

电 子 电 路

(上 册)

南 京 工 学 院

马恒龙 马凤祥 邵长菁 宋焕明 编

國防工業出版社

内 容 简 介

本书共分三册。上、中册为晶体管电路部分，包括晶体管工作原理与特性，各种放大电路，线性集成电路，振荡、调制、解调与变频电路，电源和脉冲电路，数字集成电路基础等内容；下册为电子管电路部分，包括电子管的工作原理及特性，各种放大电路、振荡电路、调制电路等内容，着重讨论高频大功率电路。

本书可作为高等工科院校电真空器件专业和电子类非整机专业的教材，也可供有关人员自学与参考。

电 子 电 路 (上 册)

南 京 工 学 院

马恒龙 马凤祥 邵长菁 宋焕明 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 12³/₈ 285 千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：00,001—22,000册

统一书号：15034·1935 定价：1.30元

前 言

本书是全国高等院校工科电子类电真空器件专业统编教材之一,也可以作为电子器件、电子物理等非整机专业学习电子电路课程的教材和科技人员的参考书。讲授本书的目的,是培养学生掌握一定的电子电路基础知识,对一般的电子电路能进行分析计算并具有必要的实践技能。

在本书编写过程中,我们力求运用辩证唯物观点阐明电子电路的基本规律,讲清楚基本内容,又有较广的知识面,并注意理论联系实际,以培养学生独立思考和分析、解决问题的能力。本书的选材力求适应当前现实和发展的需要,删繁就简,适当地引进了一些新内容。

全书共分三册。上、中册(130学时)为晶体管电路,由南京工学院电子技术教研组编写,下册(50学时)为电子管电路,由西安交通大学电真空器件与技术教研室唐立森编写。南京工学院参加编写的人员有:马恒龙(第五、七章)、马凤祥(绪论、第三、九章)、邵长菁(第二、六、八、十章)、宋焕明(第一、四、十一章)。全书由成都电讯工程学院裘明信主审,成都电讯工程学院陈汝全、吕祥珍、浙江大学王一鸣参加了审稿工作。南京工学院李仕澂、西安交通大学绘图组参加了本书的制图工作。在编写过程中,兄弟院校给了大力的支持和帮助,对此深表感谢。

为了便于读者单独选用电子管电路部分的内容,本书下册在编写时保留了适当的独立性。

由于我们水平有限,加之编写时间仓促,难免有不少缺点和错误,衷心希望使用本书的师生和读者,提出宝贵意见。

编 者 1979.2

目 录

绪论	1	2.2.2 直流通道与交流通道	37
第一章 晶体管的工作原理与特性	4	§ 2.3 放大器的分析方法	38
§ 1.1 半导体	4	2.3.1 图解法	38
1.1.1 本征半导体	5	2.3.2 等效电路法	45
1.1.2 N型半导体	6	§ 2.4 晶体管工作点的稳定	47
1.1.3 P型半导体	7	2.4.1 温度对工作点的影响	47
1.1.4 半导体中的电流	8	2.4.2 稳定工作点的措施	49
§ 1.2 PN 结	9	2.4.3 偏置电路的计算	50
1.2.1 PN 结的形成与势垒区	9	§ 2.5 单级放大电路	51
1.2.2 外加电压对 PN 结的影响	10	2.5.1 输入电阻与输出电阻	51
1.2.3 PN 结电容	12	2.5.2 增益计算	54
1.2.4 PN 结的击穿	13	§ 2.6 多级放大电路	55
§ 1.3 晶体二极管	14	2.6.1 级间耦合方式	56
1.3.1 二极管的结构与分类	14	2.6.2 增益计算	57
1.3.2 二极管的特性	15	2.6.3 频率特性	58
1.3.3 二极管的交流等效电路	16	§ 2.7 场效应管放大电路	69
1.3.4 二极管的参量	16	2.7.1 场效应管的结构及其工作原理	69
§ 1.4 晶体三极管	17	2.7.2 特性和参数	72
1.4.1 晶体管的结构	17	2.7.3 场效应管放大电路	78
1.4.2 晶体管中电流的传输过程	17	§ 2.8 放大器的噪声	83
1.4.3 晶体管基区非平衡少数载流子的分布	19	2.8.1 表征噪声的主要参数	83
1.4.4 晶体管的放大作用	20	2.8.2 噪声的来源	84
1.4.5 晶体管的共发射极运用	21	§ 2.9 放大器的指标和类型	87
1.4.6 晶体管的特性曲线	22	2.9.1 放大器的主要指标	87
1.4.7 晶体管的参量	25	2.9.2 放大器的类型	88
§ 1.5 晶体管的 h 参数及其等效电路	27	习题	90
1.5.1 晶体管的 h 参数	27	第三章 反馈放大电路	95
1.5.2 h 参数等效电路	29	§ 3.1 反馈概述	95
1.5.3 h 参数与特性曲线的关系	30	3.1.1 关于反馈的概念	95
习题	32	3.1.2 反馈过程的分析	95
第二章 基本放大电路	33	3.1.3 反馈深度	96
§ 2.1 放大器的功用	33	3.1.4 反馈的基本形式	96
2.1.1 功用	33	§ 3.2 负反馈对放大器性能的影响	97
2.1.2 增益表示法	33	3.2.1 负反馈对增益的影响	97
§ 2.2 放大器的基本单元	36	3.2.2 负反馈对增益稳定性的影响	98
2.2.1 共发射放大电路	36	3.2.3 负反馈对频率特性的影响	98
		3.2.4 负反馈对非线性失真的影响	99
		3.2.5 负反馈对噪声的影响	100

3.2.6 负反馈对输入阻抗的影响	100	§ 4.6 集成运算放大器举例	151
3.2.7 负反馈对输出阻抗的影响	101	4.6.1 8FC1集成运算放大器	151
§ 3.3 负反馈放大电路	103	4.6.2 8FC2运算放大器	154
3.3.1 串联电流负反馈电路	103	4.6.3 5G24运算放大器	155
3.3.2 射极输出器	106	§ 4.7 集成运算放大器的应用	157
3.3.3 并联电压负反馈电路	109	4.7.1 调谐放大器	157
3.3.4 并联电流负反馈电路	111	4.7.2 正弦波振荡器	158
3.3.5 多级负反馈电路	112	4.7.3 标度加法器	158
§ 3.4 负反馈放大电路分析方法的讨论	117	4.7.4 可变恒压源	158
§ 3.5 低频选频放大器	121	4.7.5 有源滤波器	159
§ 3.6 DA-1 型晶体管毫伏表的放大电路	124	4.7.6 多谐振荡器	159
习题	125	4.7.7 线性检波器	160
		4.7.8 电压-数字转换电路	161
第四章 直流放大器与线性集成电路	128	习题	162
§ 4.1 直流放大器的特点	128	第五章 低频功率放大电路	163
4.1.1 级间耦合方式	129	§ 5.1 功率放大器概述	163
4.1.2 零点漂移和补偿电路	130	§ 5.2 甲类功率放大电路	164
§ 4.2 差分放大器	131	5.2.1 甲类功率放大电路的分析与运算	164
4.2.1 差分放大器的工作原理	131	5.2.2 甲类功率放大器的失真	168
4.2.2 差分放大器基本电路分析	133	§ 5.3 乙类推挽功率放大电路	172
§ 4.3 差分放大电路的改进	137	5.3.1 工作原理	172
4.3.1 用恒流源代替发射极电阻	137	5.3.2 乙类推挽功率放大器的分析与计算	174
4.3.2 加零点调整电路	137	5.3.3 乙类推挽功率放大器的失真	179
4.3.3 采用集成差分放大器	138	5.3.4 推动级电路	181
§ 4.4 集成差分放大器	138	5.3.5 功率放大管的散热	182
4.4.1 线性集成电路的特点	139	§ 5.4 无变压器推挽功率放大电路	184
4.4.2 恒流源与偏置电路	139	5.4.1 采用同极性晶体管的推挽电路	184
4.4.3 4E301 型差分放大器	140	5.4.2 互补对称式推挽功率放大电路	187
§ 4.5 集成运算放大器	142	5.4.3 复合互补对称式推挽功率放大电路	189
4.5.1 运算放大器的基本原理	142	§ 5.5 应用举例——JK-25 型晶体	
4.5.2 用运算放大器进行模拟运算	143	管扩音机	190
4.5.3 集成运算放大器的单元电路	145	习题	191
4.5.4 同相输入负反馈放大器	150		

绪 论

《电子电路》的研究对象，是包含有电子器件的各种电路。学习本课程的目的，主要是了解各种电子电路的运用情况和它们的性能，为进行生产斗争和科学实验提供有效的技术方法。同时，根据电路运用条件对电子器件提出的参量要求，给电子器件的设计、制造和改进提供技术依据。

通过本课程的学习，要求对一些基本的电子电路有分析、选择和运用的能力，对某些电路能进行简单的设计计算，并能正确地使用生产和科研工作中常用的电子仪器设备，为解决学习和工作中遇到的问题打下良好的基础。

电子器件与电子电路是电子学的两大分支。它们之间相辅相成，在发展过程中互相促进。各类电子器件的发明，丰富了电子电路的功能和应用范围；电子电路在实际使用中对功能指标的需求，又推动了这些器件的改进和创新。

作为电路元件使用，电子器件的重要特征是它的非线性性质。电子器件配合其它电路元件，既可以组成有源线性网络，对电信号进行放大（低频、视频、直流）；也可以组成非线性网络，对电信号进行频率变换（整流、调制、检波、变频）和波形变换（限幅、箝位）；还可以用来产生一定频率和波形的周期性电信号（正弦波振荡、多谐振荡、间歇振荡、锯齿波形成），或者作为达到某一目的的控制电信号的开关（双稳触发电路、单稳触发电路）。就电子器件的运用状态而论，所有上述作用，可以归纳为线性运用（线性放大电路）、非线性运用（非线性频率变换电路）和强非线性运用（脉冲电路）三大类。

电子器件和电子电路还可以通过各种换能器把其它非电性物理量转变为电信号。可以说，几乎一切物理量的变化、控制和量测，都是有可能直接或间接地借助于电子电路来实现的。

作为一种技术措施，电子电路的主要特点是反应迅速、灵敏度高和控制方便，并有可能获得很高的精确度。电子电路近似于完善的无惯性机构，在输入端加上一个信号，输出端就能立即出现相应的反应。电子电路能在极微弱的信号电平下工作，对电压的灵敏度可达 10^{-10} 伏，对电流的灵敏度可达 10^{-17} 安，对功率的灵敏度可达 10^{-17} 瓦左右。应用电子电路，可以很容易地用微小的信号控制巨大的功率；或者用一系列简单的信号，使复杂的机器按照人们的意图准确地运行。以电子电路作为测量手段，可以使长度、时间、温度等基本物理量的量测达到很高的精确度；例如长度的相对误差可准确到几十万分之一，时间误差可在几十年内不超过一秒，温度量测能准确到千分之一度左右。此外，还可实现其它技术措施所不能达到的目的。由于具有这些卓越的性能特点，电子电路的发展异常迅速，从开始供实际应用到现在，不过七十几年的时间，就已经发展成一门先进的科学技术——电子技术，和其它历史要悠久得多的工程技术（如土木工程、机械工程、电机工程等）并驾齐驱，广泛应用于科学研究、军事和国民经济的各个部门。

无线电通信就广义而言，包括电报、电话、传真、广播、电视、雷达、导航等，是电

子电路最早的、迄今为止仍然是最主要的应用领域。

从本世纪四十年代中叶开始,电子电路的应用迅速扩展到无线电通信以外的领域。

在工业上,已被广泛应用于生产过程的调整、控制,和原料、成品的检验测定工作,成为实现生产过程自动化的一种有力的技术措施。应用电子电路的反馈作用,可以将生产过程中的温度、湿度、压力、速度等物理量自动地调整到所需的额定值,并且达到手工操作所不能及的精确程度。自动程序控制机床是用电子电路控制生产过程的典型例子之一,它可以自动进行复杂的规定加工工序,中途无需人工操作。利用电子电路,可以借电信号来远距离操纵机器设备的启动、运转和停机。电子检测仪器不仅可以精密测定原材料的物理尺寸、机械性能和电磁属性,还可以检查出部件的内部缺陷。电子电路在工业上应用的另一分支是电能转换,提供各种大小功率的直流电能和产生具有特殊性能的动力源——高频电能。后者可供加热金属与非金属之用,广泛应用于金属的冶炼和金属部件表面的淬火,以及一些产品加工的快速干燥工艺。此外,许多保障人身和设备安全的技术措施,也经常采用电子电路作为控制手段。

电子电路在医学上的应用愈来愈广。许多生理和病理现象,诸如人体组织各部分(大脑、心脏、肌肉等)的生物电流,体液的生化成分,血球细胞的数量,听觉器官的功能等等,都可用电子分析诊断仪器迅速检测出来,为诊断治疗疾病提供可靠的依据。目前已广泛普及的各种电疗(直流、脉冲、低频、高频)机、超声波诊断治疗机、X射线机等医疗器械,它们的核心部分都是由电子电路构成的。

在近代的科学实验研究中,电子电路已成为观察现象、测定数据、鉴别差异、检查功能、分析反应和记录过程时所不可或缺的工具。不论是宏观世界如天文、气象的观测和宇宙空间的探索方面,或者是微观结构如分子、原子的能量与结构研究方面,都要借助于电子仪器设备进行工作。像射电望远镜、气象雷达、质谱仪、电子显微镜、回旋加速器、电子计算机以及各种定时、定量、随机电子控制设备,就是其中突出的例子。不仅如此,由于这类电子仪器的卓越性能,还产生和发展了不少新颖的独立学科。

电子电路在军事方面的应用,更是日新月异。事实上,电子电路在其它领域的一切应用技术,几乎都可以服务于军事上的需要,而电子技术装备的使用,本身就是国防现代化的标志。

比起其它国民经济部门来,电子电路在农业上的应用是较薄弱的方面。目前,土壤物理化学条件的测定,气候变化的预报,植物生理的研究,病虫害的防治,种子的选择与改良,农产品的分类和加工等工作,已有许多应用了电子仪器。从发展农业技术的巨大潜力来看,电子电路在这方面的应用具有非常广阔的前景。

对于电真空器件学科来说,无论是生产过程中使用的技术装备,还是进行专业学科研究的检测仪器,更是离不开电子电路。例如量测电子器件内部真空度的电离真空计,清除电真空器件内部零件吸附气体的高频电炉,供一些精细部件清洗、焊接、老炼用的专用设备,测定各种电子器件参量和特性的测试台,都要电子电路参与构成。电子器件的各种内部物理过程,如电子发射、电子运动、电场分布、电离现象等,也都要利用各种电子仪器进行分析研究。

由于电子电路的应用如此广泛,发展又如此迅速,结合其它科学技术和电器、机械装

置,许多应用领域都已形成专门的学科。但是就电子器件运用状态来看,仍然不外乎线性、非线性和强非线性三大类;而分析各种电子设备的基本单元电路,主要也不过是放大、振荡、调制、检波、变频、整流、限幅、箝位、触发等几种。就是依靠这些单元电路的不同组合,才构成千变万化的电子设备。

在本课程中,将着重对这些单元电路的电路结构、工作原理、性能指标分别加以阐述和分析,为以后的学习与应用打下良好的基础。这些单元电路的组合运用,也将举出一部分实际例子。有关本课程在工程实际中使用的一些基本技能,将通过实践性环节来进行教学。这样,在电子电路的应用方面,基本上可以适应专业工作的需要。

电子电路中的核心元件是电子器件,因此电子电路可分为晶体管电路和电子管电路两大类。但它们的运行情况彼此有许多相似之处。按近年来实际应用的发展趋势,在小功率电路中多采用晶体管,一部分已发展成为管路结合的集成电路。在高频大功率电路中,电子管电路仍占有重要地位。因此本书内容顺序分为晶体管电路和电子管电路两大部分。每一部分都从元件性能开始(第一章、第十二章)。对于低频放大电路(第二、三、四、五章)、高频小功率放大电路(第六章)、振荡电路(第七章)、频率变换电路(第八章)、电源电路(第九章)和脉冲电路(第十章),以晶体管分立电路为主加以论述,同时还安排了一定内容的线性集成电路(在第四章中)和数字集成电路(第十一章)。电子管电路部分着重讲述高频大功率电路(第十四、十五、十六章)。低频电路(第十三章)则根据电子管的特点,适当采取与晶体管电路对比的方式讲述。

第一章 晶体管的工作原理与特性

在晶体管电路中，晶体管是一个关键的元件。所以，学习电路首先要了解晶体管的工作原理，晶体管中发生的物理过程以及这些过程和外部电路的关系。在这个基础上，对各种电路的工作原理才能融会贯通，才能更正确地选择和合理地使用晶体管。

晶体管的产生是和人们对固体和半导体的研究紧密联系的。所以，本章首先介绍半导体的性质，并在此基础上介绍 PN 结。PN 结是构成晶体管和其他半导体器件的基本单元。最后研究晶体二极管和晶体管的工作原理、特性和参量。

§ 1.1 半 导 体

对于世界上形形色色的物质，如果按照它们的导电性能加以分类，则可分为导体、半导体和绝缘体。导体的电阻率很小，约为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 欧姆·厘米，并且是正温度系数，即其电阻率随着温度的升高而增加。如金、银、铜等金属都是良导体。在一般良导体的两端，只要加上不太大的电压，即可产生很大的电流。绝缘体或称电绝缘体，由它的导电能力很差而得名。绝缘体的电阻率很高，约在 10^8 欧姆·厘米以上，是负的温度系数。在绝缘体上，即使加很大的电压，也很难观察到显著的电流。如陶瓷、云母、橡胶等都是很好的绝缘体。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质就是半导体。如锗、硅、硒及大多数金属的氧化物（如氧化铜等）都是半导体。半导体的独特性能不在于它的电阻率大小，而主要是由于它的电阻率可以因某些因素而产生很显著的变化。这些因素主要是温度、杂质和光照。

一、温度

半导体的电阻率随着温度的上升而明显下降（负温度系数）。例如锗，当温度从 20°C 上升到 30°C 时，它的电阻率将下降一半以上。利用半导体的这种特性，我们很容易制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。

二、杂质

半导体的电阻率受杂质影响很大，这一点和导体及绝缘体截然不同。在半导体中即使掺入极微量的杂质，就能使其电阻率大大降低。例如，在纯硅中加入百万分之一的硼，它的电阻率就从约 2×10^5 欧姆·厘米降到 0.4 欧姆·厘米左右。而在金属或绝缘体中，即使加入千分之一的杂质，对电阻率的影响也是微不足道的。我们利用了半导体的这一特点，通过各种工艺手段，控制半导体中杂质的数量和性质，从而制成了各种性能优异的半导体器件。

三、光照

半导体区别于导体和绝缘体的另一特点，是它的电阻率因光照不同而改变。光照愈强，电阻率愈低。利用半导体的这一性质，可以做成各种光敏元件，如光敏电阻、光导管等。

导体、半导体或绝缘体都是由分子和原子构成的，而原子则是由带正电的原子核和带负电的电子构成的。所以，物体导电能力的强弱，不决定于其中带电粒子的数量，而决定于可以自由移动的带电粒子的数量。在导体中，自由电子很多，它们以电子云或电子气的

形式，充满固体中原子的间隙。在没有外电场作用时，电子做杂乱无章的热运动，宏观上无电流通过。当有外电场作用时，自由电子按一定的方向移动而形成电流。在绝缘体中，几乎没有自由电子，所以不能导电。在半导体中，自由电荷的情况要复杂一些，下面仔细加以说明。

1.1.1 本征半导体

纯净的、不含有杂质的半导体称为本征半导体。在晶体管的制造中，最常用的半导体材料是硅和锗。它们都是四价元素。在硅或锗的原子中，最外层的电子数都是四个，称为价电子。它们的物理和化学性质主要由这四个价电子决定，内层电子则由于和原子核联系紧密，对硅或锗的性质影响较小。在一块完整的硅（或锗）晶体中，每一个硅原子的四个价电子，不仅围绕着自己的原子核运动，也和相邻的原子发生联系，也会出现在相邻原子的外层轨道上。这样，每个原子的四个价电子就分别为相邻的四个原子所共有，所以看起来每一个硅原子的外层轨道上都有八个电子。这种结构称为共价键（图 1-1-1）。共价键是很稳定的。一般情况下，共价键中的电子不能参与导电。所以本征半导体的导电性能是很差的。

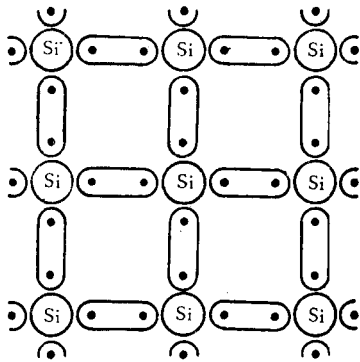


图 1-1-1 共价键结构的平面示意图

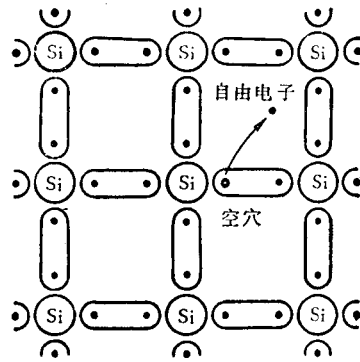


图 1-1-2 一个共价键破裂，产生一个电子空穴对

在绝对零度时，价电子都不能自由移动。这时半导体像绝缘体一样不能导电。但是，共价键结构又不像绝缘体的结构那样牢固，当温度升高时，就会使一些共价键破裂。这是由于电子在热运动中发生互相碰撞以及与晶格原子的碰撞，在碰撞中，可能有少数电子获得较大的能量，而挣脱原子核对它的束缚，成为可以在晶体中自由运动的自由电子。一个共价键破裂后，产生一个自由电子，并在共价键上留下一个空位。这个空位可能被附近的价电子所填补。于是，空位又移到来填补的那个电子原来的位置上。所以这个空位也可以在晶体中移动，但它和自由电子的移动不同。空位是共价键中电子的缺少，相当于一个带正电荷的粒子。它的运动是由于价电子以相反的方向运动造成的。为了便于考虑它对半导体导电性能的影响，我们用一个带正电荷的粒子来代表它，称为空穴。可见，一个共价键破裂，就同时产生一个电子和一个空穴，称为电子空穴对（图 1-1-2）。在室温下，纯硅里大约每 4×10^{12} 个共价键中有一个破裂，产生一个电子空穴对。

在本征半导体中，自由电子（以下简称电子）的数量和空穴的数量相等。在外电场作用下，电子和空穴以相反的方向作有规则的运动而形成电流。所以在半导体中传导电流的

不仅是电子，还有带正电荷的空穴。电子和空穴统称为载流子。在本征半导体中，载流子的产生主要是热能引起的。随着温度的升高，载流子的数量就增多，半导体的导电能力提高，这就是半导体的电阻率温度系数为负的原因。

由于热运动使价电子挣脱共价键而产生载流子的过程，称为热激发或本征激发。单位体积内载流子的数量称为载流子浓度。如果用 n_i 和 p_i 分别表示本征半导体中电子和空穴的浓度，那么根据玻尔兹曼统计理论和量子理论的分析，可得如下关系式：

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

式中 A ——常数，为 4.82×10^{15} ；

T ——绝对温度；

k ——玻尔兹曼常数，为 1.38×10^{-23} 焦耳/K；

E_g ——材料的禁带宽度。在室温下，硅为 1.1 电子伏；锗为 0.72 电子伏。

在室温下 ($T = 300\text{K}$)， n_i (或 p_i) 的数值，硅为 $1.4 \times 10^{10}/\text{厘米}^3$ ；锗为 $2.5 \times 10^{13}/\text{厘米}^3$ 。由于硅的禁带宽度较大，本征激发产生的载流子浓度约比锗小三个数量级。反映到器件的特性上，在相同的温度下硅器件的漏电流要比锗器件小得多。

电子在热运动中由于碰撞而得到能量，产生一对电子空穴。同样，电子可能在碰撞中失去能量而落入空穴中，这一对载流子就同时消失了。这个载流子成对消失的过程，称为载流子的复合。在一定温度下，半导体中时刻都有载流子产生，同时也在复合。单位时间内复合的电子空穴对数称为载流子的复合率。在本征半导体中，复合率除了和温度有关外，还与载流子浓度有关。载流子的浓度越高，产生复合的几率越大。载流子的产生率和复合率相等时，达到动平衡状态，载流子浓度便维持在某一稳定水平上，这就是式 1-1-1 所表示的结果。

除热激发之外，光照也可以使电子获得足够的能量，打破共价键而产生电子空穴对。除光敏器件外，一般晶体管为了避免光照的影响都把管芯封装在不透光的外壳内。

1.1.2 N型半导体

在本征半导体中，电子和空穴的数量相等，并与温度有关，单是这一点实用价值并不大。如果在半导体中加入少量杂质，情况就不同了。杂质可以改变半导体中载流子的浓度，从而达到人为控制半导体电阻率的目的。

在硅单晶中掺入少量五价元素，如磷（或者砷、锑）。因为磷原子的最外层电子轨道上有五个价电子，其中四个和周围的硅原子构成共价键，尚有一个电子多余。这个多余的电子受原子核的束缚十分微弱。在室温下，这个电子所获得的能量就足以摆脱磷原子核对它的束缚，成为一个自由电子。几乎每一个磷原子都能提供一个自由电子，故磷（或砷、锑等）称为施主杂质。磷原子失去了一个电子，本身便成为一个带正电的离子。它固定在晶格中，不能移动，共价键中的电子也不可能来填补它。所以没有空穴产生。在掺有施主杂质的半导体中，导电电子的数量远远多于空穴的数量，称为电子型半导体，或N型半导体（图 1-1-3）。

在N型半导体中，电子是传递电流的主要带电粒子，称为多数载流子；空穴称为少数载流子，是由热激发产生的。但是由于电子的增多，空穴遇到电子而被复合的几率增大，

所以空穴的浓度远小于相同温度下本征半导体中的空穴浓度。

可以证明, 不管半导体中有无杂质存在, 电子和空穴这两种载流子浓度的乘积总保持一定的数值不变, 等于该温度下本征载流子浓度的平方。如果用 n_n 和 p_n 分别表示 N 型半导体中的电子浓度和空穴浓度, 则有如下关系:

$$n_n p_n = n_i^2 \quad (1-1-2)$$

以 N_D 表示 N 型半导体中施主杂质的浓度, 一般情况下它远远大于本征激发产生的电子浓度(即 $N_D \gg n_i$)。所以 N 型半导体的导电电子几乎都是由施主原子提供的, 可近似看作

$$n_n = N_D \quad (1-1-3)$$

故由式 (1-1-2) 可得少数载流子空穴的浓度为

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1-1-4)$$

因 $N_D \gg n_i$, 所以 $p_n \ll n_i$ 。这就是说, N 型半导体的空穴浓度比本征情况下的空穴浓度小得多。在室温下 ($T = 300\text{K}$), 本征硅中 $n_i = 1.4 \times 10^{10}/\text{厘米}^3$ 。硅的原子密度为 $5.2 \times 10^{22}/\text{厘米}^3$, 空穴浓度从 $1.4 \times 10^{10}/\text{厘米}^3$ 降低为 $2 \times 10^4/\text{厘米}^3$, 而总的自由载流子的浓度却提高了五个数量级以上, 这主要是施主提供的电子。结果硅的电阻率大大降低。

1.1.3 P 型半导体

如果在硅晶体中, 掺入少量的三价元素, 如硼, 则由于硼的价电子只有三个, 它和周围的硅原子形成共价键的时候, 就缺少一个电子。由于能量的关系, 硼原子很容易从邻近的共价键中夺取一个电子, 变成一个带负电的离子。而在失去电子的共价键中形成一个空穴。硼称为受主杂质。在这种掺有受主杂质的半导体中, 空穴是多数载流子, 它的数量远远大于自由电子的数量。这种半导体称做空穴型半导体或 P 型半导体 (图 1-1-4)。

受主杂质的浓度用 N_A 表示, 它一般都比本征情况下空穴的浓度大得多, 即 $N_A \gg p_i = n_i$ 。在室温下, 受主也是全部电离的。所以 P 型半导体的空穴浓度也可近似看作

$$p_p = N_A \quad (1-1-5)$$

和 N 型半导体一样, P 型半导体中载流子的浓度也满足乘积一定的关系, 即

$$n_p p_p = n_i^2 \quad (1-1-6)$$

其中 n_p 表示 P 型半导体中自由电子的浓度。由以上两式可得

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1-1-7)$$

以上结果表明, 在杂质半导体中参加传递电流的载流子主要是多数载流子。由于杂质

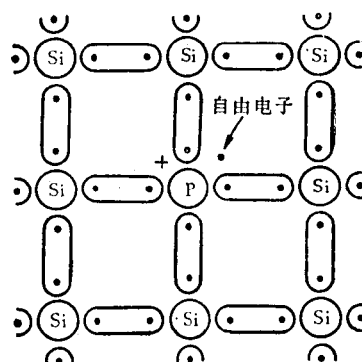


图1-1-3 N型半导体结构示意图

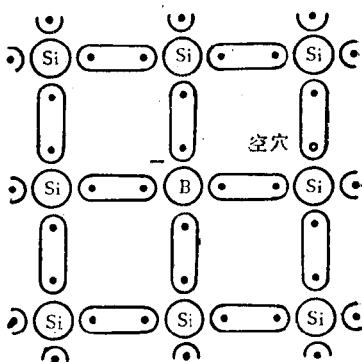


图1-1-4 P型半导体的原子结构示意图

原子在室温下全部电离，所以多数载流子的浓度与温度无关。而少数载流子数量极小，并随温度上升而增多。

在实际的半导体材料中，尽管纯度很高，也很难免有杂质存在，而且常常同时含有施主杂质和受主杂质。这时施主杂质和受主杂质对半导体导电性能的影响，就有互相抵消的趋势，称为杂质补偿。如果受主杂质占优势，就整体而言半导体仍为P型。例如，受主杂质的浓度为 $N_A = 1.1 \times 10^{16}/\text{厘米}^3$ ，施主杂质的浓度为 $N_D = 10^{15}/\text{厘米}^3$ ，则空穴的浓度为两者之差 $p_p = 10^{16}/\text{厘米}^3$ 。

在N型半导体中，虽然有很多自由电子，但施主原子带正电；在P型半导体中有较多的空穴，但受主原子带负电；所以整个半导体仍然是电中性的。

1.1.4 半导体中的电流

载流子在半导体中做定向运动就形成电流。载流子的定向运动可由两种原因引起，因而形成两种形式的电流，这就是漂移电流和扩散电流。

一、漂移电流

在一块半导体的两端加上一定的电压，半导体内便产生了电场。在这个电场的作用下，半导体内的导电电子和空穴就以相反的方向移动。载流子的有规则移动就形成了电流，称为漂移电流（图 1-1-5）。半导体中的漂移电流与金属中自由电子传导电流类似。但是在半导体中有两种载流子——电子和空穴，它们同时参加电流的传递。电子逆电场方向运动，空穴顺电场方向运动，由于它们的电荷性质相反，形成的电流方向是一致的。在本征半导体中，这两种载流子同时形成电流。而在杂质半导体中，漂移电流主要是多数载流子形成的，少数载流子的漂移电流则可忽略不计。

电流的大小是单位时间内通过半导体横截面的电荷量。它不仅和载流子的浓度、载流子所带的电荷量以及电场强度成正比，还和载流子的运动速度成正比。在单位电场强度下，载流子漂移的速度称为载流子的漂移迁移率。电子和空穴的迁移率是不同的，并和温度有关。在室温下，硅中电子的迁移率约为空穴迁移率的三倍。所以在本征半导体中，电子产生的漂移电流约为空穴漂移电流的三倍。

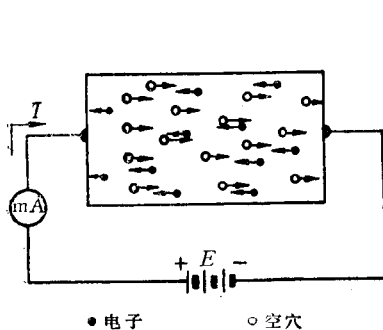


图1-1-5 半导体中的漂移电流

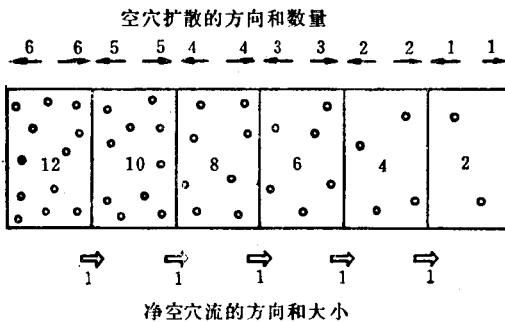


图1-1-6 说明扩散电流的一维模型

二、扩散电流

在半导体中，如果载流子分布不均匀，即使没有电场作用也会发生载流子的定向移动而形成电流，这就是扩散电流。扩散电流产生的过程可以用图 1-1-6 所表示的一维模型加

以说明。图中表示一块半导体，其中空穴的分布左右是不均匀的。我们可以把它分成很多小块，而认为各小块中空穴均匀分布。为了简单起见，我们分成六小块，小块中间的数字表示其中包含的空穴数。在一定的时间间隔内，由于热骚动，空穴将从每一个小方块中扩散出来。它们的运动是无规则的，所以向左右扩散的几率相等。图中上方的箭头和数字表示空穴扩散的方向和数量，左右相等。下面的箭头和数字表示通过每小块界面净空穴流的方向和数量。显然，由于浓度不均匀，或者说有浓度梯度存在，就产生了从左到右的流动。因为空穴是带正电的粒子，也就产生了从左到右的电流。如果小块内的空穴数都增加一倍，它们之间的差也就增加一倍，产生的从左到右的扩散电流也就增加一倍。这说明扩散电流的大小与浓度梯度成正比，而其方向是指向梯度减少的方向。

如果在一块半导体中，沿 x 方向空穴分布不均匀，其浓度梯度为 $\frac{dp}{dx}$ ，则由于扩散而产生的电流密度为

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (1-1-8)$$

其中 q 为空穴所带的电荷量； D_p 是比例常数，称为空穴的扩散系数，表示单位浓度梯度下空穴的扩散速度；负号表示电流密度的方向与浓度梯度增加的方向相反。

同样，由于电子的扩散而形成的电子扩散电流密度可用下式表示：

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-1-9)$$

式中 D_n 是电子的扩散系数； dn/dx 是电子的浓度梯度。

载流子的扩散系数与温度有关，又因它表示载流子在晶体中运动的难易程度，所以也和迁移率有关。在半导体中，电子的扩散系数大于空穴的扩散系数。故在相同的浓度梯度下，电子的扩散电流将大于空穴的扩散电流。

在常用的双极型晶体管中，少数载流子的扩散电流是很重要的，在场效应管中则是应用多数载流子的漂移电流。

§ 1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成与势垒区

简单地讲，PN 结就是在—块半导体上，P 型区域和 N 型区域的界面。可以设想，把—块 P 型半导体和—块 N 型半导体紧密地联接起来，形成一个整体，就构成了一个理想的突变结。因为在 P 型区域中有大量的空穴，N 区域中空穴很少，这就造成了空穴分布的不均匀，或者说有很大的浓度梯度。于是 P 型区的空穴就向 N 区扩散，形成扩散电流。空穴从 P 区到达 N 区后便和 N 区的电子复合消失。在界面附近的 P 区，由于失去了空穴而留下不能移动的受主杂质原子。这些杂质原子带负电，使这一部分 P 区失去原来的电中性，产生了负的空间电荷。同样，N 区的电子也向 P 区扩散，并在界面附近的 N 区中留下带正电的施主原子，因而产生了正的空间电荷(图 1-2-1(a))。在空间电荷区内几乎没有自由载流子，所以又叫做耗尽层，它的电阻率比 N 区和 P 区都要高得多。在空间电荷区中，一边是正电荷，另一边是负电荷，因而产生了一个静电场，称为内建电场，它的方向是从 N 区指向

P区。内建电场是由于载流子的扩散作用而产生的，它的漂移作用又反过来阻止载流子的扩散。当扩散作用和漂移作用互相平衡时，不再有净电流通过界面，并建立起一定宽度的空间电荷区(图1-2-1(b))。在平衡的PN结中，宏观上没有净电流通过，但微观上并不是静止的。P区仍有少量空穴不断地向N区扩散，N区也有少量电子向P区扩散。但由于内建电场的漂移作用，P区的电子和N区的空穴(少数载流子)却可以顺利地通过PN结，形成一个和扩散电流大小相等、方向相反的漂移电流。所以PN结的平衡状态，应该理解为动态平衡。

在P区的受主杂质浓度和N区的施主杂质浓度相同的情况下，界面两边的空间电荷区厚度也相同，这样的PN结，界面两边对称。在不对称的情况下，杂质浓度小的一边有较大的空间电荷区厚度。当两边的杂质浓度相差很多倍时，例如一个P⁺N结(+号表示重掺杂)，两边空间电荷区的总厚度基本上和杂质少的N区的空间电荷区厚度相等。普通的PN结，空间电荷区的厚度都在一微米以下。

由于P区带负电，使P区电势下降；N区带正电而电势升高。两区的电势差 V_D 称为PN结的势垒高度(图1-2-1(c))，它与杂质浓度及温度有关，可用下式表示：

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1-2-1)$$

锗PN结的势垒约为0.3伏，硅PN结的势垒约为0.7伏。势垒随着杂质的浓度增大而升高。随着温度的升高，由于 n_i 急剧增大而使势垒降低，大约温度每高一度降低2毫伏。

1.2.2 外加电压对PN结的影响

当外加电压作用于PN结时，它原来的平衡状态将被打破，而建立起新的平衡状态。下面分为两种情况来讨论。

一、外加正向电压的作用

如果一个电源 E 和一个PN结相联接，正极接P区，负极接N区，这就是正向联接(图1-2-2)。由于势垒区中自由载流子很少，电阻很大，电源电压绝大部分都降落在这里。而远离PN结的P区和N区中几乎没有压降。在正向联接情况下，电源 E 在势垒区产生的电场方向是由P区指向N区。它和内建电场的方向相反，削弱了内建电场，使空间电荷区变窄，降低了势垒的高度。这种情况有利于多数载流子的扩散作用，使更多的载流子越过势

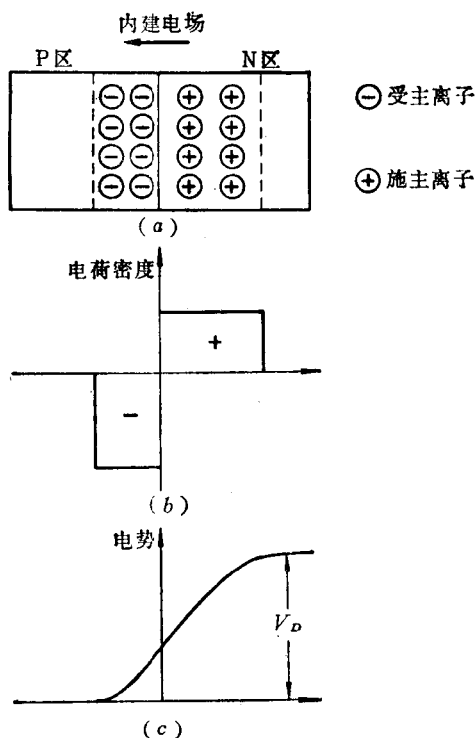


图1-2-1 PN结势垒区

垒区, 形成更大的扩散电流。势垒的降低虽然也削弱了少数载流子的漂移作用, 但由于少数载流子为数极少, 在被削弱的内建电场的加速下, 仍然全部都被拉走形成漂移电流。结果, 和没加电压时相比, 扩散电流大为增加, 而漂移电流基本不变。二者之差就是 PN 结的正向电流。当外加电压接近势垒高度时, 正向电流就迅速地上升。

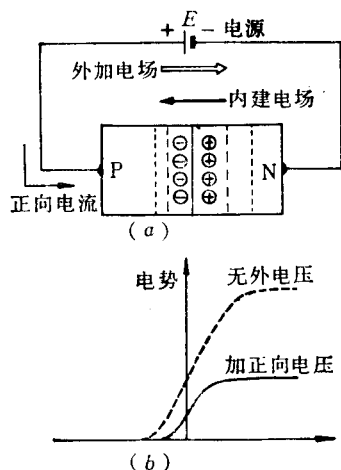


图1-2-2 外加正向电压的PN结

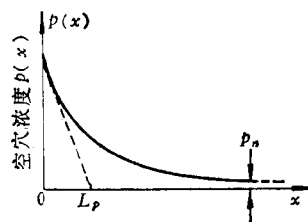


图1-2-3 在正向电压作用下N区空穴的分布

在正向电压作用下, P区的空穴进入N区成为N区的少数载流子; N区的电子进入P区成为P区的少数载流子, 这种情况称为少数载流子注入。注入到两个区域的少数载流子在边界附近积累起来, 使其浓度大于平衡浓度, 所以这部分载流子称为非平衡少数载流子。它们在浓度梯度作用下, 继续向前扩散, 并且不断地和多数载流子复合减少, 直到变为平衡浓度为止。可见, 扩散作用主要发生在靠近势垒区的一部分半导体内, 这个区域称为扩散区。复合的结果, 使P区空穴减少, N区电子减少, 电源以漂移电流的形式不断地向P区补充空穴(即吸收P区的电子), 向N区补充电子, 这就形成了外电路的正向电流。

为了进一步说明在扩散区内发生的过程, 我们以N区为例(P区的情况完全与此类似)。在正向电压作用下, P区向N区注入空穴(图1-2-3)。空穴进入N区后就改变了它原来的P区多数载流子的地位, 成为N区的非平衡少数载流子 $\ominus$ 。它们不断与多数载流子复合消失。复合的过程是需要时间的, 空穴在N区存在的平均时间 τ_p 称为空穴的寿命。寿命一般为几毫秒至几十个微秒。在势垒区的边缘($x=0$ 处), 空穴的浓度最高, 它们一边向前扩散, 一边与多数载流子复合, 直到降低为空穴的平衡浓度 p_n 时为止。空穴在N区前进的平均距离 L_p 称为空穴的扩散长度, 一般为几十至几百微米。在扩散区内空穴分布的不均匀, 将引起电子分布的同样不均匀。不过N区电子很多, 这一点不均匀是微不足道的。

二、外加反向电压的作用

如果电源的正极和N区联接, 负极和P区联接, 就给PN结加上了反向电压(图1-2-4)。这种情况和正向联接相反, 外电源在势垒区中形成的电场和内建电场方向相同, 使势垒升高, 空间电荷区变宽。由于扩散而越过势垒区的多数载流子将减少。反压升高到一定程度,

● 当N区有空穴注入时, $np = ni^2$ 的关系不再成立, 称为非平衡状态, 这部分空穴称为非平衡少数载流子。

扩散电流就没有了。这时通过势垒区的只有少数载流子的漂移电流，这就是PN结的反向电流。由于少数载流子数量极小，并在不太大的反向电压下就已全部被电场加速通过势垒区，所以一个理想的PN结在反向电压升高时，反向电流保持一个很小的数值不变，称为反向饱和电流。锗的PN结的反向饱和电流在室温下约为几个微安，而硅PN结只有毫微安的数量级。

由于少数载流子的浓度与温度密切相关，所以反向饱和电流随着温度的上升迅速增大。对于锗PN结，大约温度每上升 12°C 反向饱和电流增大一倍；而硅PN结，大约温度每上升 8°C 反向饱和电流增大一倍。

PN结在不大的正向电压作用下，即可产生很大的正向电流，所以正向工作的PN结呈现很低的电阻。PN结在很大的反向电压作用下，只有极小的反向饱和电流，所以反向工作的PN结呈现很高的电阻。这就是PN结的单向导电性，是一个很重要的性质。

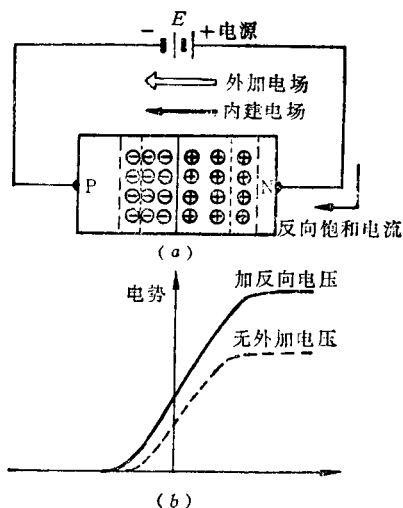


图1-2-4 外加反向电压的PN结

1.2.3 PN结电容

PN结不但正反向电阻不同，表现出特有的单向导电作用，而且有电容效应，对 不同频率的交流电压表现出不同的阻抗。

一、势垒电容

在PN结的势垒区中存在着空间电荷，这相当于一个充了电的平板电容器。当外加电压变化时，势垒区的宽度变化，空间电荷的多少也跟着变化，这相当于电容器的充放电作用。由于势垒区空间电荷随外加电压变化而产生的电容效应，称为PN结的势垒电容。

PN结的势垒电容表面上看来和普通电容相似，但是两者有本质的差别。普通电容的容量与外电压的大小无关，称为线性电容。而PN结势垒电容的大小却是随外加电压的不同而改变的，因此是一个非线性电容。在正向电压作用下，势垒区厚度减小，势垒电容增大。在反向电压作用下，势垒区厚度增加，势垒电容减小。势垒电容随着反向电压的减小而增大，大约从零点几微微法增加到几十微微法。势垒电容的存在，使PN结的反向阻抗随着工作频率的升高而下降，使它的单向导电作用，亦即整流特性变差，这是不好的。但是，我们可以利用PN结的非线性势垒电容做成各种变容二极管，广泛应用于现代电路中。图1-2-5表示B11型变容二极管的结电容 C_j 随反向电压 U_R 变化的情况。

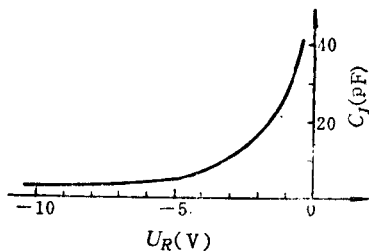


图1-2-5 B11型变容二极管 C_j-U_R 特性

二、扩散电容

当PN结工作在正向状态时，除了势垒电容之外还有另一种电容效应，这就是扩散电