

· 修订版 ·

电子电路

技术基础

上册

低频电路部分

四川科学技术出版社

电子电路技术基础

(上册)

成都电讯工程学院 叶正华 等

四川科学技术出版社

一九八六年·成都

责任编辑: 罗孝昌 崔泽海

封面设计: 曹辉禄

版面设计: 李工石

电子电路技术基础(修订版)

(上册)

成都电讯工程学院 叶正华等

四川科学技术出版社出版 (成都盐道街三号)

四川省新华书店发行 隆昌县印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张18 字数460千

1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷

印数: 1—5,000册

书号: 15298·76

定价: 3.40元

前 言

本书是在叶正华、杨钟英等编写的《电子电路技术基础》一书的基础上，参考高等学校工科电工教材编委会审订的电子线路教学大纲（草案）和脉冲与数字电路教学大纲（草案）、电子线路自学考试大纲（讨论稿）编写而成。

全书分上、中、下三册。上册包括半导体二极管、三极管和场效应管的基本特性，放大电路基础，负反馈放大电路，低频功率放大电路，集成运算放大器及应用，中册包括小讯号调谐放大器，高频功率放大器，正弦波振荡器，振幅调制及解调，变频器 and 角度调制及解调；下册主要有晶体管开关及分立元件门电路，数制与编码，逻辑代数基础，集成逻辑门与触发器，组合逻辑电路及时序逻辑电路的分析与设计。

全书以讲述电路的基本工作原理为主，着重于基础概念、基本分析方法、基本计算的介绍。各章均有例题及复习思考练习题。与原书相比，删去了电工基础知识一章，对分立元件脉冲电路作了压缩，增加了数字电路部分的篇幅，模拟电路部分增加了集成运放及高频电子电路。

本书可作为高等院校无线电技术、计算机、电子自动化等专业，广播电视大学电子类专业，工科自修大学的教学参考书。也可作电子技术培训教材及工程技术人员学习参考书。

本书上册由叶正华、刘令虎编写。中册第一、三章由叶正华编写，第二、五章由侯昌乾编写，第四、六章由赵培功编写。下册由杨钟英、张静源、余淑敏等编写。

在编写过程中，曾得到四川省电子学会、成都电讯工程学院教务处的帮助和支持，成都电讯工程学院杨国雄副教授、廖长英副教授审阅了上册初稿；黄香馥教授、杨国雄副教授、罗松筠副教授审阅了中册部分初稿，提出了宝贵的修改意见。全书插图由邱孝宽、张世燕、李黎、李惠敏等同志绘制，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，本书难免有错误及不妥之处，敬请使用本书的教师和广大读者批评指正。

编 者

1985年10月于成电

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	(1)
第一节 半导体的导电特性.....	(1)
第二节 PN结和半导体二极管.....	(4)
第三节 三极管的工作原理和静态特性曲线.....	(12)
第四节 三极管的主要参数.....	(23)
附录 1—1 国产半导体器件型号命名方法.....	(25)
思考题及习题.....	(26)
第二章 放大电路基础	(27)
第一节 放大器的基本概念.....	(27)
第二节 放大电路的图解法.....	(31)
第三节 三极管微变等效电路.....	(43)
第四节 单级放大电路.....	(53)
第五节 单级放大电路的频率响应.....	(62)
第六节 单级放大电路的阶跃响应.....	(76)
思考题及习题.....	(79)
第三章 多级放大电路	(83)
第一节 多级放大电路的一般问题.....	(83)
第二节 多级放大电路的基本性能.....	(85)
第三节 多级放大电路的频率响应.....	(90)
第四节 多级放大电路的阶跃响应.....	(99)
思考题及习题.....	(101)
第四章 场效应管放大电路	(103)
第一节 结型场效应管.....	(103)
第二节 绝缘栅场效应管.....	(108)
第三节 场效应管的直流参数及特点.....	(114)
第四节 场效应管放大电路.....	(117)
思考题及习题.....	(129)
第五章 负反馈放大电路	(132)
第一节 反馈放大电路的基本概念.....	(132)
第二节 负反馈对放大电路技术指标的影响.....	(138)
第三节 负反馈放大电路的分析方法.....	(148)
第四节 交替负反馈及负反馈对放大电路.....	(157)
第五节 反馈放大电路的稳定性分析.....	(160)

思考题及习题.....	(171)
第六章 功率放大电路.....	(176)
第一节 概述.....	(176)
第二节 单管甲类功率放大器.....	(179)
第三节 乙类推挽变压器耦合功率放大器.....	(183)
第四节 无输出变压器功率放大器.....	(188)
第五节 功率放大器的电路技术.....	(194)
思考题及习题.....	(205)
第七章 集成运算放大器原理及其应用.....	(207)
第一节 概述.....	(207)
第二节 差分放大电路.....	(211)
第三节 集成运算放大器的原理.....	(227)
第四节 集成运算放大器的应用.....	(243)
思考题及习题.....	(277)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是电子电路的一个核心元件,在学习电子电路之前,应先了解它的基本特性。

第一节 半导体的导电特性

一、导体、绝缘体、半导体

金、银、铜、锡等金属材料很容易导电,常称它们为导体。导体的电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 欧姆一厘米之间。石英、云母、玻璃、橡胶等材料却很难导电,统称为绝缘体,它们的电阻率在 $10^{11} \sim 10^{19}$ 欧姆一厘米之间。导电能力介于以上两者之间的材料称为半导体,它们的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^{10}$ 欧姆一厘米。

半导体在现代之所以得到广泛的应用,是因为它的电阻率伴随掺入极小量杂质即有明显的改变。例如在 30°C 时,纯锗中掺入一亿分之一的杂质(称作掺杂),其电阻率将减小为 $\frac{1}{12}$ 。这样,便可以掺杂来改变和控制半导体的电阻率,从而制成各种晶体管。其次,温度的变化也能使半导体的电阻率产生明显的变化,利用这种热敏效应能制成热敏元件。此外,光照也能改变半导体的电阻率,同时还产生电动势,利用半导体的这种光电效应,可制成光敏电阻和光电池。

二、半导体的原子结构、电子和空穴导电

任何元素的原子,都是由一个带正电的原子核为中心,和若干个环绕原子核旋转的电子所构成。最常用的半导体硅(有14个电子)和锗(有32个电子)的原子结构如图1—1。它们的共同特点是最外层的电子(价电子)都是4个,所以硅和锗都是四价元素。

在硅(或锗)单晶体中,原子都按照图1—2所示的单元结构形式排列(粗黑线代表共

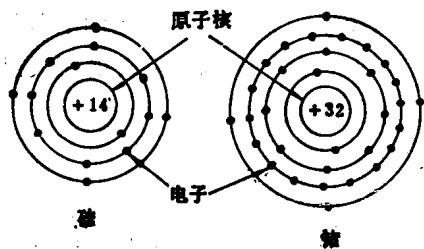


图1—1 硅和锗的原子结构模型

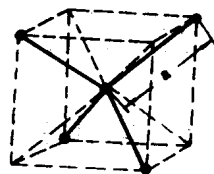


图1—2 硅晶体晶格结构图

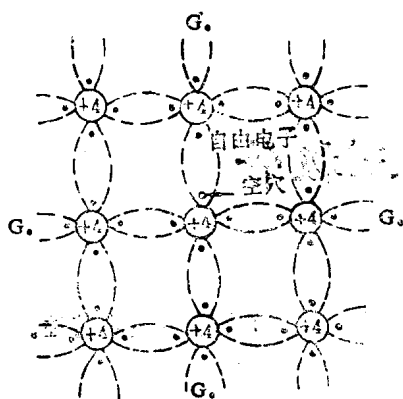


图 1—3 本征半导体中的自由电子和空穴

价键)。在每个小立方体中有五个原子，四角四个，中心一个，这种小立方体称为晶格。处在晶体中的相邻原子间的最短距离 a 都等于小立方体对角线长度的一半， a 和原子的直径（约为 2.35×10^{-8} 厘米）差不多一样大。同一晶格中每个原子的最外层电子轨道互相套迭，因此价电子不仅受自身原子核束缚，还与相邻的四个原子发生联系。这时，每两个相邻的原子都共有一对电子，它们既围绕自身的原子核运动，也时常出现在相邻原子的外层轨道上，这种结合形式称为共价键。图 1—3 是共价键结构的示意图。当某个价电子获得能量而挣脱共价键的束缚形成自由电子时，共价键受到破坏，在被破坏的共价键的地方留下一个带正电的空位，称为空穴，如图 1—3 所示。空穴带正电是由于硅原子失掉一个价电子后，原子核与核外电子电荷不相等而造成的。挣脱了共价键的自由电子，在晶体内部作无规律的热运动。当晶体中有外电场起作用时，这些自由电子就逆电场方向作定向运动，形成顺电场方向的电流，如图 1—4 所示。人们把自由电子，称为载流子。

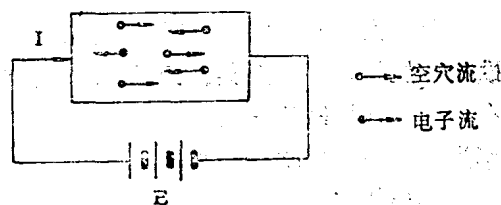


图 1—4 纯硅（锗）导电示意图

应当注意，空穴既然是一个价电子挣脱后留下来的空位，它很容易被相邻原子那里跑来的一个价电子填补，在相邻原子处形成一个新的空位，就好像空穴从一个原子运动到相邻的另一个原子一样。在外电场作用下，空穴顺电场方向作定向运动（见图 1—4），所以它也被称为载流子。

在半导体材料中，有电子和空穴这两种载流子同时参加导电，这是半导体与金属的本质区别。而在金属导体中，却只有自由电子参与导电。

空穴与电子导电的根本差别是：电子导电是电子在挣脱共价键束缚情况下的运动，电子除了和其它原子或电子碰撞外，行动比较自由；空穴导电是价电子在共价键之间依次填补空位，空穴的自由程度比电子小得多，好比一横排座位，本来坐满了人，当右边出现一个空位时，人们顺次向右挪动，最后使空位移到左边，形成空位运动。显然，依次填空的运动不如自由运动那样无拘束。因此，当外电场作用下，电子与空穴一同导电时，形成的两种电流（电子电流和空穴电流），方向虽然相同（都是顺电场方向），大小却不相同，即在同一电场的作用下，电子运动快，速度大；空穴运动慢，速度小。由于电子和空穴的电荷量大小相同，只是符号相反，所以在许多对电子和空穴一同导电时，电子电流比空穴电流大得多。

三、本征半导体和杂质半导体

人们把不含杂质的纯净半导体称为本征半导体。在绝对零度时，它所有的价电子自身具有的能量不足以挣脱共价键的束缚成为自由电子，半导体便成为绝缘体。如果利用热或光的

激发,某些价电子会获得足以挣脱共价键束缚的能量,成为自由电子,当然也同时产生同样多的空穴。这种现象称为本征激发。

硅和锗的原子密度分别为每立方厘米 5.2×10^{22} 和 4.4×10^{22} 个原子,但在常温时,它们的电子——空穴对的密度却要小得多。这是因为绝大部分硅原子和锗原子的价电子都处在共价键中,比较稳定,常温时只有极少数价电子能受热激发挣脱共价键。硅和锗在常温时,电子——空穴对的密度和它们的原子密度的比值分别为:

$$\frac{1.4 \times 10^{10}}{5.2 \times 10^{22}} \approx 3 \times 10^{-13}; \quad \frac{2.5 \times 10^{13}}{4.4 \times 10^{22}} \approx 6 \times 10^{-10}$$

这里应强调指出,硅和锗中的自由电子密度 n_i ①(或空穴密度 P_i)是随温度改变的。在绝对零度情况下,所有共价键全部稳定, $n_i(0^\circ K)=0$ 或 $P_i(0^\circ K)=0$,温度越高, n_i 或 P_i 越大。半导体的导电能力随温度升高而增加,即半导体的电阻率具有负的温度系数。

硅和锗的价电子同样都处在共价键中,但挣脱共价键所需要的能量却不同。一个价电子挣脱共价键所需的最小能量称为激活能,用符号 E_g 来表示,室温情况下硅和锗的 E_g 约为1.1和0.72电子伏特(简写为 ev)。1 ev 就是一个电子从低电位点A到高位点B所获得的能量,A、B两点的电位差为1伏特。对锗来说,凡得到能量 $\geq 0.72ev$ 的价电子都能激发形成电子——空穴对;对硅来说,则必须得到能量 $\geq 1.1ev$ 的价电子才被激发。这就是为什么在室温下锗的 n_i 比硅的 n_i 要大得多的原因。

在本征半导体中,用扩散的方法人为地掺入其它元素的少量原子,这些原子对半导体基体而言,叫做杂质原子。而掺有杂质的半导体,则称为杂质半导体。

常用的杂质有两大类:三价元素,如铟(In)、硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)等,统称为受主杂质;五价元素,如砷(As)、磷(P)、锑(Sb)等,统称为施主杂质。

1. P型半导体 当本征半导体掺入少量的三价受主杂质时,空穴密度 P ,便大大地增加($P \gg P_i$),而自由电子密度 n ,却相应地减少($n \ll n_i$)。即空穴是多数载流子(简称多子),电子是少数载流子(简称少子),称这种杂质半导体为P型半导体。空穴的增加,是由于受主杂质大量提供空穴的结果。可近似地认为,每一个受主原子都提供一个空穴,解释如下:

图1—5(a)是P型硅晶体结构示意图。图中一个硅原子被杂质硼原子所代替。由于硼只有三个价电子,为了与相邻4个硅原子构成4个共价键,它从相邻的硅原子那里夺来一个价电子(称电离),便成为一个负离子。而在被夺去的一个价电子的地方产生一个空穴,形成一个不完整的共价键。硼原子电离所需的能量(电离能)只有0.044电子伏特,比硅的激活能(1.1 ev)小得多。在室温情况下,几乎掺入的全部硼原子都能电离,即每一个硼原子都产生一个负离子——空穴对。

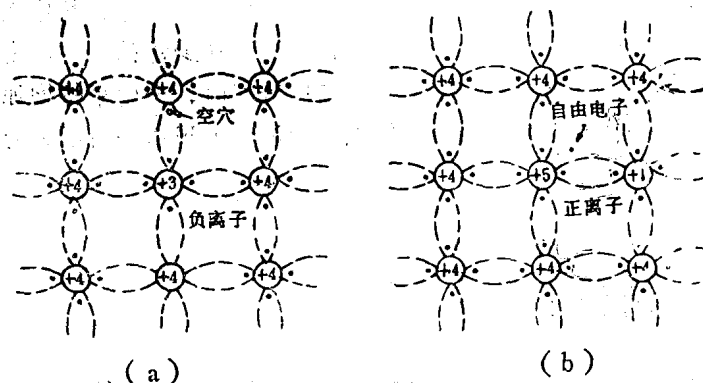


图1—5 P型和N型硅半导体结构示意图

注①下标i、p、n分别表示本征半导体, p型半导体, n型半导体。

假定掺入的硼只占硅的一百万分之一（即 10^{-6} ），那么硼原子的密度 $N_A = 5.2 \times 10^{22} \times 10^{-6} = 5.2 \times 10^{16} \text{厘米}^{-3}$ ，这个数目比本征硅中电子—空穴对的数目（ $1.4 \times 10^{10} \text{厘米}^{-3}$ ）大三百多万倍。P型半导体比本征半导体的导电能力剧增的特征，在半导体器件制作中得到充分的利用。

2. n型半导体 在本征硅中掺入施主杂质（如砷）时，每个砷原子与周围的硅原子形成共价键之后，还多余一个电子，因此这个电子容易挣脱施主原子成为自由电子。失去这个多余电子的施主成为正离子，如图1—5(b)。由于施主电离所需的能量仍是 0.044eV ，比本征硅的激活能 1.1eV 小得多。所以掺入的少量施主杂质，在室温下几乎全部电离，致使硅材料中的电子数目大大增加，空穴数目相应地减小。这时自由电子是多子，空穴是少子。即电子浓度 n_e 大大地大于空穴浓度 P_n 。这种掺有施主杂质的半导体就叫n型半导体。

3. 载流子的产生和复合 上面讲过，半导体中产生载流子有两种情况：一是本征半导体中本征激发产生电子—空穴对，它的特点是电子和空穴成对产生，两者都参加导电；二是杂质电离，在杂质半导体中产生多数载流子。杂质电离的特点是正离子与电子（或负离子与空穴）成对产生，只有电子（或空穴）对导电有贡献，而杂质离子束缚在晶格内不能移动，对导电无贡献。无论本征激发，还是杂质电离，都随温度升高而加剧。

在一切半导体材料中，在原子获得能量而产生电子—空穴对的同时，还会发生自由电子填入空穴释放能量，使破坏的共价键恢复，这时便失去一个电子—空穴对，此过程称为复合。显然，复合只是在自由电子凑巧与一个空穴碰在一处时才会发生，而且电子和空穴越多，复合的可能性越大。粗略地说，可认为单位体积内每秒复合掉的电子—空穴对数（叫做复合率 M ）正比于电子和空穴的密度。即：

$$M = QPn \quad (1-1)$$

式中： Q 是一个比例常数，叫做复合系数；

P 和 n —半导体中空穴密度和电子密度。

应该指出，前面讲过的 P_i 、 n_i 、 P_p 、 n_p 、 P_n 、 n_n 等都是指动态平衡的数值。所谓动态平衡，就是指在一定温度下，电子空穴对产生率 g 和复合率 M 相等这一状况。此时，单位体积内每秒产生的电子—空穴对数正好与复合掉的对数相等。因此，对于掺杂后制成的半导体材料中的电子密度和空穴密度将不随时间改变。换句话说，在同一温度下，本征硅和少量掺杂的P型硅、n型硅的电子—空穴对产生率 g 都相同，并等于复合率 M 。当温度升高时，产生率将增加为 g' 而大于 M ，使原来的平衡破坏。但此时的复合率也随二种载流子浓度乘积增加而增大为 M' ，并等于 g' 到达新的动态平衡。

第二节 PN结和半导体二极管

PN结是绝大多数半导体器件的基本构成部分，例如二极管就是一个加上引出线的PN结，三极管包含两个PN结。发生在PN结中的物理现象，是半导体器件中最基本的物理过程。了解这一过程，对于掌握半导体器件的特殊性很有帮助。

一、PN结的形成

在一块本征半导体材料上，把一半做成 n 型，另一半做成 p 型，这样一个整体就是PN结。

为简单起见，假定两边掺杂程度相同，即受主杂质浓度等于施主杂质浓度 $N_A=N_D$ 。未结合前，两边的杂质离子和载流子分布示意于图1—6(a)。它的特点是：(1)杂质均匀分布；(2)每一个杂质离子附近都有一个极性相反的载流子，使整块材料每一部分内的正电荷量都和负电荷量相等，它们的作用互相抵消，好象不带电一样，这种情况叫做中性；(3)两边的少数浓度由热激发确定，即由环境温度决定。

当P、N材料结合时，由P区的空穴密度 P ，远大于N区空穴密度 P_n ，空穴就要从P区向N区扩散。同样，N区的电子也向P区扩散。随着扩散的进行，靠近N区的P区部分失去空穴，留下带负电的受主离子，其电位逐渐降低；靠近P区的N区部分失去电子，留下带正电的施主离子，其电位逐渐升高。于是在PN结两侧就出现了一个电位差，N侧为正，P侧为负。称这一电位差为位垒，如图1—6(b)。由于电位差的存在，在交界面附近就出现一个内电场 $E_{内}$ ，它的方向由N区指向P区，对空穴和电子的扩散起阻碍作用。当位垒逐渐升高后，内电场也逐渐加大，能够越过位垒扩散的空穴和电子越来越少。由扩散形成的电流称为扩散电流 $I_{扩}$ ，它随位垒的降低而增大。

在多数载流子(P 和 n)向另一区扩散形成位垒的同时，由于交界处的N区电位高于P区，P区内的少数载流子(电子)因热激发而跳进电场范围内时，就会被内电场拉向N区。同样，N区的少数载流子(空穴)也会因热激发跑进电场范围内而被拉向P区。这一过程，称为载流子漂移。

因漂移形成的电流称为漂移电流 $I_{漂}$ 。基于内电场只在位垒区存在，只有由于杂乱运动跑到位垒边沿的少数载流子才受到内电场拉力，位垒区以外的P区和N区，不存在内电场，原有的少数载流子(n_p 和 P_n)仍旧作无规律的运动。因此，这些漂移少数载流子的数目只取决于少数载流子密度 P_n 和 n_p (即决定于温度)，以及与位垒的有无有关，而与位垒的高低无关。因为只要有位垒存在，少数载流子达到位垒边缘就要被拉过位垒。可见 $I_{扩}$ 和 $I_{漂}$ 的方向相反。

$I_{扩}$ 受位垒的影响，位垒越高，能量大到足够越过位垒的多数载流子越少， $I_{扩}$ 越小；而 $I_{漂}$ 却取决于少数载流子密度。于是在位垒增高使 $I_{扩}$ 逐步减少到正好和 $I_{漂}$ 相等时，便达到动态平衡。这时的位垒 V_{ϕ} 是未加外电压时P区与N区的电位差，一般称为接触电势。PN结作成后， V_{ϕ} 取决于材料、温度及掺杂浓度，硅的 $V_{\phi}=0.7$ 伏左右，锗的 $V_{\phi}=0.2$ 伏左右。

应强调指出，动态平衡并不表明扩散和漂移都中止，而是 $I_{扩}=I_{漂}$ ，即扩散与漂移引起的越界载流子数目相等。

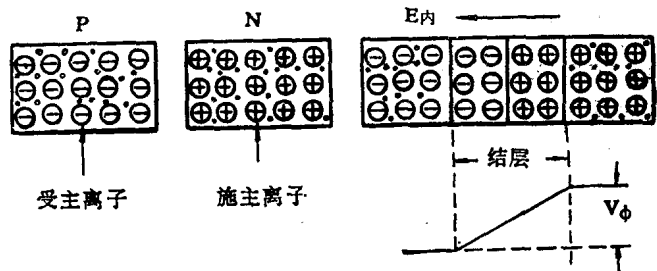


图1—6 PN结的形成

(a) PN材料结合前； (b) PN结的电位分布

另外，在位垒区内，由于存在内电场，所以电子和空穴将会离开。这一区域，即载流子近似耗尽，故又名空乏区或耗尽区。因为电子和空穴极少，不能移动的杂质离子的正负电荷便“裸露”出来，左侧为负电荷，右侧为正电荷，因此还称为空间电荷区。此外，如前所述，由于电场阻止多子的扩散，所以位垒区可称阻挡层。既然位垒区内载流子极少而只有不能移动的正、负离子，因此，PN结较之两边的N区和P区，就呈现高得多的电阻，于是人们有时也称它为高阻区。高阻区、位垒区、空乏区（耗尽区）、空间电荷区和阻挡层，指的都是同一部位，不同的名词只是强调了它一个方面的物理特点。在实际PN结中，这个区域极薄，约为零点几微米至几微米，又称为结层。

未加外电压时，PN结的特点是P区和N区交界面处产生了一个极薄的结层。结层以内，有内电场，有正负离子空间电荷，电子和空穴极少。结层以外的P区和N区保持电中性，不存在电场，少子和多子的密度都与P区、N区未结合以前相同。

二、PN结的单向导电特性

当PN结加正偏压（见图1—7a）时，此电势在PN结内产生一个由P指向N的外电场，它的方向与内电场相反；使内电场削弱，位垒降低，结层变薄，空间电荷减少。图中斜线部分是未加外电压时空间电荷区，加正向偏压后，这一部分空间电荷就消失了。同时，位垒降低的高度正好等于外加电压 $V_{正}$ 加到PN结上的电压 V 。此时，位垒降为 $(V_{\phi} - V)$ ，结果使更多的多子能越过位垒，即 $I_{扩} \gg I_{漂}$ ；外电路中的电流 $I_{正} = I_{扩} - I_{漂} \approx I_{扩}$ 。

当外电场与PN结内电场方向一致时（都是从N指向P），外电场加强内电场，使位垒升高，结层变厚，如图1—8。当反向电压 $V_{反}$ 足够大时，位垒 $(V_{\phi} + V_{反})$ 升高到使得 $I_{扩} \approx 0$ ，这时反向电流全部是少子漂移电流，即 $I_{反} \approx I_{漂}$ 。上节讲过，少子是由于热激发产生的，少子密度决定于温度，而 $I_{漂}$ 又全部是由少子构成，于是 $I_{反}$ 就决定于环境温度。这个 $I_{反}$ ，通

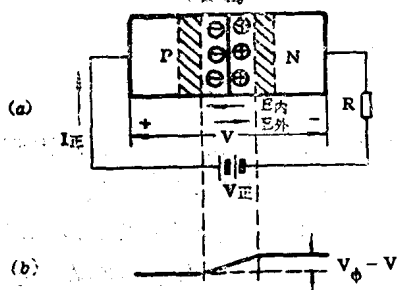


图1—7 PN结加正偏

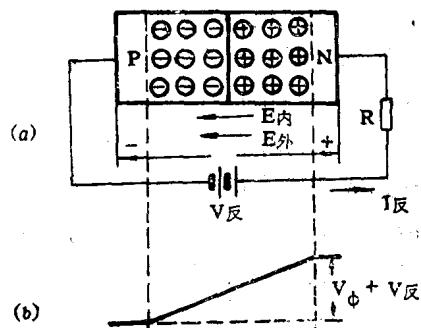


图1—8 NP结加反偏

常称它为反向饱和电流 I_s 。“饱和”指结层边缘少子全被拉过对方， $I_{反}$ 达到饱和。

以上分析表明，PN结加正偏导通（ $I_{正}$ 大），加反偏截止（ $I_{反}$ 很小）。这就是PN结的单向导电特性。

三、二极管伏安特性

1. 不对称PN结 PN结加上引线和管壳，就成为半导体二极管。通常用符号 $\rightarrow|$ 来表

示, 左边为P区(即为正极), 右边为N区(即为负极)。实际生产的二极管, 因P、N两区掺杂的比例不同, 所以称为不对称PN结。当P区比N区掺杂多, 即 $N_A \gg N_D$ 时, 称为 P^+N 结。由于 $N_A \approx P_p$, $N_D \approx n_n$, 所以P区多子浓度 $P_p \gg N$ 区多子浓度 n_n 。当 P^+N 结处于正偏时, 虽然两区的多子都要向对方扩散, 但从N区向P⁺区的扩散(称反注入)可忽略不计, 而P⁺区向N区的扩散则起主导作用。 P^+N 结处于反偏时, 反向饱和电流 I_s 取决于两区可能性大, 中原有少子密度 P_n 和 n_p 。因为 $P_p \gg n_n$, 即P区多子(空穴)浓度大, 它与少子电子复合的复合多, 于是 n_p 就小多。同样N区多子(电子)浓度小, 它与少子空穴复合的可能性小, 复合小, 于是 P_n 就大得多, 所以 $n_p \ll P_n$ 。这样, 反向导电时是 P_n 起主导作用, n_p 对 I_s 的影响可以忽略。可见, 加强P区掺杂使得 P^+N 结在加正、反偏时, 都是N区少子(注入少子和原有少子)起主导作用。换句话说, P^+N 结的主要物理过程都是集中在弱掺杂的N区。事实上, 不对称 P^+N 结的结电容, 击穿电压, 开关时间等电参数都主要取决于电阻率较高(弱掺杂区)的N区, 这对于生产上控制成批产品参数的一致性是很有好处的。不对称结的另一个优点是它在工艺上比较容易实现。因此, 实际使用的二极管都是不对称PN结(不是 P^+N 结, 就是 N^+P 结)。

2. 二极管的伏安特性 二极管的伏安特性就是二极管的电流与其外加电压的依从关系, 如图1—9所示。它可分成以下三段:

(1) 正向特性: 从图1—9中坐标原点到a点这一段, 此段正向电流很小, 超过a点以后, 正向电流猛增。a点的电压可看作二极管的导通电压, 也可看作是导通时二极管两端的正向电压。导通电压对小功率硅管来说约为0.6~0.8伏, 小功率锗管约为0.2~0.3伏。

二极管正向电流不能超过它的最大容许值, 否则管子要过热烧毁。这个最大值在手册上可查到。

(2) 反向饱和区: 二极管加反向偏压, 从o到b点这一段(见图1—9)是反向饱和区。反向电流等于反向饱和电流 I_s , 几乎不随电压改变。 I_s 的大小随管子类型而不同, 一般小功率硅二极管 I_s 小于0.1微安, 小功率锗二极管 I_s 约为几微安。

(3) 电压击穿区: 反向电压超过一定值(图1—9中b点)以后, 反向电流猛增, 这时PN结被反向击穿。引起击穿的原因, 一是外加电场强度过强, 以致于足以直接破坏共价键而把价电子拉出, 使载流子的数量剧增。这种击穿称为齐纳击穿, 常发生在结层较薄的PN结。击穿电压约在4—7伏以下。另一种情况是外加电场很大(但不足以直接破坏共价键), 载流子所获得的能量有可能把共价键中的电子打出, 而被撞出的电子又可能撞击出新的电子, 于是 I_s 剧增, 此种击穿称为雪崩击穿, 它常发生在结层较厚的PN结中, 击穿电压约高于4—7伏。若击穿电压在4—7伏间, 则上述两种情况都存在。分析表明, 齐纳击穿的击穿电压随温度的升高而降低, 具有负的温度系数; 雪崩击穿的击穿电压随温度的升高而升高, 具有正的温度系数。

应该指出, 管子的击穿并不一定使管子损坏, 这要看管子损耗功率的大小, 即 $P = I_{反} \cdot V_{反}$

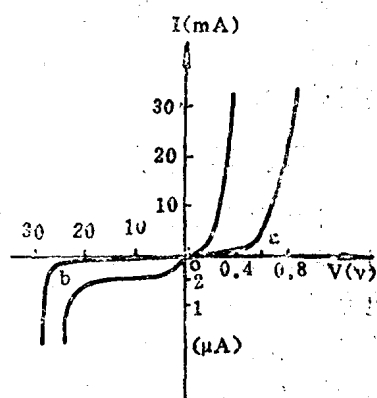


图1—9 二极管的伏安特性曲线

否超过管子本身所能承受的数值。若超过，管子损坏，称为热击穿；反之，不损坏。总之，只有当电压击穿转化为热击穿才会烧坏管子。一般二极管应在反向电压不致引起击穿的范围以内使用。

3. 二极管电流的近似计算式 理论分析得出，二极管电流与电压（正压或负压）的关系可写成下列公式：

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

式中：\$I_s\$——二极管的反向饱和电流（在二极管制成后，\$I_s\$只与温度有关）；

\$V\$——外加电压；

\$V_T\$——与温度有关的参数，称为温度的电压当量。常温下为0.026伏。

应该指出，由于温度变化对半导体中载流子的数目影响较大，因此二极管的伏安特性也受到温度的影响。当温度升高时，二极管的正向电流和反向电流都增加，同时反向击穿电压也发生变化。温度增加对反向特性的影响大于正向特性，使反向饱和电流显著增加。

硅管的允许工作温度（150℃以下）比锗管（90℃以下）高，在同样的PN结面积条件下，允许通过硅二极管的电流比锗管大，这是硅管的一个优点。因此，大功率二极管几乎都是用硅材料制成的。

四、二极管的电容效应

上面讲的二极管的单向导电特性是在工作频率较低的前提下得出的。当工作频率很高时，由于二极管存在电容效应，它的单向导电特性将会消失。所谓电容效应，就是PN结象电容器一样具有“存电”和“放电”的能力，即PN结和电容器一样，同样具有类似的金属板（二边电阻率低的P、N区）、正和负电荷、介质（电阻率高的阻挡层）。二极管的电容分为结层电容和扩散电容两种。

1. 结层电容 结层电容\$C_T\$是PN结层内不能移动的空间电荷形成的，如图1—10。当外加正偏时，PN结内电场被削弱，外电场将使多子向交界处运动，中和了耗尽层内的正、负离子，造成积累的空间电荷减少，阻挡层变薄，这相当于PN结“放电”，如图（a）；反之，当PN结加反偏时，PN结内电场会增强，多子离开PN结，阻挡层加宽，其中的正、负离子增多，这类似于PN结的“充电”，如图（b）。

结层电容\$C_T\$与电容量为常值的普通电容不同，它的大小与外加电压有关。在交流小信号电压的作用下，以阻挡层内电荷变化量\$\Delta Q\$与外加电压变化量\$\Delta V\$之比来定义\$C_T\$，即

$$C_T = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \text{。根据理论推导可知：}$$

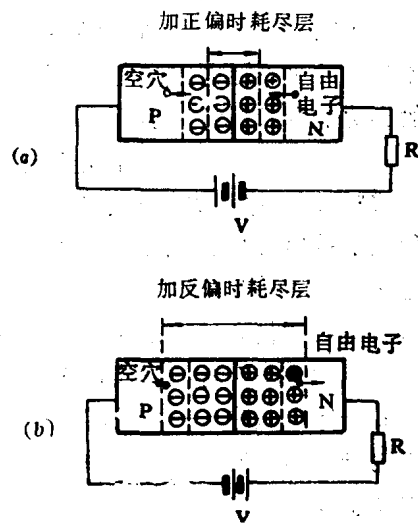


图1—10 结层电容的充放电效应
(a) 正偏；(b) 反偏

$$C_T = \frac{M}{(V_0 - V)^n} \quad (1-3)$$

式中 V_0 为PN结的接触电位差； V 为外加电压（正偏时， $V > 0$ ；反偏时， $V < 0$ ）； M 为常数； n 是电容器的变化指数，它的值可由1/3到3~4，决定于PN结的不同结构。上式说明，当 $V < 0$ ，则 C_T 将随 $|V|$ 增大而下降。利用 C_T 随 V 而变化的特点，可制成变容二极管。

结层电容 C_T 有的也称为势垒电容或几何电容。

2. 扩散电容 扩散电容 C_D 的形成与结层电容 C_T 不同，它是由载流子在扩散过程中的电荷积累引起的。当PN结正偏增大时，在图1—7N区中，由P区注入少数增加了 ΔQ ，其浓度分布将由图1—11中曲线1变到曲线2；反之，在正偏减小时，注入少数积累减小，如曲线3所示。由于电中性的要求，n区中的多子积累也相应增加和减少。这种随外加电压增、减而电荷相应增、减的现象，就相当于PN结有一个等效电容，称为扩散电容。图中 $x=0$ 处是结层靠N区的边缘， P_{n0} 为n区在平衡时空穴浓度。

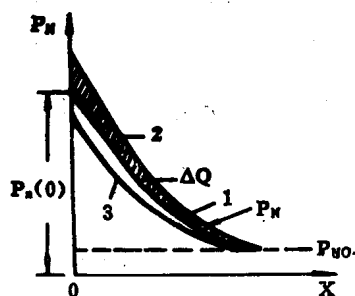


图1—11 正偏变化引起注入少子浓度的变化

应该指出，上述物理过程也同样在P区发生，但由于是P+N结，N区向P区的反注入可忽略，所以扩散电容 C_D 主要由弱掺杂的N区决定。

理论分析表明：扩散电容 C_D 与通过PN结的电流成正比，因此正偏时，它的容量较大，而反偏时则可忽略。

五、二极管的微变等效电路和参数

1. 二极管的等效电路 图1—12中的 R 和 C 就是线性电阻器和线性电容器的等效电路。利用等效电路，能很方便地写出电阻和电容的端电压 V 和流过其中电流 I 的关系。二极管也同样可以用一个等效电路来表示它在电路中的性能。但和一般的电阻、电容相比，有两点不同：（1）二极管是一个非线性器件；（2）二极管是几个电阻和电容的结合总体。现在就针对这两点进行分析。

通常，凡伏安特性能写成线性方程的元件，就是线性元件。因此，线性元件的电压、电流关系服从欧姆定律，即电压与电流成正比， $R = \frac{V}{I}$ 这一关系绘在 $V-I$ 坐标中，是一条过原点的直线，如图1—13中虚线。

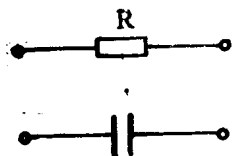


图1—12 线性电阻、电容

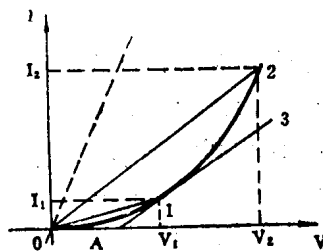


图1—13 线性及非线性元件的伏安特性

二极管 $V-I$ 关系不是直线,在前面已讨论过。图1—11中实线 $A-1-2$ 表示二极管正向性曲线,在它上面任取两点1和2,这两点直流电阻分别为:

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1} \text{ 和 } R_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (1-4)$$

很明显, $R_1 > R_2$ 。如果要写出对任意大小电压与电流都适应的计算式,即得式(1—2)。这个式子不能用 V 和 I 的线性方程来代替,严格说来不使用等效电路来代替它。但是,如果对电压、电流的大小作一些规定,例如,电压只能是 V_1 ,这时二极管就可用 R_1 来代替,因此可按式(1—4)绘出它的等效电路。请注意式(1—4)中 V_1 和 I_1 是指二极管的直流电压和直流电流,所以 R_1 是二极管的直流电阻。二极管更多是用在如图1—14那样的电路中,对它加上直流电压 V_1 和一个小交流电压(即信号) ΔV ,希望求出与 ΔV 相对应的 ΔI ,其 $\frac{\Delta V}{\Delta I}$ 称作二极管在直流电压 V_1 时的小

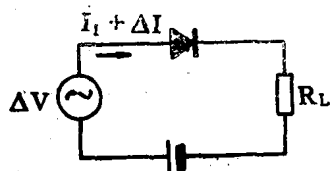


图1—14 二极管应用于微变电路

信号等效电阻 r 。即

$$r = \left. \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_{V=V_1} \quad (1-5)$$

从图1—13上求 r 很容易,只要过点1作二极管特性曲线的切线(图1—13中直线1—3),它的斜率 $\frac{dI}{dV}$ 正好是小信号等效电阻的倒数。从图1—13不难看出:通常二极管的直流电阻大于它的交流电阻。

如果用式(1—2)表示PN结理想的伏安特性,可求出在指定任何直流工作点上的交流电阻理论值 r_d 。即

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_1} = \left. \frac{d \left[I_s \left(e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1 \right) \right]}{dV} \right|_{V=V_1} = \frac{I_s e^{\frac{V_1}{V_T}}}{V_T} \approx \frac{I_1}{V_T}$$

当 $T=300^\circ\text{K}$ 时, $V_T \approx 26$ 毫伏,上式可改成

$$r_d = \frac{26}{I_1} \quad (1-6)$$

式中 I_1 是二极管直流工作点的直流电流,以毫安为单位; r_d 以欧姆为单位。

图1—15(a)、(b)绘出了二极管的示意结构和微变等效电路,图(b)中 r_d 代表PN结交流电阻的理论计算值(式1—6), C 是PN结的总电容。 r_x 代表从二极管正极 A 到负极

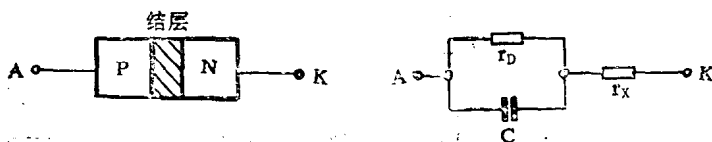


图1—15 二极管的示意结构和微变等效电路
(a) 结构图; (b) 等效电路

K之间的全部杂项电阻(P、N两区的体电阻, A、K的引线电阻等), 它的阻值很小, 相对于 r_d 可忽略。对于实际的二极管来说, 从二极管特性曲线上按式(1-5)用图解法求出的交流电阻为

$$r = r_d + r_s \approx r_d \quad (1-7)$$

【例题1-1】图1-14中二极管的伏安特性曲线如图1-16(a)所示。若二极管的直流工作点Q(即不加 v_s 时)的 $I_D = 2 \text{ mA}$ 。

当 $v_s = 0.02 \sin \omega t \text{ (V)}$, $R_L = 50 \Omega$, 试求流过二极管交变电流的最大值 I_{dm} 及其上的最大交变电压 V_{dm} 。

解: 根据式(1-6)得

$$r_d = \frac{26}{I_D} = \frac{26}{2} = 13(\Omega)$$

$$\therefore I_{dm} = \frac{V_{sm}}{R_L + r_d} = \frac{20}{50 + 13} = 0.317 \text{ mA}$$

$$V_{dm} = I_{dm} r_d = 0.317 \times 13 = 4.12 \text{ mV}$$

r_d 也可由作图求得, 即在图1-16(a)中的曲线Q点处作切线, 取其增量 ΔI_D 和 Δv_D ,

则 $r_D = \frac{\Delta v_D}{\Delta I_D}$ 。用 r_D 可得图(b)的微变等效电路。

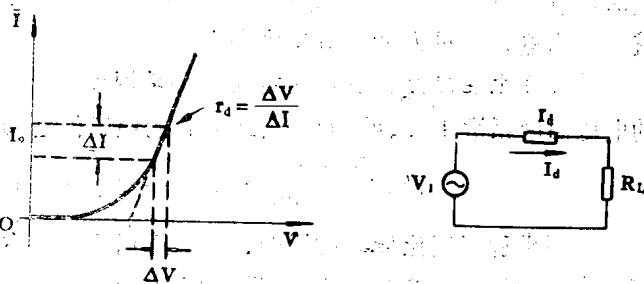


图1-16 例题1-1图

(a) 伏安特性曲线 (b) 微变等效电路

2. 二极管的主要参数 用于整流的二极管主要参数是最大整流电流, 它是指长时间使用时, 允许流过的最大正向电流。另一个参数是最大反向工作电压, 它通常比击穿电压小得多, 为安全起见, 常以给出击穿电压值的一半作为最大反向工作电压。

此外还有反向饱和电流 I_s (它的数值愈小愈好)、最高应用温度及最高工作频率等等。

六、稳压二极管

1. 稳压管的稳压特性 二极管的反向击穿, 对于一般二极管是不允许的, 因为这有可能引起热击穿使管子损坏。但是, 若将流过二极管的反向电流加以限制, 反向击穿就不会转化为热击穿。由图1-17看出, 此时二极管上的反向电压降在一定反向电流范围内变化很小, 这就是稳压特性。利用稳压特性可以制成稳压管。

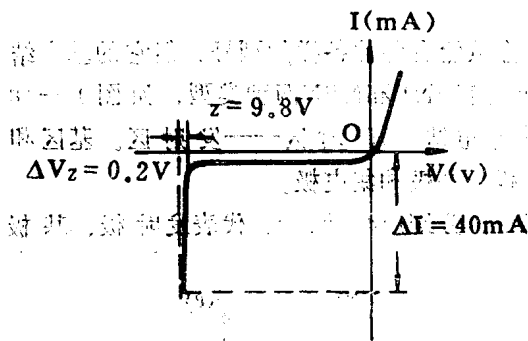


图1-17 稳压管的稳压特性图

2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 V_z : 即稳压二极管接于电路中, 其两端产生的稳定电压值。 V_z 随工作电流及温度的不同而稍有改变。对于同一型号的稳压管, 由于工艺等原因, V_z 有一定的离散