三极管中，少子的扩散电流是很重要的，而在第三章中将看到，场效应管中则是应用多子的漂移电流。

§1-2 晶体管基础——PN结

在半导体中掺入杂质的意义，远不只是为了提高其导电能力。人们常在 N 型半导体材料上用杂质补偿的方法，将其一部分转变为 P 型；或反之，将 P 型材料的一部分转变为 N 型，从而与原杂质半导体之间形成 P 型半导体和 N 型半导体的相接触部分，此处即为 PN 结。

PN 结是半导体器件的核心。晶体二极管就是单个 PN 结的器件；晶体三极管具有两个 PN 结；场效应管的基本结构也是 PN 结。因而可以说， PN 结是晶体管的基础；学习晶体管原理，必须从 PN 结入手。

一、 PN 结中的动态平衡

1. 多子的扩散产生“空间电荷区”

当掺入不同杂质，使半导体中两边分别形成 P 型区和 N 型区时，由于载流子的浓度差，两区界面附近的多子将首先各自向对方扩散，并分别与对方区域中的多子复合。结果，使界面附近的 P 区中留下负的受主杂质离子， N 区中留下正的施主杂质离子，因而产生了由 N 区指向 P 区的“内电场”，如图1-7所示。因为正、负离子不能自由移动，于是在界面两侧出现带等量异性电荷的一层很薄的“空间电荷区”。因为其中的载流子几乎耗费殆尽，电阻率很高，所以又称为耗尽层或高阻区。

2. 扩散与漂移的动态平衡

随着扩散运动的进行，界面两侧出现的电荷量增多，空间电荷区加宽，内电场随即增强。此电场对上述扩散运动起阻碍作用，故空间电荷区又称“阻挡层”。另一方面，内电场还将促使两区少子向对方漂移（即 P 区自由电子向 N 区漂移， N

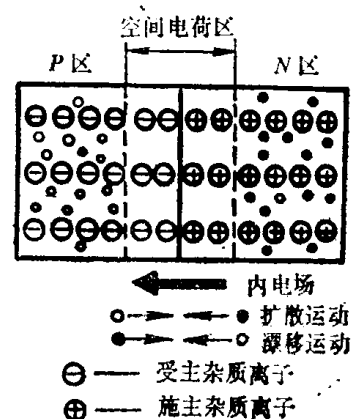


图1-7 空间电荷区及内电场

区空穴向 P 区漂移), 方向与扩散运动相反。这将使空间电荷减少, 导致空间电荷区变窄, 可见其作用也与扩散运动相反。随着内电场的增强, 扩散运动将逐渐减弱, 漂移运动则将加强。最后, 两种运动达到动态平衡。

这时, 在 P 区和 N 区界面附近有一个一定宽度 (微米数量级) 的空间电荷区, 同时也有一个相应数值的内建电位差 V_D ——内电场在 PN 结中产生的电位差。阻挡层的主要特性由 V_D 来描述。由于 V_D 对多子的扩散起着阻碍作用, 相当于“电位堡垒”, 故又将空间电荷区称为位垒区或势垒区。

V_D 的大小除因材料而异外, 还与 PN 结两边的掺杂浓度及温度有关。通常由硅材料制成的 PN 结的 V_D 约 $0.6 \sim 0.8V$, 由锗材料制成的 PN 结约 $0.2 \sim 0.3V$ 。对于同一材料的 PN 结, V_D 随掺杂浓度的增大而升高, 随温度的上升而降低。

实际的 PN 结都是“非对称结”—— P 区和 N 区掺杂浓度不等 (通常相差甚大), 其中掺杂浓度 P 区大于 N 区的称为 P^+N 结, 反之则称为 PN^+ 结。对于非对称结来说, 阻挡层将主要集中在掺杂浓度低的区域。图1-8表示 PN^+ 结的情况, P 区为了拿出同样多的负离子与 N 区组

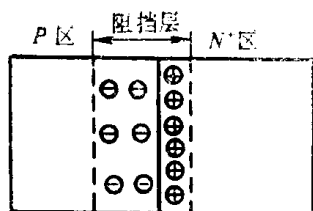
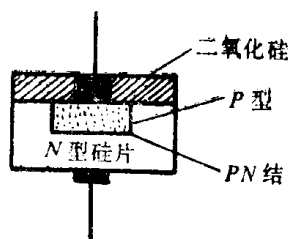
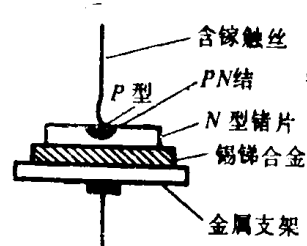


图1-8 PN^+ 结阻挡层



(a) 面结合型



(b) 点接触型

图1-9 PN 结结构示意图

成正、负电荷相等的阻挡层, 则 P 区一边的空间电荷区将扩展得较宽。

需要指出的是, PN 结并非导电类型不同的两种半导体材料简单的粘合, 而是要求在 P 型区域和 N 型区域的界面结合处, 必须保持连续的晶格结构。

PN 结可按结构分为面结合型和点接触型两种。用平面扩散法制做面结合型 PN 结, 是在 N 型硅片上经氧化生成二氧化硅层, 再在需要形成 P 型硅处将二氧化硅腐蚀掉 (即“光刻”一个“窗口”), 然后进行受主杂质的气态扩散, 使窗口处转变为 P 型, 从而制成 PN 结, 如图1-9(a)所示。

点接触型 PN 结的典型实例如图1-9(b)所示。将 N 型锗片与含镓原子的金属触丝相接触, 在强电流脉冲的作用下, 触丝尖端的金属镓原子因受热熔化而渗入 N 型锗中, 通过杂质补偿使接触处转变为 P 型, 从而制成 PN 结。

二、 PN 结的单向导电性

PN 结外加电压时, 便显示出它的基本特性——单向导电性。

1. 正向导通

当电源正端接 P 区、负端接 N 区 (见图1-10) 时, 外加电场与 PN 结内电场方向相反, 使内电场受到削弱。此时, PN 结的平衡状态被打破, P 区和 N 区中的多子分别向阻挡层移动, 中和了一部分正、负离子, 这将使空间电荷减少, PN 结变窄, 阻挡层电阻减小, 因而称为“外加正向电压”或正向偏置, 简称“正偏”。上述情况有利于多子的扩散运动, 于是将形成较大的扩散电流。它在 PN 结内的电流中起支配作用。与此同时, 两区的少数也在电场作用

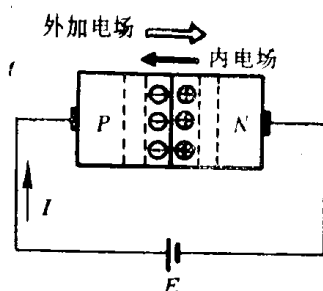


图1-10 正偏下的PN结

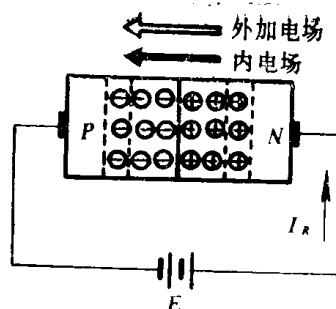


图1-11 反偏下的PN结

下产生漂移，漂移电流则相对很弱。这时外电路中流入P区的电流 I ，称为正向电流。当外加电压增高时，PN结内电场进一步削弱，扩散电流随之迅速增大。这种情况类似于一个电开关的接通状态，故称为“正向导通”。

2. 反向截止

当电源正端接N区、负端接P区（见图1-11）时，外加电场与内电场方向一致，使内电场得到加强。两区中的多子都将进一步离开PN结，使PN结变宽，阻挡层电阻增大，因而称为“外加反向电压”或反向偏置，简称“反偏”。不难理解，反偏时有利于少子的漂移，却不利于多子的扩散，两区中的多子很难越过阻挡层，结果使漂移电流在PN结内起支配作用。P区的少数电子和N区的少数空穴一旦到达阻挡层边界，就会全部被强电场分别“拉”向对方。漂移电流的方向和扩散电流相反，表现在外电路中有一个流入N区的反向电流 I_R 。因少数数量极少，故 I_R 值很小，一般为微安数量级。同时由于少子是由本征激发产生的，当PN结制成后，其数量决定于温度而与外加电压几乎无关。在一定的温度下，只要外加电压产生的电场足以把它们加速而全部通过阻挡层，就是电压再高也不能使载流子数量增多，于是电流值趋于恒定。这时的 I_R 称为PN结的反向饱和电流，用 I_s 表示。

反向偏置的PN结， I_s 数值虽小，但受温度影响很大，是实际应用中常须考虑的重要因素。

综上所述，PN结正偏时电流随外加电压迅速增大，呈现导通状态；反偏时仅有很小的反向饱和电流，呈现截止状态。这就是单向导电性，是PN结电流与电压非线性关系的重要标志。

3. PN结的伏安特性

理论上推导得出的PN结电流 I 与外加电压 V 的定量关系表达式称为PN结电流方程

$$I = I_s \left(e^{\frac{q}{kT}V} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中 I_s 为反向饱和电流， q 为电子电荷量的绝对值（ $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ，C——库）， k 为玻尔兹曼常数（ $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ，J——焦）， T 为绝对温度（K）。

外加电压 V ，正偏时取正值，反偏时取负值。 $V_T = kT/q$ 为温度的电压当量，可求得室温（ 25°C ）时的 $V_T \approx 0.026 \text{V} = 26 \text{mV}$ 。

由式（1-1）可见，当正向电压超过100mV时， $e^{V/V_T} \gg 1$ ，公式可简化为

$$I = I_s e^{\frac{q}{kT}V} = I_s e^{\frac{V}{V_T}} \quad (1-2)$$

即正向电流随正向电压按指数规律增长。

当反向电压超过100mV时, $e^{V/V_T} \ll 1$, 公式可简化为

$$I = -I_s \quad (1-3)$$

即反向电流与外加电压无关, 而为一恒定值 ($-I_s$)。

当温度不变时, 按上述关系描绘的电流与电压关系曲线, 称为PN结的伏安特性, 如图1-12所示。

线性元件的电流、电压关系满足线性方程(代数方程或微分方程、积分方程), 并且可以简单地用一个参量——例如电阻器的电阻、电容器的电容、电感器的电感——描述它们的特性。非线性元件的电流、电压关系不满足线性方程, 电流、电压的非线性关系则需要用伏安特性来表示。伏安特性表示法直观而简洁, 在本课程中经常采用。

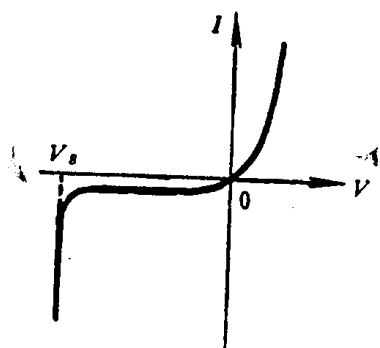


图1-12 PN结的伏安特性

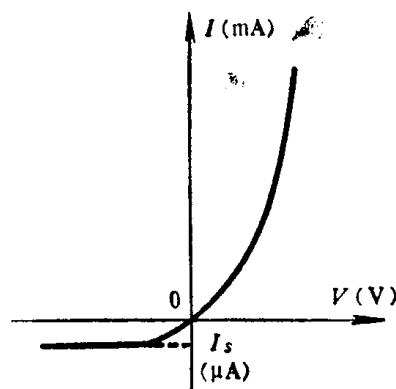


图1-13 PN结的反向击穿

三、PN结的反向击穿

当PN结外加反向电压增加到一定值时, 反向电流将突然急剧增大, 如图1-13所示, 这种现象称为PN结的反向击穿。反向电流开始剧增时所对应的电压称为反向击穿电压, 用 V_B 表示。造成反向击穿的主要原因有三种。

1. 雪崩击穿

对于阻挡层较宽的PN结, 当反向电压增高时, 阻挡层内电场增强, 通过它的少子的漂移速度加快, 动能增大。当电压增至一定值时, 载流子获得的动能足以把束缚在共价键上的价电子碰撞出来, 产生电子-空穴对(这个过程称为碰撞电离)。这些电子和空穴在强电场的作用下, 再碰撞晶格中的其它离子和中性原子, 从而又产生新的电子-空穴对。如此连锁反应, 可使阻挡层中载流子大量增多, 因而反向电流急剧增大。由于载流子数量的增多过程就像在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样, 故得其名。

2. 齐纳击穿

当半导体掺杂浓度很高时, 阻挡层就很薄(例如掺杂浓度为 10^{18}cm^{-3} 的锗PN结, 阻挡层宽度只有0.04 μm)。这样, 载流子行程较短, 得不到很大的动能, 所以发生碰撞电离的可能性较小。但是正由于阻挡层很薄, 只要加不高的反向电压, 就能建立起很强的电场(如上述锗PN结, 加1V反向电压, 就能产生 $2.5 \times 10^5 \text{V/cm}$ 的强电场), 足以把阻挡层内被束缚的价电子从共价键中直接“拉”出来, 产生电子-空穴对(这个过程称为场致电离), 使反向电流剧增, 呈现击穿现象。此种击穿机理为齐纳所发现, 故得其名。

由上不难看出，齐纳击穿电压 V_B 值较低。对硅PN结来说，通常击穿电压在6V以下的多属齐纳击穿；而雪崩击穿一般发生在掺杂浓度较低的PN结中，且其 V_B 值较高。

雪崩击穿和齐纳击穿统称为电击穿。在发生击穿后，如果功耗不大，温度不高，PN结就不会损坏（当反向电压降低后，PN结仍可恢复原来的状态），即电击穿的过程是可逆的。

3. 热击穿

PN结的功耗是结电压与流过结的电流之乘积。当PN结击穿时，如果不采取限流措施，则因击穿时电流的增大使功耗很大，结温就较高，从而本征激发加剧，促使电流增大，这将使结温进一步升高。在散热不良的情况下，上述连锁反应将引起反向电流剧增，导致PN结过热而击穿，这就是热击穿。热击穿发生后，PN结往往被烧毁而不能恢复工作，即热击穿的过程是不可逆的。

四、PN结电容

电容效应表现为：伴随着外加电压的增、减，有电荷的充、放现象。PN结也有这种特性，说明它具有电容效应。根据形成原理的不同，可分为两类。

1. 势垒电容 C_B

PN结势垒区中的空间电荷量是随外加电压而变化的。当外加正向电压增高时，更多的P区空穴及N区电子进入阻挡层，分别和其中的负离子、正离子“中和”，相当于电源向电容充电。反之，当正向电压减低时，将有一部分空穴和电子离开阻挡层，相当于电容向电源放电。由于这个电容是靠势垒区宽度随外加电压变化而产生的，故称之为势垒电容或阻挡层电容，用 C_B 表示。

如果将载流子很少（高P值）的势垒区看作介质，而两侧载流子很多（低P值）的P区和N区看作金属极板，则 C_B 相当于平行板电容器。可以证明， C_B 的大小与PN结面积成正比，而与势垒区宽度成反比。

但是，势垒电容和普通电容又有本质的不同。普通电容的容量与外加电压无关，称之为线性电容。PN结势垒电容的大小却是随外加电压的不同而改变的，称之为非线性电容。当正向电压增高时，势垒区变窄，电容增大；反向电压增高时，势垒区变宽，电容减小。 C_B 随外加反向电压的降低（指绝对值）而增大，可以从几皮法变到几十皮法，其规律如图1-14所示。利用 C_B 随外加电压变化的特性可制成变容二极管。

2. 扩散电容 C_D

正偏下的PN结，除势垒电容 C_B 外，还有扩散电容 C_D 。 C_D 是由扩散运动中载流子的贮

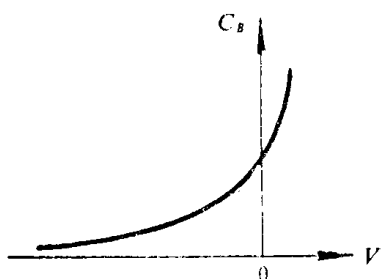


图1-14 势垒电容 C_B 与外加电压的关系

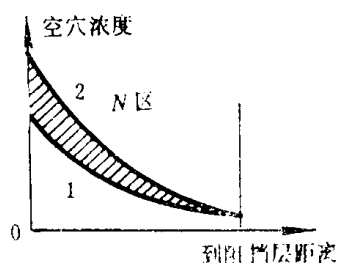


图1-15 正向电压增加时，N区非平衡少数子浓度的变化

存作用而形成的。

在正向电压作用下， P 区空穴扩散到 N 区，称为“向 N 区注入空穴”。注入的空穴成为 N 区中非平衡少数（“非平衡”是区别于原平衡时由本征激发产生的少数），其浓度分布如图1-15中曲线1所示。 N 区出现多余的正电荷，破坏了那里的电中性，从而出现电场。此电场便将 N 区的电子吸引过去，直到电子电荷与空穴电荷分布相同，恢复电中性为止。上述过程速度极快，可认为是立即完成的。

当正向电压变化时，注入到 N 区的空穴数目变化， N 区中的电子数目也同样变化。当电压增高时， N 区空穴浓度变为曲线2，所增多的空穴是由电源正端提供的。这时，必然从电源负端引入同样多的电子，才能保持电中性。同理，向 P 区注入电子的增多，是由电源负端提供的。而当 P 区出现增多的电子时，电源正端也必将送入同样多的空穴。这就相当于阻挡层两侧贮存了正、负电荷。反之，当电压减低时，将有电荷泄放给电源。上述充、放电现象可等效为 PN 结并联了一个电容，这就是扩散电容 C_D 。

扩散电容的大小与正向电流成正比。电流增大时，阻挡层两侧贮存的电荷增多，于是同样电压变化量引起的电荷变化量增大，即扩散电容增加。因此，正向偏置时， C_D 很大，可为几百甚至几万皮法；而在反向偏置时，由于反向电流很小， C_D 也就很小。可见， C_D 同样是一种非线性电容。

由上述讨论可知， PN 结电容包括势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。正向偏置时， $C_D \gg C_B$ ， PN 结电容主要由 C_D 决定；反向偏置时， $C_B \gg C_D$ ， PN 结电容主要由 C_B 决定。

§1-3 晶体二极管

最简单的半导体器件是晶体二极管（简称二极管），同时它也是最基本的非线性元件，在各种电子线路中有着广泛的应用。理解它与线性元件（例如普通电阻）之间的本质区别，对于学习比较复杂的电子器件和电子线路是十分重要的。下面先对二极管作一般介绍，然后着重说明它的特性和参量。

一、二极管的类型与结构

二极管是由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳而制成。可按制造 PN 结的半导体材料分为硅管和锗管；也可按 PN 结的结构型式分为面结合型和点接触型；还可按用途分为整流、稳压、检波、开关及变容二极管等。图1-16画出了几种常用二极管的外形。

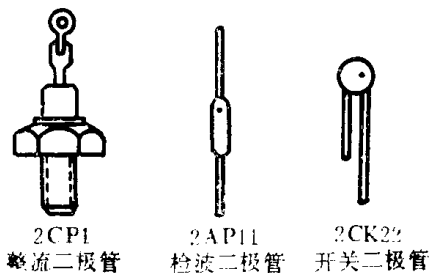


图1-16 几种二极管的外形

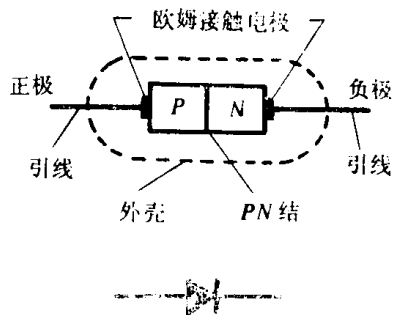


图1-17 二极管的结构示意图及电路符号