

全国技工学校电工类通用教材

电子技术基础

（第二版）

中国劳动出版社

前 言

为了更好地提高技工学校电工类工种(专业)的教学质量,适应生产发展的需要,我们在修订技工学校电工类工种(专业)教学计划教学大纲的基础上,组织修订了技工学校电工类工种(专业)各门课程的教材。修订后的教材从培养目标出发,以中级电工技术等级标准为依据,坚持理论联系实际的原则,突出技能训练,注重针对性、实用性、科学性,并适当增加了新技术、新工艺、新材料、新设备的内容。

这套教材计有:维修电工生产实习、电工生产实习、数学、物理、电工基础、机械知识、机械制图、电气制图、电子技术基础、电机与变压器、电工仪表与测量、电力拖动控制线路、企业供电系统及运行、安全用电、电工材料等 15 种。

组织修订教材的工作得到了黑龙江、山东、上海、江苏、浙江、河南、陕西、四川、江西、湖南、广西、福建、云南及沈阳、大连、重庆等省市自治区及计划单列市劳动厅(局)的大力支持和协助,在此表示衷心地感谢。

由于技工学校教学改革正在研究探索之中,此次修订的教材肯定还会存在一些缺点和不足,恳切希望读者提出宝贵意见,以便在适当时候再次进行修订,使之更加完善。

劳动部培训司

目 录

绪言.....	(1)
第一章 晶体二极管和晶体三极管.....	(4)
✓ § 1—1 半导体基本知识.....	(4)
§ 1—2 PN 结	(8)
§ 1—3 晶体二极管.....	(11)
§ 1—4 晶体三极管.....	(18)
※ § 1—5 其他晶体管.....	(34)
第二章 放大和振荡电路.....	(47)
✓ § 2—1 单级小信号放大电路.....	(47)
§ 2—2 共发射极放大电路的分析.....	(53)
§ 2—3 工作点稳定的偏置电路.....	(66)
§ 2—4 多级放大电路.....	(72)
§ 2—5 放大电路中的负反馈.....	(77)
§ 2—6 功率放大器.....	(87)
§ 2—7 正弦波振荡电路.....	(95)
§ 2—8 直流放大电路.....	(101)
※ § 2—9 集成运算放大器.....	(106)
第三章 数字电路基础.....	(117)
① § 3—1 脉冲波形及其参数.....	(117)
§ 3—2 二极管、三极管的开关特性	(122)
§ 3—3 基本逻辑门电路.....	(128)
§ 3—4 数字集成电路简介.....	(134)
第四章 整流与稳压电路.....	(139)
✓ § 4—1 单相整流电路.....	(139)
§ 4—2 三相整流电路.....	(147)
§ 4—3 滤波电路.....	(155)
§ 4—4 整流器件选用及保护.....	(160)
§ 4—5 稳压电路.....	(171)
第五章 晶闸管及其应用.....	(188)
§ 5—1 晶闸管的结构和工作原理.....	(188)
§ 5—2 晶闸管单相可控整流电路.....	(194)
§ 5—3 晶闸管三相可控整流电路.....	(198)
§ 5—4 负载类型对晶闸管整流的影响.....	(203)

§ 5—5 晶闸管的触发电路.....	(206)
§ 5—6 晶闸管的使用.....	(214)
※ § 5—7 逆变器和斩波器.....	(221)
§ 5—8 特殊晶闸管及其应用.....	(225)
实验.....	(235)
实验一 晶体二极管的特性与检测.....	(235)
实验二 晶体三极管的输入、输出特性	(237)
实验三 低频小信号电压放大器.....	(238)
实验四 ✓ 负反馈对放大器性能的影响.....	(240)
实验五 单相桥式整流电路.....	(242)
实验六 ✓ 串联型稳压电路.....	(244)
实验七 单结晶体管触发电路.....	(246)
实验八 “与非”门逻辑电路测试.....	(247)
附录.....	(249)
附录 1 常用晶体二极管、三极管参数选录	(249)
附录 2 整流设备的型号与意义	(258)
附录 3 小功率单相整流电路的电量关系	(259)
附录 4 压敏电阻部分规格	(259)

绪 言

电子技术是研究各种半导体器件和电路及其在各个领域的应用的技术学科。

一、电子技术的发展

半导体器件是近 50 年发展起来的新型电子器件,由于它具有体积小、重量轻、耗电省、寿命长、工作可靠等一系列优点,它在电子、电工技术和设备中应用十分的广泛。

随着近代自动化控制技术的发展和需要,随着半导体器件材料的特性的进一步研究、开发和利用及半导体器件制造工艺的不断完善和提高,新的各种用途的特殊半导体器件不断地被研究和开发出来,如光电二极管、光电三极管、恒流二极管、变容二极管…等。特别是六十年代发展起来的场效应管,更有输入阻抗高、噪声低、热稳定性好、制造工艺简单、容易集成化等优点。正是在此基础上创制了新型和优异的集成电路,从而实现了材料、器件、电路三者之间的统一。

目前很多实际电路都已开始用集成电路代替分立元件电路。如模拟电路中常用的集成运算放大器、集成功率放大器、集成稳压电源等;数字电路常用的数字集成电路 TTL“与非”门电路,CMOS“与非”门电路等。这些集成电路的广泛应用使各种自动控制设备、电子电工测量仪器等在微型化和可靠性等方面提高到新的水平。

特别值得一提的是五十年代末研制成功的晶闸管(可控硅),它容量大、耐压高、损耗小、控制方便。通过它可以用微小的信号功率去对大功率源进行控制和变换,从而使电子技术从弱电进入了强电领域。目前它在可控整流、交直流调压、逆变等方面获得十分重要的应用。近年来各种特殊用途的晶闸管也层出不穷。晶闸管正向着大功率化、快速化、模块化、廉价和可靠的方向飞速发展。

总之,电子技术的发展非常迅速,它在高科技领域中有举足轻重的地位,它推动了计算机技术和近代电子测量技术的发展。从一定意义上说,电子技术的发展水平反映了一个国家的科学技术水平。

二、电子技术基础课的内容

(一)半导体器件

二极管和三极管是最常用的半导体器件。我们重点介绍普通二极管和三极管的结构、工作原理、特性和主要参数,及它们的检测和使用。结合当前的电工设备和技术的实际情况,还简要介绍一些特殊二极管和三极管。所有这些都是为了后面学习放大电路、整流电路及其他电子电路准备基础。

(二)放大和振荡电路

放大电路是电子技术的重要的理论基础,重点分析和讨论应用最为广泛的共发射极电路的组成、工作原理及电路分析方法,这对分析其他组态的电路可起到引导和举一反三的作用。

由于在实际的放大电路中几乎无一例外地采用反馈,所以对四种形式的负反馈电路作了定性分析。

多级放大电路的末级一般要求输出一定的信号功率去推动负载。因此末级一般都是功率

放大电路,为此我们也介绍了变压器耦合的推挽功率放大电路和互补对称功率放大电路。

振荡电路在某些电工技术和设备中也有重要的应用,例如以振荡电路为主体的半导体接近开关被广泛地用在定位控制、行程控制,安全保护等控制线路中。我们只介绍了 LC 振荡电路,对石英晶体振荡器作为 LC 振荡电路的一种特殊形式也作了简单分析。

在自动控制技术中,作为控制信号,例如温度的变化、压力的变化都可以通过传感器将它们转换为电信号的变化。这些信号大多是缓慢变化的,要放大这些缓慢变化的控制信号必须由直流放大器来完成。为此我们介绍了差动放大电路,此举的目的还在于为分析集成运算放大器准备基础。

(三)数字电路基础

数字电路是专门处理数字信号电子电路,所谓数字信号就是不连续变化的脉冲信号。

晶体二极管的单向导电性、晶体三极管的“饱和”导通和“截止”状态、它们如同一个开关的“通”和“断”,数字电路就是利用二极管和三极管的开关作用进行工作的。这部分内容重点放在由二极管组成的“与”门、“或”门及三极管组成的“非”门和“与非”门。在此基础上简单分析应用更加普遍、更加优越的集成门电路——TTL“与非”门电路和 CMOS“与非”门电路等。

(四)整流和稳压电路

在生产实践和科学实验中,有许多工艺过程和电气设备都需要用直流电源,如电解、电镀、蓄电池充电、直流电力拖动等。要得到直流电,最经济、最简便的措施是将电力系统供给的工频交流电变换为直流电,这就是整流。对某些直流电压的稳定程度要求高的场合,例如计算机电源,这时还要在整流后加滤波和稳压电路。这里主要讨论各种单相、三相整流电路和小功率稳压电路,并联系实际例举它们在电气设备中的应用实例。

(五)晶闸管及其应用

二极管整流电路在应用上有一个很大的局限性,其输出的直流电压不能任意调节。而在很多实际场合却要求直流电压能调节,即希望输出的直流电压具有“可控性”。

晶闸管组成的可控整流电路具有输出直流电压可调、输出直流电流大、晶闸管反向耐压高等一系列优点。此外晶闸管组成的逆变器、斩波器等在电气设备中的应用十分广泛。这部分内容尽可能联系新设备、新技术,以适应生产实践的需要。

三、课程目的和学习方法

“电子技术基础”适用于三年制招收初中毕业生的技工学校电工类专业(和职业高中相近专业)。通过本课程学习使学生获得电工技术方面必要的理论基础,为学习电工类专业课打下良好的基础。

课程目的:

了解晶体二极管、三极管、晶闸管等器件的基本构造、工作原理、特性、应用,掌握用简单仪表对它们进行鉴别和检测。

理解电工技术设备中常用的放大电路,单相、三相整流电路,单相、三相可控整流电路,晶闸管触发电路等的基本形式、工作原理、分析方法,掌握单相半波、全波整流电路和简单计算,掌握整流二极管和晶闸管的选择。

一般地了解集成运算放大器,数字电路、特殊半导体器件、特殊晶闸管的基本知识。

“电子技术基础”虽然是专业理论基础,但它具有很强的实践性。学习时一定要以实践为基础,从实际出发,对基本概念、基本器件、典型电路务必搞清楚,要弄懂、弄明白,要把握住问题

是如何提出的,如何引伸的,如何解决的,在实践中又是如何应用的等几个主要环节。

一定要重视实验课,在实验中注意观察分析现象,正确读数,增强动手能力、加深对课堂理论的认识和理解。有条件时到厂矿企业现场参观。

教材每章后面附有一定数量的习题,同时有与本教材配套的习题册,每次新课后应练习一定数量的习题。

使用本教材的老师可根据具体情况对集成运算放大器、数字电路、逆变和斩波等内容适当删减。

第一章 晶体二极管和晶体三极管

半导体器件是在 50 年代初发展起来的电子器件,它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点。尤其是晶体二极管和晶体三极管广泛应用在各种各样的电子电路中。随着电子技术的不断发展,集成电路特别是大规模和超大规模集成电路的出现,使各种工业自动控制设备和电子设备在微型化、可靠性等方面向前推进了一大步。为了正确和有效地运用半导体器件,必须对它们的工作原理和性能有一个基本认识。

本章首先简要介绍半导体基本知识,接着讨论晶体二极管和晶体三极管的结构、类型、工作原理、特性、主要参数和测试,为以后各章学习提供必要的基础知识。

§ 1—1 半导体基本知识

晶体二极管和晶体三极管都是由半导体材料制成的,要了解它们的工作原理和特性,应先对半导体有一定的认识。

一、半导体的一般概念

在实践中,我们知道铜线是导电的,而铜线外面包裹着一层塑料或橡皮是不导电的,可见物质的导电能力有很大不同。

在自然界中,存在着很多不同的物质,用其导电能力来衡量,可以分为三类:一类是导电能力较强的物质叫导体,金属一般都是导体,如:银、铜、铝等;另一类是几乎不能导电的物质叫绝缘体,如橡皮、塑料、陶瓷等。此外,还有一类物质,它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,我们称它们为半导体,如锗、硅、硒、砷化镓及一些金属的氧化物或硫化物等。顺便指出,现在使用的半导体材料大多数要制成晶体,因而把用半导体材料制作的晶体二极管、晶体三极管通称晶体管。

那么为什么物质有这种导电能力上的差别呢?根本原因在于不同的物质其内部特性不同。物质内部运载电荷的粒子——载流子的多少是决定物质导电能力的一个重要因素。

我们知道,物质由分子组成,分子由原子组成,原子由一个带正电的原子核和若干个带负电的电子所组成。电子分层排列,内层的电子受原子核的引力较大,最外层的电子受原子核的引力较小,称为价电子。所有电子围绕原子核作不停的旋转运动,好像宇宙中行星围绕太阳运转一样。

在金属导体中,原子核对价电子的束缚很弱,有大量的价电子能挣脱原子核的束缚成为

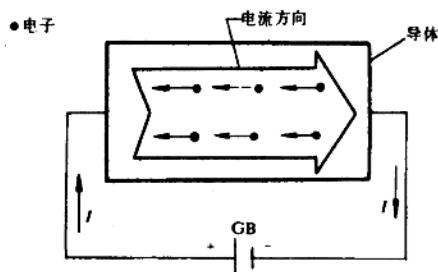


图 1-1 导体中电流示意图

自由电子,它们在外电场的作用下作定向运动形成电流,所以金属导体的导电性能良好。由图 1-1 可知,在金属导体内仅有一种载流子,即自由电子。必须注意,电流的方向与电子运动方向相反。

在绝缘体中,原子核对价电子的束缚很强,价电子不容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,因此绝缘体的导电性能很差。

在半导体中,原子结构比较特殊,原子核对价电子的束缚比导体强,比绝缘体弱。因此半导体既非良导体,又非绝缘体。那么半导体为什么会引起人们很大的兴趣呢?原因并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而在于它具有独特的性质。人们发现,当半导体受到外界光或热的激发,它的导电能力会发生较大的变化。更为突出的是,在纯净的半导体中掺入微量杂质元素,半导体的导电性能就会大大增强,这些特点说明半导体的导电机理不同于其他物质。下面我们就从半导体内部的导电规律说起。

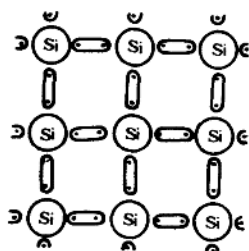


图 1-2 硅单晶结构示意图

目前常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge),它们都是四价元素,图 1-2 表示硅单晶体的结构示意图。图中相邻的两个原子由一对共有电子形成共价键,当温度低到绝对零度和没有外界光或热激发时,处于共价键中的电子是一种束缚电子,不能自由移动,其特性相当于绝缘体,不能导电。但是,这种束缚并不是很牢固的,在常温下,会有少数价电子受热或光照激发获得足够能量,挣脱束缚成为自由电子。没有外电场时,这些电子的移动是无规则的。有外电场时,这些电子就逆着电场方向定向移动形成电流,这叫做电子导电。

当一个价电子挣脱了束缚成为自由电子后,同时在原来的位置上就留下一个空位,这个空位称为空穴。空穴的出现是半导体区别于其他导体的一个重要特点。

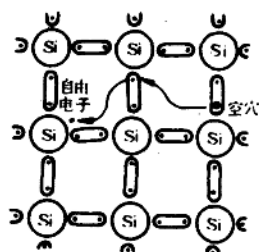


图 1-3 电子的填补运动示意图

我们知道原子是电中性的。空穴是失去了带负电的电子而形成的,因而可以把空穴看作是带正电的。有了这样一个空穴,在外加电场或其他能源作用下,邻近的价电子就可填补到这个空位,于是又出现新的空穴,又有邻近的价电子来进行填补……从而形成这种电子的填补运动,如图 1-3 所示。从效果上看,相当于空穴沿着电子填补运动的反方向移动。为了与自由电子移动相区别,我们把这种电子的填补运动叫做空穴运动。打个比方,比如大礼堂里坐满了人,第一排走了一个人,出现一个空位,第二排的人向前坐了第一排的空位,第二排又出现了一个新的空位,后排的人不断向前填补,这样就出现了人的向前填补运动,而空位好像向后运动一样。没有外电场时,空穴的移动同样是不规则的。有外电场时,空穴就顺着电场方向定向移动形成电流,这叫空穴导电。

自由电子是带负电的粒子,空穴可看作是带正电的粒子,它们都是载流子。如图 1-4 所示,电路中电流由两部分组成,在外电场作用下,自由电子的移动和空穴的移动方向相反,但形成的电流方向相同。

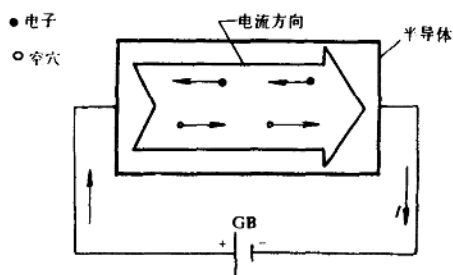


图 1-4 半导体中载流子运动示意图

射,有更多共价键中的电子挣脱束缚,产生电子一空穴对,它的导电性因此得到增强。同时也说明,温度是影响半导体性能的一个很重要的外部因素。

二、P 型半导体和 N 型半导体

由于纯净的半导体导电性较差,不能直接用来制造晶体管。于是,人们在纯净的半导体中掺入微量杂质元素,使半导体的导电性能大大增强,这种半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同,杂质半导体可分为,P 型半导体(或空穴型半导体)和 N 型半导体(或电子型半导体)两大类。这里“P”是指“正”的意思,“N”是指“负”的意思。

(一)P 型半导体

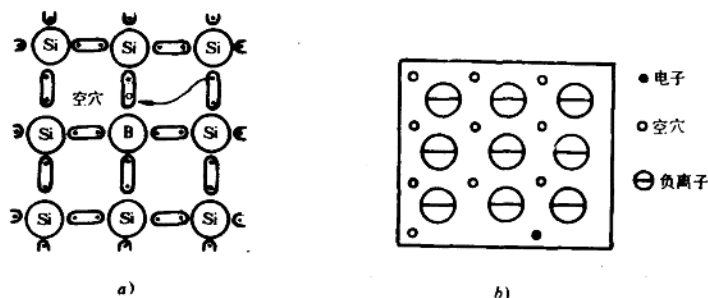


图 1-5 P 型半导体结构示意图

a) 硅单晶掺硼示意 b) 结构简图

在硅(或锗)晶体内掺入微量的三价元素硼 B(或镓 In、铝 Al),就会多出许多空穴。这是因为硅原子有四个价电子,而硼原子只有三个价电子,它与周围硅原子相联系时缺少一个价电子就形成一个空位,附近共价键中的电子很容易来填补,如图 1-5a 所示。硼原子获得了一个价电子后成为不能移动的负离子,同时产生一个空穴,但在产生空穴的同时,并不会产生新的自由电子,这与纯净的半导体不同。在这类半导体中,每个硼原子能提供一个空穴。因而空穴数目显著增多。当然由于热激发,原来硅晶体本身会产生少量的电子一空穴对,有少数自由电子,但空穴的浓度比自由电子的浓度大得多,这类半导体主要靠空穴导电叫 P 型半导体。在 P 型半

导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,同时还有不能移动的负离子,如图 1-5b 所示。在外电场作用下,P 型半导体中电流主要是空穴电流,如图 1-6 所示。

(二)N 型半导体

在硅(或锗)晶体内掺入微量的五价元素磷 P (或锑 Sb、砷 As),就会多出许多电子来导电。这是因为磷原子有五个价电子,除其中四个价电子与硅原子相联系外,尚多出一个价电子,这个价电子受磷原子的束缚很弱,很容易成为自由电子,如图 1-7a 所示。磷原子失去一个价电子后成为不能移动的正离子,但在产生自由电子的同时,也不会产生新的空穴。在这类半导体中,每个磷原子能提供一个自由电子,因而自由电子的数目显著增多。同样由于热激发,硅原子本身会产生少量的电子—空穴对,有少数空穴,但自由电子的浓度比空穴的浓度大得多,这类半导体主要靠电子导电叫 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子,同时还有不能移动的正离子,如图 1-7b 所示。在外电场作用下,N 型半导体中电流主要是电子电流,如图 1-8 所示。

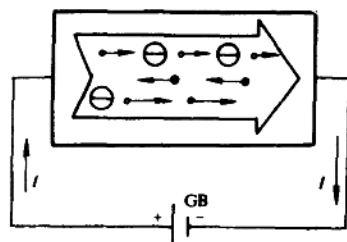


图 1-6 P 型半导体中载流子运动示意图

图 1-6 P 型半导体中载流子运动示意图。在外电场作用下,N 型半导体中电流主要是电子电流,如图 1-8 所示。

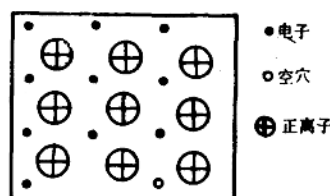
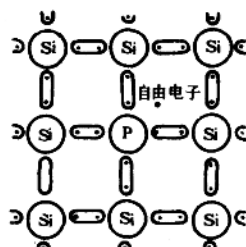


图 1-7 N 型半导体结构示意图
a) 硅单晶掺磷示意 b) 结构简图

由上述可见,在硅中掺入三价元素可以得到 P 型硅,在硅中掺入五价元素可以得到 N 型硅。同理,在锗中掺入三价元素可以得到 P 型锗,在锗中掺入五价元素可以得到 N 型锗。

在掺杂时,如果控制杂质的数量,就能控制杂质半导体中多数载流子的数量,相应地就控制了它们的导电能力。由于多数载流子不再随温度变化,因而杂质半导体不象纯净的半导体对温度那样敏感。但是,杂质半导体中的少数载流子则是由温度决定的,而且和材料有关,这一点需要注意。相对来说,硅原子核对其价电子的束缚比锗原子核对其价电子的束缚要强一些,即硅材料比锗材料的少数载流子要少

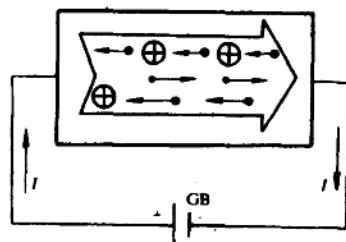


图 1-8 N 型半导体中载流子运动示意图

得多,因此用硅材料制成的晶体管比用锗材料制成的晶体管的温度特性好,这一点将在以后各

章节中有所体现。

P 型半导体和 N 型半导体都是电中性的, 对外不显电性, 这主要是纯净的半导体和掺入的杂质元素都是电中性的, 而且在掺杂过程中既没有失去电荷, 也没有从外界得到电荷, 只是在半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴, 并没有破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

§ 1-2 PN 结

前面我们讨论了 P 型半导体和 N 型半导体中载流子情况及其导电规律, 尽管这两类半导体中载流子总数增多了, 但我们更感兴趣的是这两类半导体通过某种方式结合而形成的 PN 结及其特性。目前晶体管种类繁多, 但它们最基本的结构是 PN 结, 因此掌握 PN 结的基本原理十分重要。那么 PN 结是怎样形成的? PN 结有什么特性? 下面我们就来讨论这些问题。

一、PN 结的形成

PN 结的形成与载流子的扩散运动和漂移运动有着密切联系。所谓扩散运动, 是指由浓度高的地方自发地向周围浓度低的地方运动。自然界中存在着许多扩散现象。例如, 我们能嗅到各种气味, 就是气体微粒扩散的结果。在半导体中, 空穴和电子是能运动的粒子, 在一定条件下, 也会产生扩散。所谓漂移运动, 是指载流子在电场力作用下发生的定向运动。

(一) 多数载流子的扩散运动及其结果

我们知道, P 型半导体空穴浓度高, 电子浓度低, 而 N 型半导体电子浓度高, 空穴浓度低。当 P 型和 N 型半导体结合后, 在它们交界处, 空穴要从浓度高的 P 区向浓度低的 N 区扩散; 电子要从浓度高的 N 区向浓度低的 P 区扩散, 由于 P 区的空穴和 N 区的电子是它们各自的多数载流子, 所以这是多数载流子的扩散。如图 1-9a 所示。

由于空穴和电子都是带电的, 扩散的结果破坏了 P 区和 N 区中原来的电中性状态。在交界处, P 区一侧的空穴跑到 N 区, 与 N 区的电子复合, 留下了杂质负离子, 形成一个带负电的薄层 A; N 区一侧的电子跑到 P 区, 与 P 区的空穴复合, 留下了杂质正离子, 形成一个带正电的薄层 B。这些正、负离子通常称为空间电荷, 它们不能自由移动, 因此并不参与导电; 而是在 P 区和 N 区的交界处形

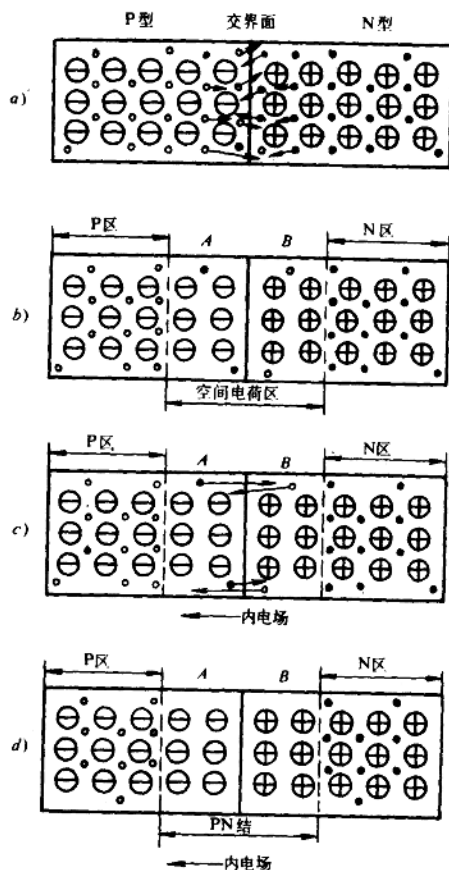


图 1-9 PN 结形成示意图

成空间电荷区,如图 1-9b 所示。扩散越强,空间电荷区越宽。因为 A 层带负电,B 层带正电,所以在空间电荷区内产生一个电场,这个电场不是外加电压形成的,而是由内部多数载流子扩散形成的,故称为内电场,其方向从 B 指向 A。

(二)少数载流子的漂移运动

当内电场建立后,载流子在电场中将受到电场力的作用,我们根据电场方向及空穴、电子的带电极性不难看出,P 区的多数载流子空穴向 N 区扩散进入空间电荷区时,将受到电场力作用。同样,N 区的多数载流子电子向 P 区扩散时,也会受到电场力的阻挡。因此,空间电荷区又可看作是一个阻挡层,它对两边多数载流子的扩散有阻挡作用。另一方面,这个内电场将使 P 区的电子向 N 区漂移,N 区的空穴向 P 区漂移,内电场越强,漂移运动就越强。由于 P 区的电子和 N 区的空穴是它们各自的少数载流子,所以这里是少数载流子的漂移运动。对同一种载流子来说,漂移运动与扩散运动的方向相反,如图 1-9c 所示。

由于从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区失去的电子,而从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴,这就使空间电荷减少。因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

(三)动态平衡形成 PN 结

由上面分析可见,扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的。开始时多数载流子的扩散占优势,随着扩散的进行,使空间电荷区加宽,内电场增强,少数载流子的漂移增强,但使扩散减弱,而漂移使空间电荷区变窄,内电场减弱,却使扩散又容易进行。最后当漂移运动和扩散运动达到动态平衡时,即扩散越过空间电荷区的载流子数量和漂移越过空间电荷区的载流子数量相等,空间电荷区宽度和内电场强度都不再改变,呈现很高的电阻率,此时的空间电荷区就是 PN 结。如图 1-9d 所示。

由于 PN 结内存在着内电场,因此在 PN 结两边就有电位差,一般用硅材料制成的 PN 结约为 0.5 伏,用锗材料制成的 PN 结约为 0.2 伏。电位降落的方向和内电场方向相同。

二、PN 结的单向导电性

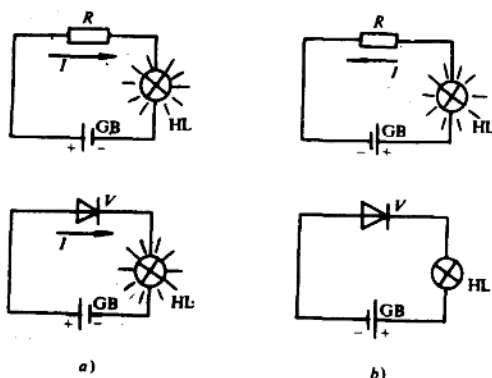


图 1-10 PN 结单向导电性实验电路

上面我们讨论了 PN 结的形成,它只是反映在没有外加电场时的情况。如果我们在 PN 结的两端加上电压,这时 PN 结有什么现象产生呢?

我们先做一个实验,取一个电阻 R 和一只晶体二极管 V(由一个 PN 结做成的器件)分别接成如图 1-10a 和 b 所示的电路。可以看到,图 1-10a 所示的两个电路的灯泡都同样发光,这时,PN 结像导体一样让电流通过。

但是,当我们把电池的正负极互换调换后就会看到,接有电阻 R 的电路中灯泡亮度不变,而接有 PN 结的电路中灯泡却不亮了,这时 PN 结像绝缘体一样不能

让电流通过。如图 1-10b 所示。

通过这个实验发现,PN 结的导电性与外加电压的极性有关。这个特性使它获得了重要的应用。那么,PN 结为什么会具有这种特性呢?下面我们分两种情况来讨论。

(一)加正向电压 PN 结导通

当 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极,如图 1-11 所示。这时加在 PN 结上的电压叫做正向电压,或叫正向偏置(简称正偏)。外电场的方向与 PN 结内电场的方向相反,削弱了内电场,破坏了原来的动态平衡状态。在外电场作用下, P 区的空穴和 N 区的电子都要向 PN 结移动。P 区的空穴进入 PN 结后,跟 A 层的部分负离子中和, N 区的电子送入 PN 结后,跟 B 层的部分正离子中和,这样,使空间电荷减少,空间电荷区变薄。于是,漂移运动减弱,扩散运动增强, P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子电子不断地越过 PN 结,形成正向电流 I_F , 这个电流等于空穴电流和电子电流之和。因此,正向电流可以很大且随正向电压增大而增大,这种情况称 PN 结正向导通。PN 结正向导通时意味着 PN 结的电阻变小了。这就是前面实验中, PN 结正偏时形成较大电流使灯泡发光的原因。

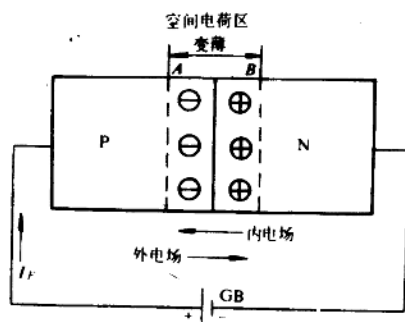


图 1-11 外加正向电压时的 PN 结

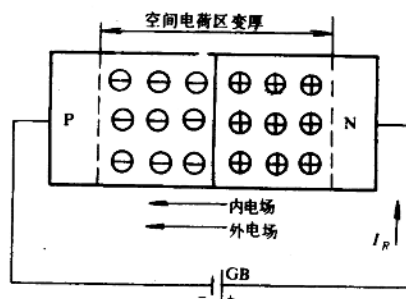


图 1-12 外加反向电压时的 PN 结

实际上,外加正向电压只要能够克服 PN 结内电位差(只需零点几伏),就会使通过 PN 结的正向电流大大增加。至于少数载流子漂移形成的电流与正向电流方向相反,且数值很小可忽略不计。

(二)加反向电压 PN 结截止

当 P 区接电源的负极, N 区接电源的正极,如图 1-12 所示。这时加在 PN 结上的电压叫做反向电压,或叫反向偏置(简称反偏)。外电场的方向与 PN 结内电场的方向相同,增强了内电场,也破坏了原来的动态平衡状态。在外电场作用下, P 区的空穴和 N 区的电子要远离 PN 结,结果就使空间电荷区变厚。于是,漂移运动增强,扩散运动几乎停止。P 区的电子和 N 区的空穴越过 PN 结,形成反向电流 I_R 。但因为 P 区的电子和 N 区的空穴都是少数载流子,所以反向电流很小,且它几乎不随反向电压的增大而增大。因此,PN 结加上反向电压时,基本上是不导电的,这种情况称 PN 结反偏截止。PN 结反偏截止时意味着 PN 结电阻变得很大。这就是前面实验中, PN 结反偏时灯泡不发光的原因。

必须指出:由于反向电流是由少数载流子形成的,而少数载流子又是由热激发产生的,所

以 PN 结的反向电流受温度影响很大,使用半导体器件时,必须考虑环境温度影响。

综上所述,当 PN 结加上正向电压时有较大的电流通过,正向电阻很小,PN 结处于导通状态;当 PN 结加上反向电压时只有很小的电流通过,或者粗略地认为没有电流通过,反向电阻很大,PN 结处于截止状态。这就是 PN 结的重要特性——单向导电性。从这里可以看出,PN 结具有单向导电性的关键是它的阻挡层的存在,及其随外加电压而变化。晶体二极管、晶体三极管及其他各种半导体器件的工作特性,都是以 PN 结的单向导电特性为基础的。

由于形成 PN 结的半导体材料不同和工艺不同,使得 PN 结除了具有单向导电性以外,还具有某些其他特性。PN 结相当于一个电容器,常称为结电容。结电容的大小限制了晶体管的工作频率。如结电容大的晶体管只能工作在低频频段。结电容还会随反向电压变化而变化,因此 PN 结具有变容特性。PN 结对载流子流通呈现的阻碍作用常称为结电阻。外加电压不同,结电阻也不同,因此 PN 结又具有变阻特性。结电阻大小变化的快慢决定载流子流通与截断状态转换的快慢。据此,人们制造出各种快速工作的晶体管。此外,PN 结本身的大小不同,容许流通的载流子多少也不同,因此大功率晶体管的 PN 结都制作得比较大。除了这些特性外,PN 结还有感温、感光、发光等特性,有关这些特性的应用,我们在后面有关章节再作介绍。

总之,PN 结最重要的特性是单向导电性,它是一切半导体器件的基础。其它性能如光、热对 PN 结的影响,在我们不需要时应尽量避免,在需要时则可利用它的这些特性研制出许多新型器件。

§ 1-3 晶体二极管

在上一节中,我们讨论了 PN 结和它的单向导电性,它是构成半导体器件的重要基础。晶体二极管(简称二极管)就是由一个 PN 结构成的最简单的半导体器件。本节中,我们从晶体二极管的结构开始来讨论它的基本工作原理、参数和检测方法。

一、晶体二极管的结构、符号、类型

(一)结构和符号



图 1-13 晶体二极管结构与符号

在一个 PN 结的 P 区和 N 区各接出一条引线,然后再封装在管壳内,就制成一只晶体二极管。P 区引出端叫正极(或阳极),N 区引出端叫负极(或阴极),如图 1-13a 所示。

二极管的文字符号为“V”,图形符号见图 1-13b。在箭头的一边代表正极,竖线一边代表负极,箭头所指方向是 PN 结正向电流

方向,它表示二极管具有单向导电性。

由于功能和用途的不同,二极管大小不同,外形和封装各异。图 1-14 中,从左到右是由小功率到大功率的几种常见二极管的外形。从二极管使用的封装材料来看,小电流的二极管常用玻璃壳或塑料壳封装;电流较大的二极管,工作时 PN 结温度较高,常用金属外壳封装,外壳就是一个电极并制成螺栓形,以便与散热器联接成一体。随着新材料、新工艺的应用,二极管采用环氧树脂、硅酮塑料或微晶玻璃封装也比较常见。

二极管外壳上一般印有符号表示极性,正、负极的引线 with 符号一致。有的在外壳一端印有

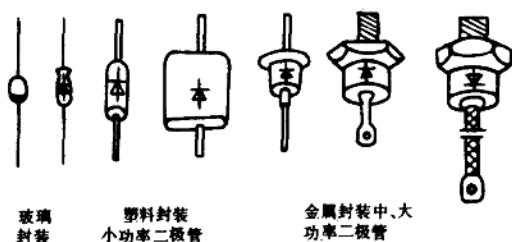


图 1-14 几种晶体二极管外形

色圈表示负极；有的在外壳一端制成圆角形来表示负极；但也有的在正极端打印标记或用红点来表示正极。这一点在使用时要特别注意。

根据不同的制造工艺，二极管的内部结构大致分为点接触型、面接触型和平面型三种，以适应不同用途的需要。如图 1-15 所示。

点接触型二极管的特点是：PN 结的面积小，结电容小，适用于高频工作，但只能通过较小的电流。

面接触型二极管的特点是：PN 结的面积大，结电容也大，只能在较低频率下工作，允许通过的电流较大。

平面型二极管用特殊工艺制成，它的特点是：结面积较小时，结电容小，适用于在数字电路工作；结面积较大时，可以通过很大的电流。

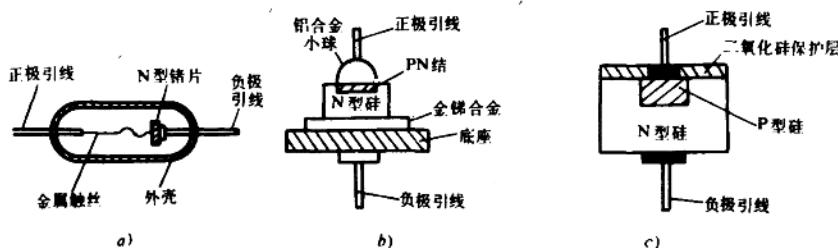


图 1-15 晶体二极管的内部结构示意图

a)点接触型 b)面接触型 c)平面型

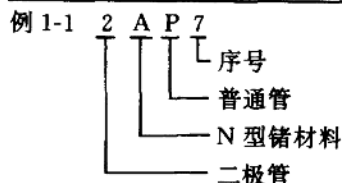
(二)类型

1. 型号 二极管品种很多，特性不一，为便于区别和选用，每种二极管都有一个型号。按照国家标准 GB249-74 的规定，国产二极管的型号由五个部分组成，见表 1-1。需要注意，第四部分数字是表示某系列二极管的序号，序号不同的二极管其特性不同。第五部分字母表示规格号，系列序号相同，规格号不同的二极管，特性差不多，只是某个或某几个参数不同。某些二极管型号没有第五部分。

表 1-1

晶体二极管的型号

第一部分		第二部分		第三部分				第四部分	第五部分
用数字表示器件的电极数目		用拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类型				用数字表示器件的序号	用汉语拼音字母表示规格号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N型锗材料	P	普通管	C	参量管		
		B	P型锗材料	Z	整流管	U	光电器件		
		C	N型硅材料	W	稳压管	N	阻尼管		
		D	P型硅材料	K	开关管	BT	半导体特殊器件		
		E	化合物	L	整流堆				



2AP7是N型锗材料制作的普通二极管

2CZ54D是2CZ54型硅整流管的D档

2. 分类 依据制作材料分类,二极管主要有锗二极管和硅二极管两大类。前者内部多为点接触型,允许的工作温度较低,只能在100℃以下工作;后者内部多为面接触型或平面型,允许的工作温度较高,有的可达150~200℃。

依据用途分类,电工设备中较常用的二极管有四类:

- (1) 普通二极管 如2AP等系列,用于信号检测、取样、小电流整流等。
- (2) 整流二极管 如2CZ、2DZ等系列,广泛使用在各种电源设备中做不同功率的整流。
- (3) 开关二极管 如2AK、2CK等系列,用于数字电路和控制电路。
- (4) 稳压二极管 如2CW、2DW等系列,用在各种稳压电源和晶闸管电路中。

二、晶体二极管的伏安特性曲线

二极管最重要的特性就是单向导电性,这是由于在不同极性的外加电压下,内部载流子的不同的运动过程形成的,反映到外部电路就是加到二极管两端的电压和通过二极管的电流之间的关系,即二极管的伏安特性。在电子技术中,常用伏安特性曲线来直观描述电子器件的特性。按照图1-16的实验电路来测量,在不同的外加电压下,每改变一次 R_P 的值就可测得一组电压和电流数据,在以电压为横坐标,电流为纵坐标的直角坐标系中描绘出来,就得到二极管的伏安特性曲线。

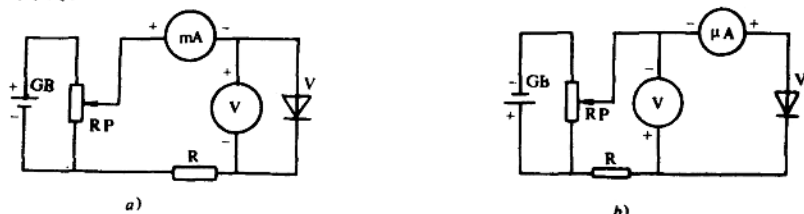


图1-16 测量晶体二极管伏安特性
a) 正向特性 b) 反向特性