



SHIYOU

中等专业学校教学用书

电工及电子学

(工业电子学部分)

何建业 主编



石油工业出版社

前 言

本书是根据石油天然气总公司人事教育部(原石油工业部教育司)1986年11月制订的中等专业学校“工业电子学教学大纲”(非电专业通用),由石油中专电工学科组组织编写的。

根据工科中专电工及工业电子学教学需要,石油系统各中专学校经过几年的共同努力,先后编写出版了石油系统工科中专“电工学教学大纲”、“工业电子学教学大纲”(非电专业多学时)和《电工与工业电子学实验》。从试用情况看,效果是良好的。石油天然气总公司所属各中专学校委托石油中专电工学科组组织编写《电工及电子学》一书,并决定由承德石油高等专科学校钱锡源、徐钟灵主编电工学部分,胜利石油学校何建业主编工业电子学部分。两部分单独成书,配套使用。

从生产现场反馈回来的信息表明,中专毕业生大多扎根于生产第一线,从事基层生产的技术工作和组织指挥工作。他们不但需要本专业所要求的专业知识和生产技术,还需要有基本的电工和电子技术知识。从这一实际需要出发,要求电工与工业电子学教学要有针对性。反映到教材上,就是要在对不同专业具有普遍适用性的同时,尽量体现石油及相近各专业的特殊需要。本书主要从教材内容的取舍和实际应用两个方面作了一些尝试。显然,要在有限的学时内详论电子技术的各个课题是不可能的。我们本着面广一点,学浅一点的设想,力求用通俗简练的文字,着重物理概念的定性分析。对同一类型的问题,叙述详略得当,便于学生举一反三,通过自学通达其义。在不割裂电子技术本身系统性的前提下,兼顾后续课程的需要。在讲清楚必要的基本知识的基础上,适当扩展新技术知识的内容。使学生尽可能了解电子技术的各主要领域。理论知识与应用相结合,便于学以致用,再配合以占总学时约四分之一的实验课,可能有利于培养应用型、技能型中等工程技术人才。

为了适应不同专业的需要,书中内容可分为三种类型:(1)基本内容,也就是各专业必学内容;(2)选学内容,即打“△”号部分。学科组约定:凡选学这部分内容的专业,应视为基本内容;(3)加深加宽内容,即打“*”号部分。主要是供少数学有余力的优秀学生自学,也可供少数有条件的专业选修。

下列同志参加了本书初稿的编写工作:新疆石油学校王润吾(第三章),华北石油学校张钺(第四章),重庆石油学校蒋福祥、陈宝才(第五章),胜利石油学校何建业(绪论、第一章、第二章)。

1987年6月在胜利石油学校召开的审稿会议进行了认真的审议。根据审议意见,由何建业完成全书修改定稿工作。

大庆石油学校刘慧新同志审阅和试作了全书习题并作了部分修改增补。胜利石油学校韩新俭、叶若宏在黄守诚高级讲师指导下绘制了全部插图。

本书由沈阳铁路机械学校钱光汉副教授主审。钱副教授认真进行了审阅,并提出许多中肯宝贵的意见。本书在定稿时充分考虑了主审意见。编者对钱副教授的精心指导深表感谢。

本书在编写过程中得到原石油部教育司,石油电工学科组各成员学校等单位和个人大力支持。在此,一并表示谢意。

由于编者水平有限,错误和不妥之处,敬请批评指正,以便修改提高。

编者

1988年6月于东营

目 录

结论	(1)
第一章 半导体二极管和三极管	(3)
第一节 半导体基本知识	(3)
一、本征半导体	(3)
二、掺杂半导体	(5)
三、PN 结的形成及其单向导电性	(6)
第二节 半导体二极管和硅稳压管	(8)
一、二极管的基本结构	(8)
二、二极管的伏安特性	(8)
三、二极管的主要参数	(9)
四、硅稳压管	(11)
第三节 半导体三极管	(12)
一、结构和命名	(12)
二、管内载流子运动过程和放大原理	(13)
三、伏安特性曲线	(15)
四、主要参数	(18)
第四节 二极管和三极管简易测试	(20)
一、二极管简易测试	(21)
二、三极管简易测试	(21)
第二章 晶体管放大电路	(26)
第一节 单管交流电压放大电路的组成和静态工作点	(27)
第二节 放大器的图解法	(29)
一、静态分析	(29)
二、动态分析	(32)
第三节 静态工作点的稳定和偏置电路	(38)
第四节 交流放大器的微变等效电路法	(42)
一、晶体管的简化等效电路	(43)
二、共射极电路的微变等效电路法	(44)
三、输入电阻和输出电阻	(44)
第五节 多级放大器	(48)
一、三种耦合电路	(49)
二、阻容耦合放大器的电压放大倍数	(51)
三、阻容耦合放大器的幅频特性	(53)
第六节 负反馈放大器	(53)
一、反馈的基本概念	(53)

二、反馈类型的判别和负反馈电路	(55)
三、射极输出器	(58)
四、负反馈对放大器工作性能的影响	(60)
第七节 正弦波振荡器	(62)
一、自激振荡原理	(63)
二、变压器反馈式振荡器	(64)
*三、三点式振荡器	(65)
*四、RC 振荡器	(68)
第八节 功率放大器	(69)
一、单管功率放大器	(70)
二、互补对称功率放大器(OTL)	(73)
*三、变压器耦合推挽功率放大器	(76)
第九节 运算放大器	(77)
一、差动式放大器	(77)
二、运算放大器及其运算功能	(81)
三、运算放大器在非线性电路中的应用	(85)
*四、线性集成组件简介	(86)
第十节 放大器应用举例	(88)
一、交流电压测量电路	(89)
二、F-2J 型直流放大器	(90)
第三章 整流滤波及稳压电路	(100)
第一节 概述	(100)
第二节 整流电路	(100)
一、单相半波整流电路	(100)
二、单相桥式整流电路	(102)
*三、三相整流电路	(104)
第三节 滤波电路	(107)
一、电容滤波	(107)
二、电感滤波	(109)
三、复式滤波	(110)
第四节 稳压电路	(111)
一、硅稳压管稳压电路	(111)
二、串联型晶体管稳压电路	(112)
三、集成稳压器	(113)
△第四章 晶闸管及其应用	(117)
第一节 晶闸管	(117)
一、晶闸管的工作状态	(117)
二、晶闸管的工作原理	(118)
三、晶闸管的伏安特性	(119)
四、晶闸管主要参数	(120)

第二节 晶闸管可控整流电路的主电路	(121)
一、带有电阻性负载的单相可控整流电路	(121)
二、带有电感性负载的可控整流电路	(123)
三、晶闸管的保护	(124)
第三节 晶闸管可控整流电路的触发电路	(127)
一、单结晶体管	(127)
二、单结晶体管自激振荡电路	(129)
三、单结晶体管触发电路	(130)
第四节 晶闸管应用举例	(132)
一、晶闸管交流调压	(132)
二、双向晶闸管负载跟随调压器	(133)
三、JJSBI 型时间继电器	(134)
第五章 脉冲数字电路	(138)
第一节 脉冲信号和晶体管开关作用	(138)
一、脉冲信号	(138)
二、晶体管开关作用	(139)
第二节 数的表示法	(141)
一、十进制数和二进制数	(141)
二、二进制数的四则运算	(142)
三、二进制数和十进制数的互换	(143)
四、八进制和十六进制数	(144)
第三节 逻辑门电路	(146)
一、基本门电路	(147)
二、复合门电路	(150)
第四节 TTL 集成与非门	(151)
一、TTL 与非门工作原理	(152)
二、TTL 与非门的主要参数	(153)
三、TTL 电路使用常识	(154)
第五节 基本逻辑运算和逻辑函数化简及转换	(155)
一、基本逻辑运算	(155)
二、逻辑函数化简和转换	(156)
第六节 触发器	(160)
一、基本 RS 触发器	(160)
二、同步 RS 触发器	(162)
三、主从 JK 触发器	(164)
四、D 触发器和 T 触发器的逻辑功能	(166)
第七节 计数器	(168)
一、异步二进制加法计数器	(168)
二、异步十进制加法计数器	(170)
三、异步减法计数器	(172)

四、同步计数器	(173)
第八节 寄存器	(175)
一、数码寄存器	(175)
二、移位寄存器	(176)
第九节 编码器、译码器和数码显示	(178)
一、编码和译码的概念	(178)
二、二进制编码器和二—十进制编码器	(178)
三、二进制译码器和二—十进制译码器	(180)
四、BCD—7 段译码器	(182)
五、数码管显示器	(183)
第十节 数模和模数转换	(185)
一、数模转换(D/A)	(186)
二、模数转换(A/D)	(187)
附录一 国产半导体器件型号命名方法	(196)
附录二 常用半导体器件的参数	(198)
附录三 集成电路型号命名	(203)
附录四 电阻器标称阻值系列	(204)
主要参考文献	(205)

绪 论

非电专业为什么要开设工业电子学课程呢?

大家知道,要建设有中国特色的社会主义,实现四个现代化,离不开自动化。所谓自动化,就是在生产过程中,能量的产生和转换,信息(信号)的传递和处理,能够按照人的意志自动完成。利用现代电子技术使生产过程自动化可以提高劳动生产率,提高产品质量,改善劳动条件,减轻劳动强度。从某种意义上说,自动化是实现四个现代化的重要标志。自动化的内容十分广泛,它包括生产、生活各个方面。从技术观点看,可以概括为信号的传递、控制、计算和检测,而这些都离不开电子技术。一个从事现代化生产的中级工程技术人员,如果不具备基本的电子技术知识是不可思议的。

建国以来,我国石油工业从无到有,获得长足发展,原油产量已达 1.3 亿多吨,成为重要的石油生产国之一。我国石油生产的现代化水平迅速提高。从石油地质勘探,钻井开发,原油场矿集输到储运炼制各个环节,已经采用现代化技术取代陈旧落后的生产方式。不言而喻,现代电子技术发挥着重要作用。一个现代化的采油控制系统,只要几个人就可以管理一个采油队才能完成的数十口油井的开采、集输、脱水、检测计量以及井场监督工作。一座自动化联合站应用电子控制系统可以迅速准确地获取有关油质、油量等数以百计的生产数据,并根据指令进行自动调节。例如某泵站加热炉的温度检测和调节,就可以应用电子电路实现自动控制。首先用热电偶和传感器把探测的实际炉温转换成电参数,如电压 u_r 。只要把它输入到一块预先校好的电子仪表内,便可直接读取加热炉的炉温度数据。如果把 u_r 输入比较放大装置,同时把反映规定温度的指令电压 u_g (即给定电压)也输入给该比较放大装置。当 u_r 与 u_g 相等时,表明实际炉温与规定炉温相符;当 u_r 大于或小于 u_g 时,表明实际炉温高于或低于规定炉温。于是比较放大装置输出一个差值电压信号 u_d ,其大小正比于 u_r 与 u_g 之差,其正负极性取决于 u_r 是大于还是小于 u_g 。把 u_d 输入至可控调压装置,然后控制执行机构调节炉温,使达到规定炉温。显然炉温的升降或保持是根据指令自动完成的。如果增加数字传输系统,便可把当时炉温传送到中央控制室。仅此一例足以说明电子技术在石油工业的生产、管理乃至指挥决策各个方面已经成为不可缺少的技术手段。因此,立志献身于石油工业的同学们——未来的石油工程技术人员应当掌握必要的电子技术知识。

工业电子学就是研究电子技术在工业生产中应用的一门科学。就课程内容而言,可分为电子器件和由电子器件与电路元件组成的电子电路两部分。当然,由于电子技术的飞速发展,某些传统的概念也随之更新。早期的电子器件主要是电子管、离子管、光电管等真空器件。40 年代末出现晶体管以后,由于它具有体积小,重量轻,功耗低,寿命长等优点,获得迅速发展。晶体管、晶闸管、场效应管等固体器件早已在大部分领域取代了电子管。本书舍弃真空器件而专讲固体器件就是这种生产状况的反映。50 年代后期间世的集成电路可以说是电子技术发展史上一次新的飞跃。它是把许多晶体管和电阻元件以及连接线制做在同一块半导体晶片上,组成具有一定功能的电路,称为集成组件。集成组件实际上是“管”与“路”的结合体。它既象晶体管(不过管脚多些),可以单独生产、使用、更换,又是集成化了的电子电路。最初一块晶片上只有几十个元、器件(称为集成度),属于小规模集成电路。此后集成度逐渐提高,相继制

成中规模、大规模集成电路。70年代后期,已经生产出集成度高达 10^5 以上的超大规模集成电路。其发展之迅速可见一斑。

集成电路与分立元件电路比较,在体积、重量、功耗、寿命以及价格诸方面都有显著改善,因而倍受人们青睐。其应用范围已扩大到航天、通讯、控制、计算机乃至日常文化生活各个领域。当然,这并不是说分立元、器件已无用武之地。不仅现今许多电子设备仍然大量采用晶体管等分立器件,即使在采用集成组件的电子系统中,也还需要配合应用一些分立元、器件以获得所需要的功能。所以,分立电路和集成电路以及它们的应用都是工业电子学的重要课题。

怎样学习工业电子学呢?

工业电子学内容十分丰富,要在有限的学时内详论各个课题是不可能的。这就要求我们要突出重点,处理好各部分之间的关系。

(1) 器件与电路的关系(即“管”、“路”关系)

“管”是基础,“路”是主体,“管”为“路”用。学习器件时着重掌握其外部特性;学习电路时着重定性分析其工作原理。

(2) 分立电路与集成电路的关系。

分立电路是基础,集成电路则代表着新技术的发展方向。本着“面向生产,面向未来”的原则,分立与集成并重。模拟电路部分以分立电路为主体;数字电路部分以集成电路为主体。

(3) 定性分析与定量分析的关系

以定性分析为主,定量分析为辅。熟练掌握各种分析方法,对典型电路能作较深入的定性分析;定量分析的目的在于帮助理解和巩固基本概念。在分析计算时不必片面追求计算值的精确程度,而要树立工程观点。工程技术人员从实际出发,往往把复杂问题加以简化,估算一个近似的结果,称为工程近似。由于元、器件参数的分散性,工程近似并不影响与实际电路的一致性。

(4) 理论知识与实践能力的关系

理论是指导,实践是目的,相辅相成,相得益彰。掌握基本理论知识,提高分析问题解决问题的能力。学以致用,通过实践加深对基本理论的理解和认识。在学习过程中,实践环节主要有:读图训练、分析计算练习,实验课教学以及开展第二课堂活动等。也要避免单纯兴趣观点而忽视基本理论的倾向。

工业电子学是一门实践性较强的技术基础课,特别强调实践的重要性。实验课是学习工业电子学最重要的实践环节,同学们务必重视。通过实验应当在以下几个方面受到训练。

(1) 实验操作技能训练

学会正确使用电子仪器仪表,按照要求连接实验线路,正确测读实验数据。

(2) 分析论证能力训练

学会分析实验现象,达到理论与实践的统一。既能验证理论又增加感性认识。

(3) 培养严谨的学风,训练撰写实验报告的能力。

科学问题来不得半点虚假。差之毫厘失之千里。严谨的学风,良好的写作能力是每一个工程技术人员必备的素质。

电子技术是现代技术百花园中一朵灿烂的鲜花,其内容丰富多彩,其前景灿烂光明。祖国四个现代化建设的各行各业,正在虚席以待,欢迎电子技术人才大显神通,为建设现代化的社会主义新中国建功立业。书山有路勤为径,学海无涯苦作舟。让我们用辛勤的劳动去探索工业电子学的奥秘,用顽强的拼搏去攀登知识的顶峰。让我们掌握丰富的知识技术献身于石油工业,献身于四化大业。

第一章 半导体二极管和三极管

用半导体材料制成的各种电子器件具有体积小,重量轻,耗电少,寿命长,工作可靠等优点,因而在现代技术的各个领域得到广泛应用。半导体技术也获得飞速发展。

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。本章从讨论半导体基本知识入手,着重介绍二极管和三极管,为后面打下基础。

第一节 半导体基本知识

什么是半导体呢?其导电能力介乎导体与绝缘体之间的物质称为半导体,如硅(Si)、锗(Ge)、硒(Se)以及一些金属氧化物和硫化物。

半导体具有独特的导电性能,在不同的条件下其导电能力有很大的差异。例如当环境温度升高或接收光照时,半导体材料的导电能力显著增强。尤其独特的是,若在纯净的半导体内掺入微量有用杂质,可使其导电能力提高几十万至几百万倍。利用这种特性可制成各种二极管、三极管、晶闸管、场效应管以及集成固体组件。

半导体为什么具有这些独特的导电性能呢?事物的性质总是由它的内因决定的。下面先从半导体内部结构谈起,看看它的导电机理是怎样的。

一、本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。当然,世界上绝对纯的物质是不存在的。利用现代技术,把半导体材料提纯到99.99999%以上,便堪称本征半导体了。

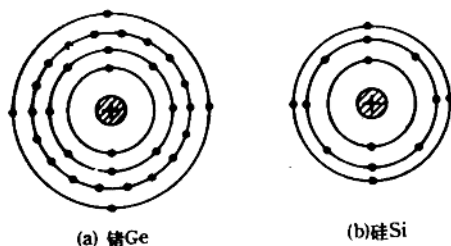


图 1-1 硅和锗的原子结构

半导体材料的原子结构比较特殊。它的外层价电子既不象导体材料的外层价电子那样极易脱离原子核的束缚形成大量的自由电子;也不象绝缘材料那样受原子核束缚很紧几乎没有自由电子。在常温下,本征半导体总有少量的价电子挣脱原子核的束缚而成为自由电子。以硅(Si)原子为例,其原子结构如图 1-1 所示。它是四价元素,有四个价电子。当提纯而形成硅单晶体时,各个原子按照一定的规律整齐排列。每个原子周围都有四个最近的原子,这四个原子的位置恰处于正四面体的四个顶角上,如图 1-2 所示。如果把它展为平面结构,则如图 1-3 所示。

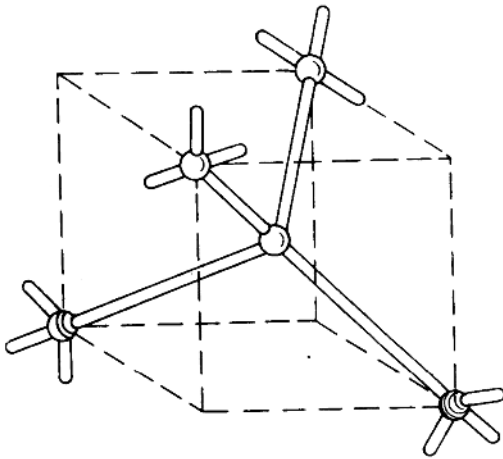


图 1-2 晶体中原子排列方式

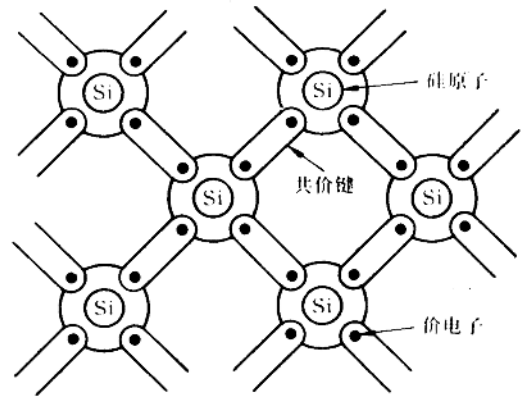


图 1-3 硅单晶中的共价键结构

由于原子的稳定状态要求最外层载满八个原子，因此在硅单晶体内，每一个原子都要从周围相邻的原子中争夺四个原子组成稳定结构。也就是说，每相邻的两个原子各拿出一个价电子来“共用”，结成共有电子对。电子对中的任何一个电子既围绕自身原子核运动，同时也出现在相邻原子所属的轨道上，形成电子的共有化运动。这种运动形成联系两个原子的束缚力，象链条那样把两个原子互相拉住，不易远离。我们把这两个共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键。在单晶体内，每个原子都要分别和相邻的四个原子组成四条共价键。共价键内的价电子不象绝缘体内的价电子所受的束缚力那么紧，在一定温度或一定光照下，热能或者光能转化为电子动能，价电子即可挣脱束缚而成为自由电子。温度愈高或光照愈强，自由电子愈多。

自由电子是带负电荷的粒子，在外电场的作用下逆电场方向定向运动而形成电流，叫做电子电流。自由电子叫做电子载流子。

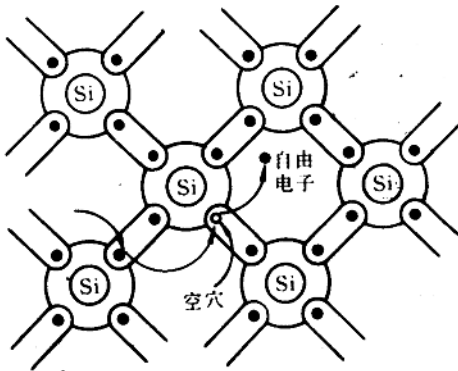


图 1-4 空穴和自由电子的形成

自由电子和带正电的空穴。在外电场作用下形成两种导电方式和两种电流，电子导电形成的电子电流和空穴导电形成的空穴电流。

电子空穴对在常温下总是成对地产生，又不断地复合（即自由电子填补空穴）。温度愈高或光照愈强，载流子数愈多，导电性愈好。当温度和光照一定时，载流子的产生与复合达到动态平衡，于是半导体内维持一定数量的载流子浓度（每立方厘米内所含有载流子数）。不过，在

在共有价电子挣脱束缚成为自由电子的同时，在共价键中留下一个空位，称为空穴。失去一个价电子的原子不再保持电中性而呈现带正电。我们可以想象为空穴带正电，如图 1-4 所示。显然，本征半导体内，自由电子与空穴必定同时成对地产生，称为电子空穴对。

在外电场作用下，共有价电子逆电场方向填补空穴，相当于空穴顺电场方向定向运动。由于把空穴视为带正电荷，因此其定向运动形成空穴电流。空穴也是载流子，称为空穴载流子。

可见，本征半导体内存在两种载流子，带负电的

常温下载流子浓度很低,其导电性能很差。

二、掺杂半导体

为了提高半导体的导电能力,可在半导体内掺入微量有用杂质(某种元素),制成掺杂半导体。由于掺入的杂质不同,掺杂半导体分为N型和P型两大类。

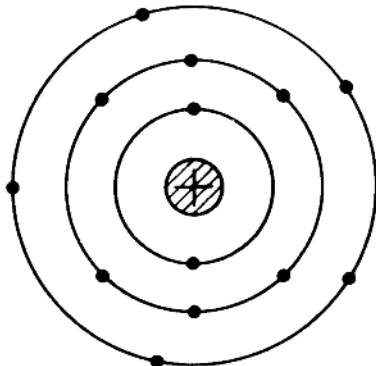


图 1-5 磷原子的结构

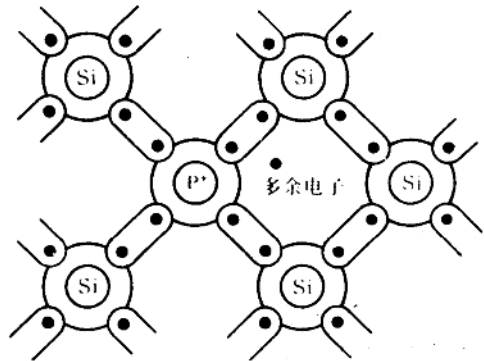


图 1-6 硅晶体中掺磷出现自由电子

在硅单晶体中掺入少量五价元素磷(P)时^①,由于每个磷原子最外层有五个价电子(图 1-5),在磷原子与相邻四个硅原子组成共价键结构时将多出一个价电子。这个多余价电子不受共价键束缚,在常温下即可成为自由电子(图 1-6)。同时,结合在共价键中的磷原子因为失去一个价电子而成为正离子。这种掺杂半导体内自由电子数大量增多并因而增加了电子与空穴的复合机会,使空穴数目减少。所以自由电子浓度远大于空穴浓度,称为多数载流子;空穴是少数载流子。自由电子导电是其主要导电方式,故称为电子型半导体或N型半导体。

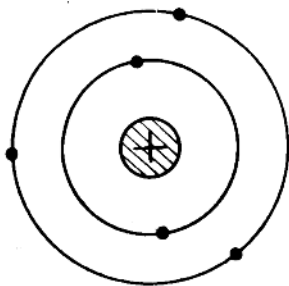


图 1-7 硼原子的结构

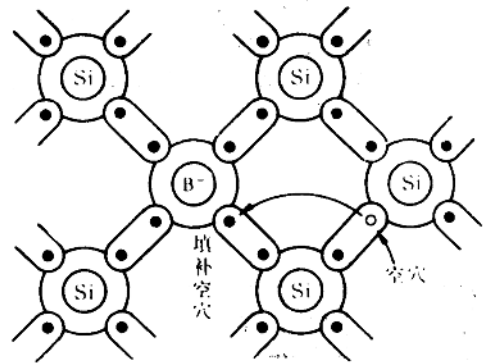


图 1-8 硅晶体中掺硼出现空穴

如果在硅单晶体中掺入少量三价元素硼(B),由于每个硼原子最外层只有三个价电子(图 1-7),它与相邻四个硅原子组成共价键时,将因缺少一个价电子而出现一个空位。此空位极易被邻近的价电子占据,从而在该价电子的原址上出现带正电的空穴。同时,硼原子因得到一个电子而成为负离子(图 1-8)。在这种半导体中,空穴浓度远大于自由电子浓度。所以空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。空穴导电是其主要导电方式,称为空穴型半导体或P

^① 由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少的多,整个硅晶体结构基本不变,只是在某些位置上的硅原子被磷原子取代。

型半导体。

应注意，N 型半导体和 P 型半导体仍然都是电中性的，因为整个晶体的正电荷量与负电荷量依然相等。

掺杂半导体的导电能力大为增强；但它还不能直接用来制造半导体器件。只有 N 型与 P 型结合成一体，形成 PN 结，才具备半导体所需要的各种特性。

三、PN 结的形成及其单向导电性

什么是 PN 结呢？PN 结是指在同一块本征半导体晶片上，用一定的工艺方法，分别制成相邻接的 N 型和 P 型半导体，其界面处形成一个特殊的薄层。

1. PN 结的形成

图 1-9(a) 所示是在一块晶片上制成的相邻接的 P 型和 N 型半导体。图中 \ominus 代表得到一个电子的三价硼离子，带负电； \oplus 代表失去一个电子的五价磷离子，带正电。由于 N 型半导体内电子浓度高，而 P 型半导体内空穴浓度高，因而在 N 区与 P 区界面两侧形成很大的载流子浓度差，N 区电子浓度远大于 P 区电子浓度，P 区空穴浓度远大于 N 区空穴浓度。因此，在交界面上形成多数载流子的扩散运动。所谓扩散运动，就是载流子由高浓度区向低浓度区渗透的热运动。也就是 N 区的电子及 P 区的空穴同时越过交界面向对方区域扩散。扩散的结果是：①在界面 N 区侧暴露出带正电的磷离子，P 区侧暴露出带负电的硼离子。这些不能移动的正负离子在界面处形成一个很薄的空间电荷区，就是 PN 结。②正负空间电荷在界面两侧形成一个电场，称为内电场，其方向自 N 区指向 P 区，如图 1-9(b) 所示。

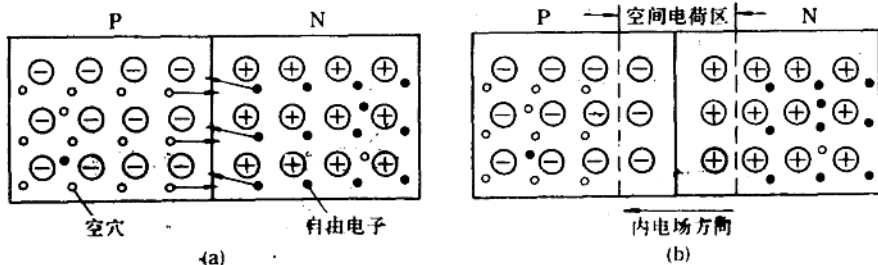


图 1-9 PN 结的形成

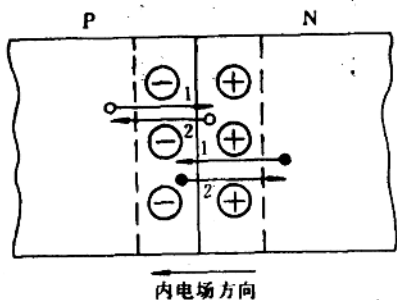


图 1-10 扩散运动与漂移运动达到动态平衡

- 1—多数载流子扩散运动的方向；
- 2—少数载流子漂移运动的方向

时达到动态平衡，如图 1-10 所示。此时通过 PN 结的电流为零。在一定温度下达到动态平

内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用（故空间电荷区又称阻挡层），同时又使游移到结区边缘的少数载流子（P 区的电子和 N 区的空穴）在内电场推动下越过交界面进入对方区域，称为少数载流子的漂移运动。

有趣的是多数载流子的扩散与少数载流子的漂移是互相联系又互相矛盾的。首先是多数载流子的扩散建立起空间电荷区即 PN 结。扩散越多，空间电荷区越宽，则内电场越强，扩散减弱。而内电场的增强又导致少数载流子发生漂移运动。漂移越多，空间电荷区越窄，内电场越弱，又使漂移减弱而有利于扩散。当同一时间内扩散与漂移的载流子数相等

平衡后,空间电荷区的厚度基本不变,PN 结处于相对稳定状态。常温下 PN 结厚度约在几到几十微米数量级,内电场电位差约为 0.2~0.3 伏(锗晶体)和 0.6~0.8 伏(硅晶体)。

另外,空间电荷区内的正负离子虽然带电,但是他们不能移动,不参与导电,所以 PN 结呈现很高的电阻率,称为高阻区。空间电荷区越厚,结电阻越大。又因为空间电荷区内多数载流子已全部扩散到对方区域并复合掉了,或者说耗尽了,所以 PN 结又称耗尽层。

2. PN 结的单向导电性

PN 结并不改变整个晶体的电中性。但当在 PN 结两端加正向电压时,将有较大的正向电流;外加反向电压时,其反向电流很小,这就是 PN 结的单向导电性。

所谓外加正向电压是指外电源的正极接 P 区,负极接 N 区(图 1-11)。由于 PN 结是高阻区,外加电压几乎全部降落在 PN 结上,形成外电场。外电场与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使扩散与漂移的动态平衡被破坏。于是多数载流子的扩散增强,形成较大的扩散电流(电流方向自 P 区流向 N 区)。因为扩散电流是由外加正向电压引起的,故称为正向电流。又因为扩散电流几乎全部由多数载流子组成(P 区的空穴和 N 区的电子),载流子供应充分,所以外加电压只要增加零点几伏,就能使正向电流增大很多。当外加电压一定时,依靠外电源不断地供给电荷而维持稳定的正向电流。

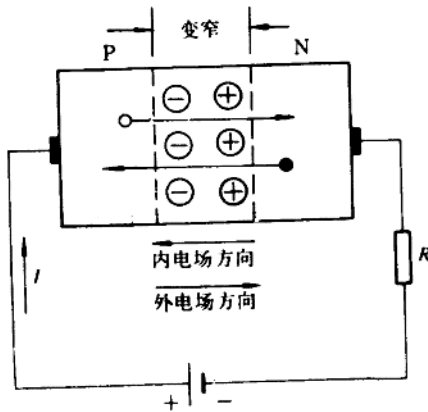


图 1-11 PN 结加正向电压

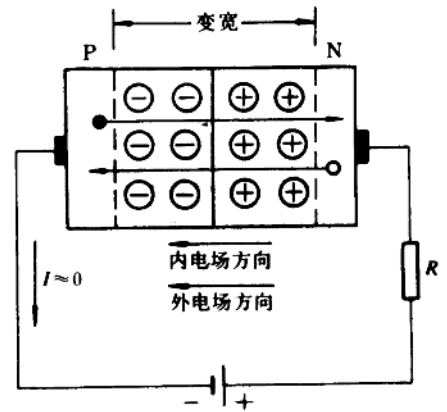


图 1-12 PN 结加反向电压

正向电流较大,意味着 PN 结在正向导通时结电阻变小。一般直流正向电阻约几到几千欧姆,交流正向电阻约几到几百欧姆。工程上可以认为,PN 结处于正向导通状态。

如果给 PN 结外加反向电压,即外电源正极接 N 区,负极接 P 区(图 1-12),则外电场与内电场方向一致,因而增强了内电场。多数载流扩散被阻断,少数载流子漂移增强,形成自 N 区流向 P 区的漂移电流,称为反向电流。不过因为少数载流子很少,尽管增大反向电压,而反向电流充其量只有微安量级。因为少数载流子系由共价键电子受热激发产生,其数量受温度影响很大。温度越高,反向电流越大。这是半导体器件温度稳定性差的根本原因。

反向电流小表明 PN 结呈现很大的反向电阻。一般直流反向电阻约几百千欧到几兆欧,交流反向电阻约几百千欧。工程上可以认为 PN 结处于截止状态。

综上所述,PN 结的单向导电性在于:外加正向电压时,PN 结电阻很小,正向电流较大,PN 结处于导通状态;外加反向电压时,PN 结电阻很大,反向电流很小但温度稳定性差,PN 结处于截止状态。

第二节 半导体二极管和硅稳压管

一、二极管的基本结构

把PN结加上相应的电极引线,用管壳封装后便成为半导体二极管(又称晶体二极管,简称二极管)。P型区的引出线称为阳极或正极,N型区的引出线称为阴极或负极。根据内部结构的不同,二极管有点接触型和面接触型等,如图1-13所示。点接触型二极管的PN结面积很小,不允许通过较大电流,但其高频特性好,适用于高频信号检波、小电流整流和数字电路中的开关元件。面接触型的PN结面积大,可通过较大电流(有的可达千安培量级),但工作频率低,多用于低频大电流整流。

根据所用半导体材料不同,二极管可分为锗管(点触型居多)和硅管(面触型居多)两类。

二极管的型号很多。根据我国半导体器件命名方法^①,每种型号有四个部分组成:第一部分用阿拉伯数字表示器件的电极数目;第二部分用汉语拼音字母表示器件的材料;第三部分用汉语拼音字母表示器件的类型和用途;第四部分用阿拉伯数字表示器件的序号。例如2AP11,“2”表示二极管,“A”表示N型锗材料^②,“P”表示普通管,“11”表示器件序号。

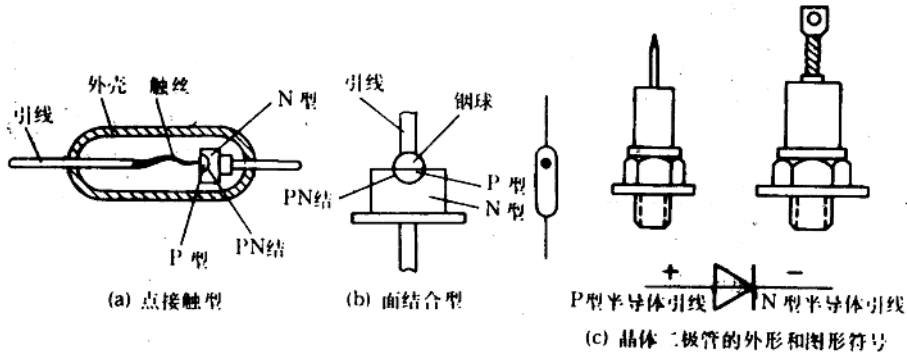


图1-13 晶体二极管结构及外形示意图

(a)一点接触型;(b)一面结合型;(c)一晶体二极管的外形和图形符号

二、二极管的伏安特性

为了正确使用二极管,需要弄清楚加在二极管两端的电压(伏)与通过二极管的电流(安)之间的关系,称为二极管的伏安特性。通常把测量得到的许多组电压电流数据以曲线的形式描绘出来,称为伏安特性曲线。图1-14是测量二极管伏安特性的电路,图1-15是测量得到的伏安特性曲线。

由图1-15可见,特性曲线经过坐标原点。当外加电压为零时,PN结保持动态平衡。扩散电流与漂移电流大小相等方向相反,总电流为零。

外加正向电压很小时,外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻碍作用,正向电流很小(几乎为零),而且变化缓慢。当正向电压超过一定数值后,内电场被严重削弱乃至完全抵消,正向电流迅速增长。这个一定数值的正向电压称为死区电压。硅管的死区电压约

① 半导体器件命名法见附录一。

② N型锗材料即锗二极管,其中N区电子浓度远大于P区空穴浓度。余类推。

0.5 伏(图中 A 点), 锗管的死区电压约 0.2 伏(图中 B 点)。

外加反向电压时, 只要反向电压值不超过某一范围, 二极管只有很小的反向电流, 其值基本与反向电压大小无关, 称为反向饱和电流。反向饱和电流越小, 表示二极管反向截止性能越好。硅管反向饱和电流约几到几十微安, 锗管约几百微安。

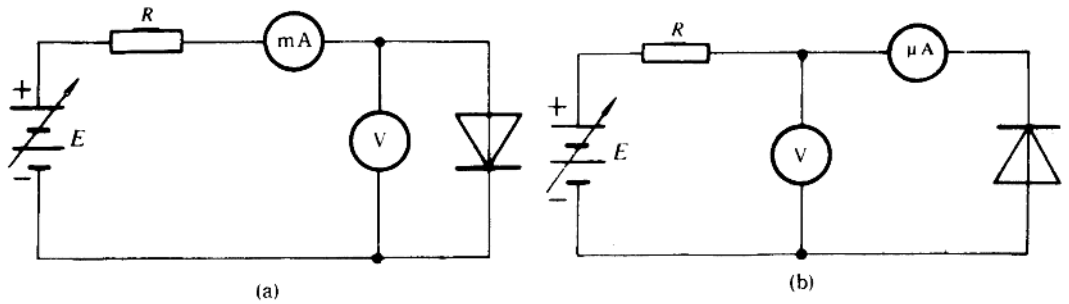


图 1-14 二极管伏安特性测量电路

(a) 正向伏安特性测量; (b) 反向伏安特性测量

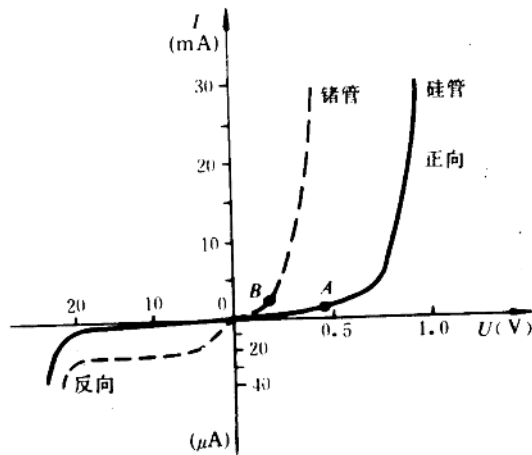


图 1-15 二极管的伏安特性曲线

当反向电压超过某一范围时, 反向电流突然剧增, 二极管被反向击穿。这时所加的反向电压称为反向击穿电压。二极管被击穿后, 一般不能恢复其单向导电性, 所以在使用二极管时应防止反向击穿。

二极管的伏安特性受温度影响很大。当温度升高时, 反向电流随之增大, 而反向击穿电压减小。一般硅二极管 PN 结允许的工作温度比锗二极管高, 因此在同样结面积条件下, 硅管允许通过的电流比锗管大, 而且温度稳定性好, 这是硅二极管的优点之一。大功率二极管几乎都是硅管。

三、二极管的主要参数

二极管的参数规定了二极管的适用范围, 是合理选用管子的依据。主要参数如下。

1. 最大整流电流 I_{OM}

在一定温度下,允许长时间通过二极管的最大正向平均电流称为最大整流电流。点触型二极管最大整流电流在几十毫安以下。面触型二极管最大整流电流则较大。当电流超过该允许值时,会使PN结过热烧坏,故在选用二极管时,其工作电流不能超过最大整流电流。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指二极管工作时所能承受的反向峰值电压,一般约为反向击穿电压的一半或三分之二。点触型二极管最高反向工作电压约数十伏,而面触型二极管可达数百伏。在选用二极管时,加在二极管上的反向电压峰值不得超过 U_{RM} 。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指在二极管加最高反向工作电压时的反向电流。反向电流大,说明二极管单向导电性及温度稳定性差。

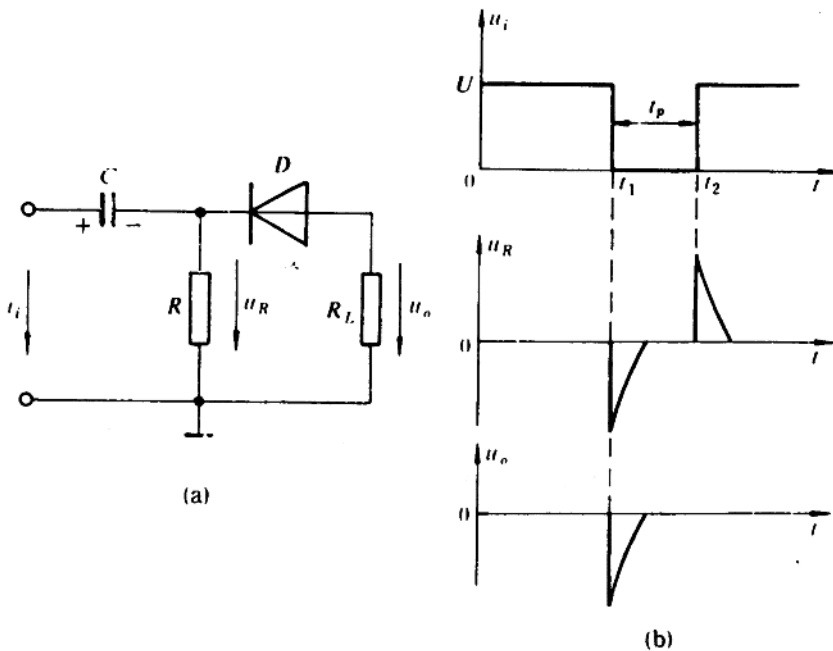


图 1-16 例 1-1 的图

【例 1-1】 图 1-16(a) 中的 R 和 C 构成一微分电路。当输入电压 U_i 如图 1-16(b) 所示时(设 $t < 0$ 时 $U_i = U$), 试画出输出电压 u_o 的波形。

【解】 在 t_1 以前 $u_i = U$, 电容 C 被充电, 其电压为 $u_c = U$, 极性如图示。这时 u_R 和 u_o 均为 0。

在 t_1 和 t_2 时刻 u_i 发生跃变, 即在 t_1 瞬间由 U 跃变为零, 在 t_2 瞬间由零跃变为 U 。由于电容 C 上电压不能跃变, 自 t_1 起 U_c 经过 R 和 R_L 分两路放电, 二极管导通, u_R 和 u_o 均为负尖脉冲。在 t_2 瞬间, 电容 C 对正跃变电压 u_i 而言相当于短路, 在 R 上得到正跃变电压 u_R , 二极管截止。正跃变电压同时对 C 充电, u_R 迅速减小。所以 u_R 为一正尖脉冲, u_o 则为 0, u_R 和 u_o 的波形如图 1-16(b) 所示。二极管起削波作用, 削去正尖脉冲。

【例 1-2】 在图 1-17 中, 输入端 A 的电位 $U_A = +3$ 伏, B 的电位 $U_B = 0$ 伏, 求输出端 Y 的电位 U_Y 。电阻 R 接负电源 (-12 伏)。

【解】 因 A 点电位比 B 点高, 故 D_A 优先导通。如果二极管的正向压降是 0.3 伏, 则 $U_Y = +2.7$ 伏。当 D_A 导通后, D_B 上加的是反向电压, 因而截止。

此处, D_A 起箝位作用, 把 Y 点的电位箝制在 $+2.7$ 伏; D_B 起隔离作用, 把输入端 B 和输出端 Y 隔离开来。

四、硅稳压管

硅稳压管是用特殊工艺制成的面触型硅二极管。它的外形和小功率的整流二极管相似, 其内部也有一个 PN 结。由于它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用, 故称为稳压管。

前已述及, 普通二极管不能工作在反向击穿区, 否则会因反向击穿而失去其单向导电性。硅稳压管则不同, 它总是工作在反向击穿区。而且只要反向电流不超过某一极限数值, 则切断外加反向电压后, PN 结的单向导电性仍可以恢复而不会因反向击穿损坏。硅稳压管反向特性上的这种特殊性能称为可逆击穿。

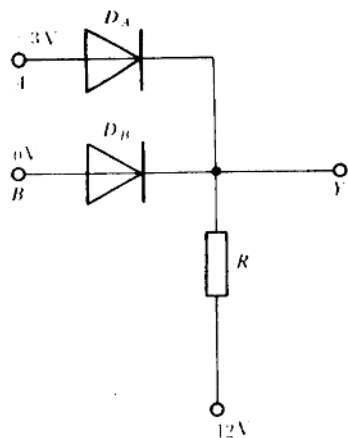


图 1-17 例 1-2 的图

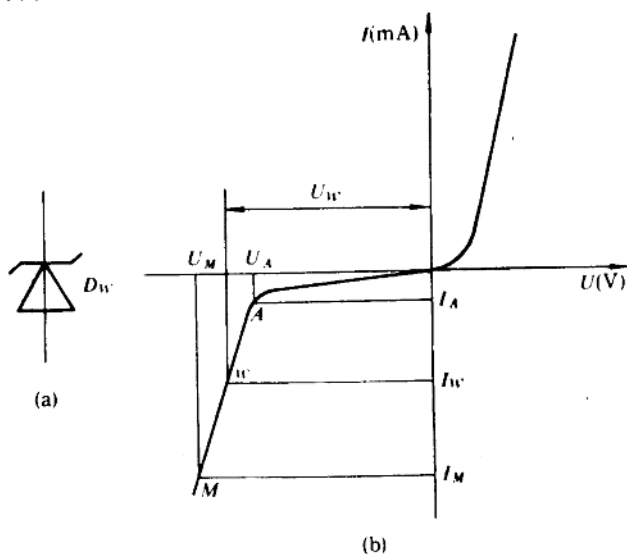


图 1-18 硅稳压管的符号和伏安特性

(a) 一图形符号; (b) 一伏安特性

硅稳压管的伏安特性及元件符号如图 1-18 所示。由图可见: 它的正向伏安特性与普通硅二极管相似, 而反向特性曲线则比较陡直。当反向电压较低时 ($U < |U_A|$), 反向电流很小且近于常数; 当反向电压达到或略超过 U_A 时, 反向电流突然剧增, 稳压管反向击穿。此后, 反向电流在很大范围内变化时, 稳压管两端的电压变化很小。利用这一特性, 即可实现稳压作用。但是, 如果反向电流超过允许范围, 稳压管将会发生热击穿而损坏。图 1-18(b) 中 AM 段就是反向电流的允许变化范围, 也就是可逆击穿区。