

全国电子类技工学校试用教材

电子电路基础

本书共分十章。主要包括：半导体二极管、三极管和场效应管的主要特性和参数；晶体管放大器的基本概念、分析方法、典型参数计算及其反馈电路；正弦波振荡器的类型及其特点；功率放大器的特点、类型和应用实例；晶体管直流电源的工作原理、类型和应用；可控硅和电子管的类型、特性和应用。

本书可作为技工学校教材及具有初中文化程度的青年自学用书。

本书由国营亚光电厂刘澈同志主编，余履琨同志参加了部分习题和实验的编写工作。成都无线电技工学校李明、赵旭忠同志担负本书的审稿工作。

全国电子类技工学校试用教材

电子电路基础

国营亚光电厂 刘澈 主编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

天津市新华书店发行

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17 3/4 字数 431,000

一九八二年十一月第一版

一九八二年十一月第一次印刷

印数：1—35,000

统一书号：15212·67 定价：1.47元

前 言

为了适应技工学校电子类专业的教学需要，不断提高技工学校的培训质量，加速实现我国的四个现代化，国家劳动总局、第四机械工业部委托北京、天津、上海三市和四川、广东两省的劳动局、电子工业主管部门，组织编写了技工学校电子类三个专业（无线电技术、半导体器件、电子计算机）的部分技术基础课和专业课十二种教材。计有：电工基础、电子电路基础、电子测量与仪器、无线电接收设备、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、半导体器件制造工艺、半导体工艺化学、晶体管原理、制图与钳工知识、半导体集成电路、电子计算机原理。

这套材料对于二年制（招收高中毕业生）和三年制（招收初中毕业生）的技工学校均适用。这些专业的普通课教材没有另行编写，建议采用国家劳动总局和第一机械工业部委托上海市劳动局、上海市第一机电工业局一九七九年组织编写的全国技工学校机械类通用教材中的普通课教材。我们在组织这套教材的编写时，注意到了这两套教材在内容上的衔接。

根据技工学校的培养目标和教学计划的要求，这套教材在强调加强生产实习教学的同时，注意了加强基本理论知识和对新技术、新工艺的吸收。由于技工学校在教学范围内还有许多问题需要探讨，加之这套教材还没有通过教学实践的检验，故先作为试用教材出版发行。

因为时间仓促，编写经验不足，这套教材难免存在一些问题，恳切希望广大读者批评指正，以便作进一步修改。

国家劳动总局 培训司

第四机械工业部教育局

一九八一年十二月

本书使用符号的说明

C	电容量	R	直流（静态）电阻
E	直流电动势或电源电压	r	交流（动态）电阻
$\dot{E}$	信号电动势向量或有效值	S	电压稳定度
F	直流反馈系数，传输系数的绝对值	s	电子管跨导
$\dot{F}$	交流反馈系数，传输系数	T	周期
f	频率	t	时间
Δf	频带宽度	U	直流电压或电压平均值
g_m	场效应管跨导	$\dot{U}$	交流电压向量或有效值
h	晶体管的 h 参数	$\tilde{U}$	纹波电压有效值
I	直流电流或电流平均值	u	随时间变化的电压
$\dot{i}$	交流电流向量或有效值	$\tilde{u}$	正弦交流电压
i	随时间变化的电流	W	稳压系数，电位器阻值
$\tilde{i}$	正弦交流电流	X	电抗值
j	虚数单位 $\sqrt{-1}$	$\tilde{x}$	交流信号向量或有效值（电压或电流）
k_T	电压温度系数	Z	阻抗值
K	直流放大倍数或传输函数	α	负载线的倾角，可控硅的控制角
$\dot{K}$	交流放大倍数或传输函数	β	交流电流放大系数
L	电感量	$\bar{\beta}$	平均电流放大系数
n	自然数，电路的级数	Δ	表示增量
N	线圈的匝数	η	效率，单结晶体管分压比
P	功率	θ	可控硅导电角
Q	回路品质因数	φ	相位角，相位移
q	滤波系数	ω	角频率（ $2\pi f$ ）

目 录

第一章 半导体二极管和三极管.....	(1)
§1-1 半导体的一般概念	(1)
§1-2 PN 结	(3)
§1-3 半导体二极管的特性和主要参数	(6)
§1-4 晶体三极管的特性和主要参数	(10)
§1-5 场效应晶体管	(16)
小结	(20)
复习题	(21)
实验一 半导体二极管和三极管的特性	(23)
第二章 晶体管交流放大器	(25)
§2-1 放大器的基本概念	(25)
§2-2 放大器的分析方法	(28)
§2-3 工作点的稳定	(35)
§2-4 h 参数及其等效电路	(40)
§2-5 放大器的输入电阻和输出电阻	(43)
§2-6 多级放大器的计算	(45)
§2-7 射极输出器	(46)
§2-8 场效应管放大器	(50)
§2-9 放大器的频率特性	(54)
§2-10 调谐放大器	(60)
§2-11 放大器的三种组态	(65)
小结	(66)
复习题	(70)
实验二 晶体管低频放大器	(71)
第三章 放大器中的反馈	(73)
§3-1 反馈的基本概念	(73)
§3-2 反馈的一般分析方法	(75)
§3-3 四种负反馈类型举例	(76)
§3-4 负反馈对放大器性能的影响	(84)
§3-5 直流负反馈的情况	(87)
§3-6 负反馈电路应用举例	(88)
小结	(90)
复习题	(91)
实验三 负反馈放大器	(93)

第四章 正弦波振荡器	(95)
§4-1 振荡的基本概念	(95)
§4-2 LC正弦波振荡器	(99)
§4-3 RC正弦波振荡器	(111)
§4-4 放大器的自激现象和消除方法	(118)
小结	(120)
复习题	(121)
实验四 LC正弦波振荡器	(123)
第五章 直流放大器	(124)
§5-1 直流放大器的基本电路	(124)
§5-2 差动式直流放大器	(128)
§5-3 线性集成电路 (运算放大器)	(136)
小结	(144)
复习题	(146)
实检五 差动放大器	(146)
第六章 功率放大器	(148)
§6-1 功率放大器的特点	(148)
§6-2 甲类功率放大器	(150)
§6-3 乙类功率放大器	(153)
§6-4 无输出变压器 (OTL) 功率放大器	(158)
§6-5 功率晶体管的散热	(161)
§6-6 功率管的安全使用	(162)
§6-7 应用举例	(162)
小结	(164)
复习题	(165)
实验六 功率放大器	(166)
第七章 调制式直流放大器	(167)
§7-1 调制与解调的概念	(167)
§7-2 调制器	(168)
§7-3 解调器	(174)
§7-4 调制式直流放大器举例	(178)
小结	(181)
复习题	(182)
实验七 调制器和解调器	(183)
第八章 晶体管直流电源	(184)
§8-1 整流电路	(184)
§8-2 滤波电路	(188)

§8-3 二极管的串并联用法	(194)
§8-4 硅稳压管稳压电路	(194)
§8-5 串联稳压电路	(197)
§8-6 实用电路举例	(205)
小结	(208)
复习题	(209)
实验八 串联稳压器	(210)
第九章 可控硅的应用	(211)
§9-1 可控硅的特性和参数	(211)
§9-2 可控硅整流原理	(214)
§9-3 可控硅触发电路	(217)
§9-4 应用举例	(223)
小结	(225)
复习题	(226)
实验九 可控硅的触发	(227)
第十章 电子管电路简介	(229)
§10-1 二极管及其应用	(229)
§10-2 三极管、四极管、五极管、束射管的特性和参数	(234)
§10-3 电子管交流放大器	(242)
§10-4 其他常用电子管电路	(250)
§10-5 电子管电路的特点	(263)
小结	(265)
复习题	(266)
实验十 电子管的特性	(267)
附录	(268)

第一章 半导体二极管和三极管

§1-1 半导体的一般概念

一、什么是半导体

人们按照物质的导电性能，通常将各种材料分为三类：

导体 $\rho < 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$

绝缘体 $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

半导体 $10^{-3} < \rho < 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

其中 ρ 为材料的电阻率。

也就是说，半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间。例如，制造半导体器件常用的硅、锗、砷化镓等都属于这一类。

物质的导电性能为什么存在着如此巨大的差异呢？这还得从物质的原子结构谈起。

大家知道，物质由分子组成，分子由原子组成，原子又由原子核和电子组成。原子核带正电荷，电子带负电荷，电子绕着原子核作旋转运动，而电子的运行轨道又分为若干层次，称为电子壳层，每层的电子数目又有一定的规则，最内第一层最多为两个电子，第二层最多为8个，第三层最多为18个，第四层最多为32个……，最外层电子最多不超过8个。外层电子离原子核最远，所以原子核对它的束缚力最

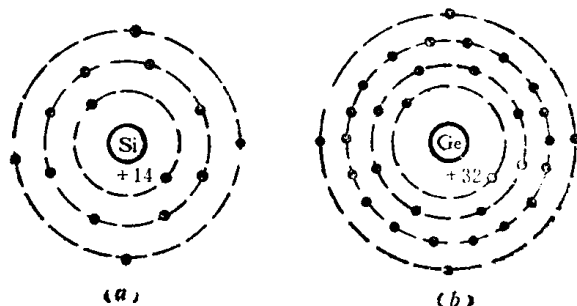


图1-1 硅和锗的原子结构
(a) 硅原子结构 (b) 锗原子结构

弱，也最容易在外界能量的作用下改变它的运行轨道。物质的许多化学、物理性质都取决于外层电子的数目，因此化学上把外层电子的数目叫做化合价，把外层电子叫做价电子。

在导体中，原子的外层电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，它们在外加电场的作用下逆电场而运动，形成了电流；绝缘体则相反，其外层电子很难成为自由电子，故其电阻率很高。半导体的情况介于二者之间。以硅、锗为例，它们分别有14个和32个电子，但外层均为4个，见图1-1，因此都是4价元素。

二、半导体的导电类型

1. 本征半导体

当硅或锗的很多原子排列起来构成整齐的晶体——单晶时，就会出现新的现象，外层电子不仅受到本身原子核的作用，同时还受到邻近原子的作用，这时，每个外层电子皆为两个原子核所共有，改变了原来的运行轨道，而处于一个新的平衡的公共轨道上，这种现象称为电子的共有化。为了说明这一现象，我们以硅为例，只考虑硅的4个价电子，其单晶结构如图1-2所示。

图1-2中排列整齐的原子之间有一个椭圆，它代表一对价电子的共有化轨道，这样对每

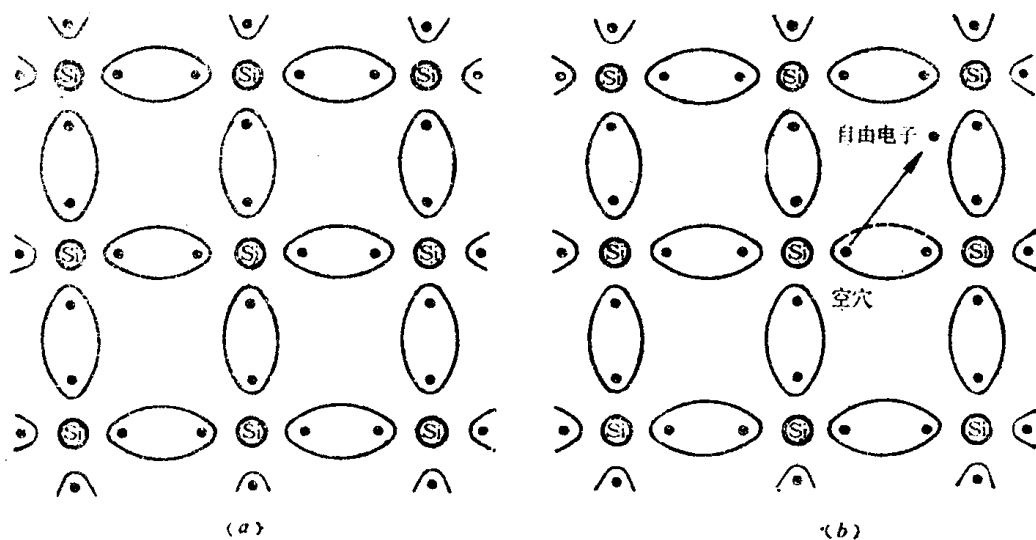


图1-2 硅单晶平面示意图

个电子而言，都相当于具有 8 个价电子，处于比较稳定的状态，所有价电子不易挣脱束缚而成为自由电子，因此导电性是很差的。这种由纯净的半导体原子组成的单晶称为本征半导体。

但是，在常温下，由于热激发，本征半导体中的少量价电子可以获得足够能量，离开共有化轨道而成为自由电子，同时留出一个显正电的空位，称为空穴。这种过程是随机的，即对某个电子来说，它可以离开轨道，也可以重新回到轨道（称为电子空穴对的复合）。但就统计观点来看，电子空穴对的数量取决于本征半导体的温度。

不论电子或空穴都是电荷的携带者，统称为载流子。它们在外加电场的作用下将如何运动呢？自由电子逆电场而运动，形成电子电流；至于空穴，在热的激发下，邻近的价电子可能迁移到某个空穴来，也可以重新离开这个空穴，运动是杂乱无章的。然而在外加电场的作用下，价电子的移动受到电场的定向作用，当一个邻近的价电子填补了某个空穴后，又留出了一个新的空穴，这个空穴又被后面的电子所填补，这样依次填补下去，电子逆电场方向作填补运动，相当于带正电的空穴顺电场方向运动，形成了空穴电流。

总之，在外加电场的作用下，半导体中同时出现了两种电流：电子电流和空穴电流。半导体中的总电流等于这两种电流之和，它取决于电子-空穴对的数量，即取决于温度，温度愈高，本征半导体的导电性越强。

本征半导体在常温下的导电性很差，并且其导电性与温度有密切的依赖关系，所以本征半导体不能用来制造半导体器件，必须采用掺杂质的方法来改善它的导电特性，形成 P 型和 N 型两种不同类型的半导体。

2. N 型半导体

在本征半导体单晶中，加入少量五价元素，如磷、砷、锑等，便构成所谓杂质半导体。图1-3表示在硅单晶中掺入少量磷原子的情形。

磷原子外层有五个电子，是五价元素，当硅原子晶格中出现一个磷原子时，它与周围四个硅原子形成共价键，只需要四个价电子，剩下一个价电子，则不受共价键的束缚，在外界能量的激发下，很容易成为自由电子。这样，掺有五价元素的半导体中存在着相当数量的自由电子，大大提高了其导电性能。这种半导体的导电性能主要取决于自由电子的数目，所以

称为电子导电机半导体，或简称N型半导体。但是，由于热激发，即使在N型半导体中也会存在一些电子空穴对，不过，在N型半导体中，自由电子的数目要比空穴数目多得多，故自由电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子。

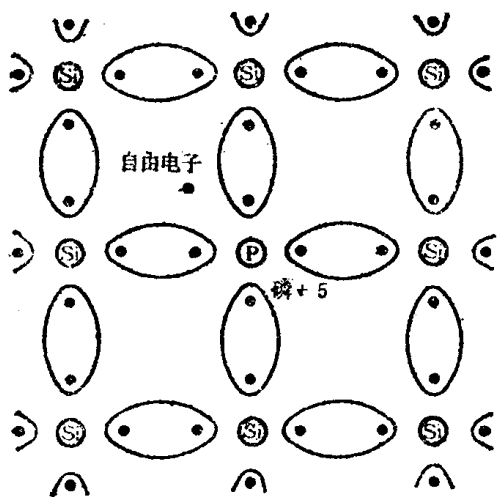


图1-3 N型半导体结构示意图

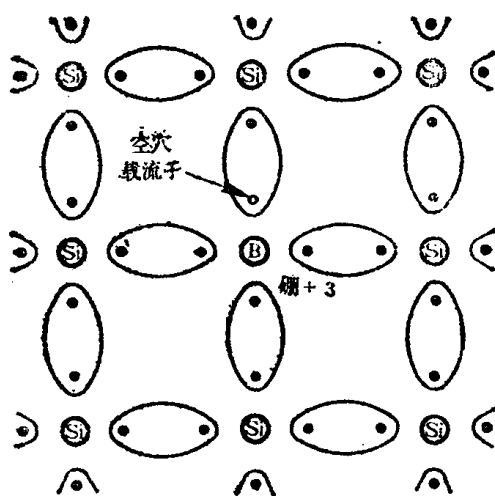


图1-4 P型半导体结构示意图

3. P型半导体

在本征半导体单晶中，加入少量的三价元素，如硼、铝、镓等，也能构成杂质半导体。图1-4表示在硅单晶中掺入少量硼原子的情形。

硼原子外层有三个价电子，它与周围的硅原子形成共价键时，缺少一个价电子，在共价键结构中留出一个空穴，所以掺有三价元素的半导体中存在着很多空穴，其导电性能主要取决于空穴的多少。这种半导体称为空穴导电半导体，或简称P型半导体。

同样，由于热的激发，P型半导体中也存在少量电子空穴对，不过P型半导体中空穴的总数大大超过自由电子的数目，故这时空穴为多数载流子，电子为少数载流子。

必须指出，不管是P型或N型半导体，虽然多数载流子对半导体的导电性能起着决定性作用，但少数载流子是由热激发产生的，所以它与温度有着密切的关系。少数载流子产生的电流直接影响半导体器件和电路的温度特性。通常是一个不可忽视的因素。

§1-2 P N 结

一、PN结的形成

设想一块P型半导体和一块N型半导体互相紧密地结合在一起，这时，在接触界面上形成一个很薄的特殊的区域，通常称为PN结。PN结是制造半导体器件的基础。下面将叙述PN结的形成原理和PN结的电气特性。

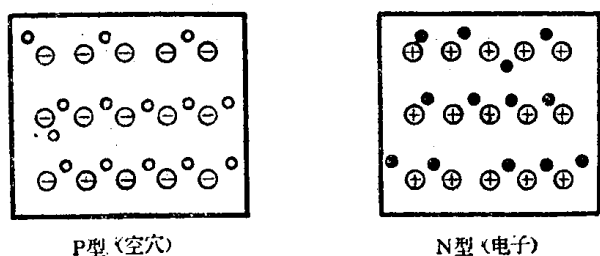
1. 扩散运动和漂移运动

在一盆清洁的水中，如果滴入一滴墨水，将会看到墨水逐渐向周围的清水中渗透。其实，这是一个普遍的规律，物质总是由浓度高的地方向浓度低的地方运动，在半导体中，载流子也总是向浓度低的地方运动，这种运动称为扩散运动。至于扩散运动的速度则取决于两地的浓度差和半导体材料的特性。

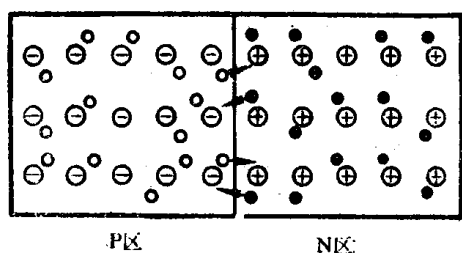
漂移运动指的是载流子在电场作用下产生的运动，漂移运动的速度则取决于电场的强度和载流子的特性。

2. 耗尽层和势垒的形成

在分析PN结形成的问题时，我们姑且先忽略少数载流子的作用，认为P型半导体中只有多数载流子——空穴；N型半导体中只有多数载流子——电子，如图1-5(a)所示。不要忘记，载流子虽带电荷，但就整个半导体来说仍然是电中性的，所以图1-5(a)中除画出两种载流子外，还相应地画出了带异电荷的离子。当两块半导体互相接触时，如图1-5(b)所示，由于扩散作用，接触面右边N区的电子向P区扩散，留下了一些正离子，而P区的空穴向N区扩散，留下了一些负离子（离子本身不能运动）。这样的过程本应一直进行下去，但事实上却并不如此，因为当P区出现了负离子，N区出现了正离子之后，它们之间便建立了电场，称为自建场，其方向见图1-5(c)所示，这个自建场阻止了两种载流子的继续扩散，当扩散作用和阻止作用（即对载流子的漂移作用）互相平衡时，就建立了扩散运动和漂移运动的平衡，从而形成了一个特殊的薄层——PN结。这时在界面两边出现了一层没有载流子的区域，称为耗尽层（载流子被耗尽），并且在PN结上形成了一个稳定的自建场，称为势垒（阻止载流子扩散的壁垒），如图1-5(c)所示。



(a)



(b)

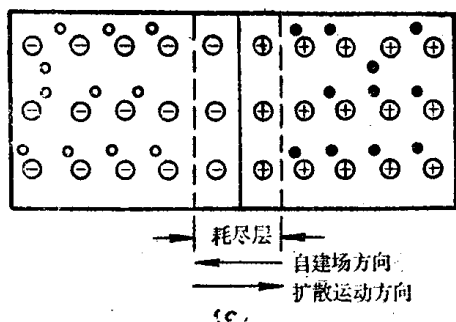


图1-5 PN结的形成

(a) 两块未接触的半导体 (b) 接触后的扩散过程
(c) 势垒的建立

平衡，从而形成了一个特殊的薄层——PN结。这时在界面两边出现了一层没有载流子的区域，称为耗尽层（载流子被耗尽），并且在PN结上形成了一个稳定的自建场，称为势垒（阻止载流子扩散的壁垒），如图1-5(c)所示。

值得注意的是，上面所说的平衡是指动态平衡。事实上，载流子既可以越过界面，也可以被自建场推回，其运动是随机的。但就载流子的总体而言，在任何瞬间，越过界面的总数是正、负平衡的，所以实际只能达到动态的平衡。这时，没有电流通过PN结。

二、PN结的特性

1. 外加正向电压的情况

如图1-6(a)所示，在PN结的两端外加正向电压，即P区接正极，N区接负极，这时外加电场的方向和势垒电场的方向相反，抵消了势垒的高度，这样，扩散和漂移失去了平衡，扩散作用占了优势。因此在PN结中以及外电路中产生了正向电流，由于外接电压的作用，使这个电流能够继续下去。外加电压越高，通过PN结的正向电流越大。这就是通常所说的二

极管正向导通的原理。

2. 外加反向电压的情况

如果在PN结上加上反向电压，即P区接负极，N区接正极，如图1-6(b)所示，则情况

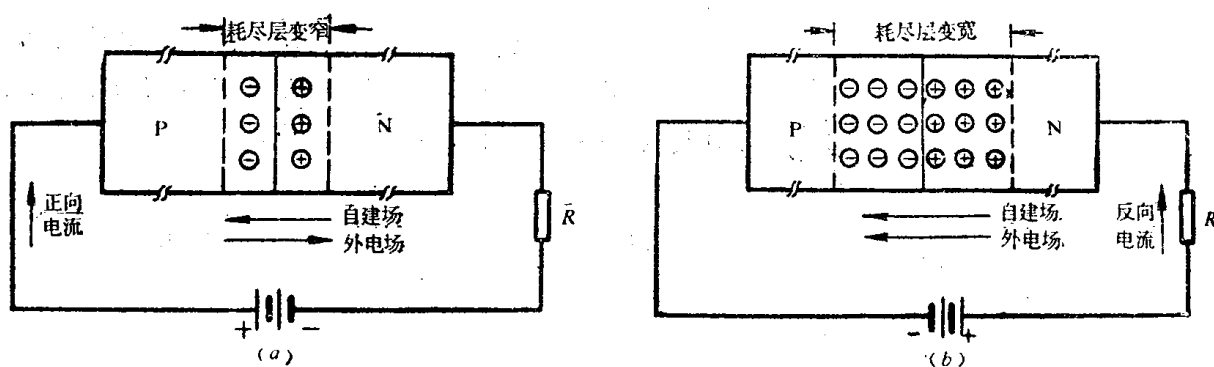


图1-6 PN结的正反向特性
(a) 外加正向电压 (b) 外加反向电压

与正向情况不同。这时外加电场与势垒电场方向一致，即提高了势垒高度，载流子的扩散无法进行，没有电流通过PN结以及外电路。因此我们说，在反向电压的作用下，PN结是截止的。

然而，无论是P型或N型半导体，其中都还有少数载流子，其电极性与多数载流子相反，所以多数载流子自建的势垒以及外加反向电场对少数载流子正好起了推动的作用，使它们形成了一个很小的反向电流，见图1-6(b)。当然，和正向电流相比，反向电流很小，但它与温度有密切的关系。

3. PN结电容

这里只介绍外加反向电压情况下的结电容。见图1-7(a)。

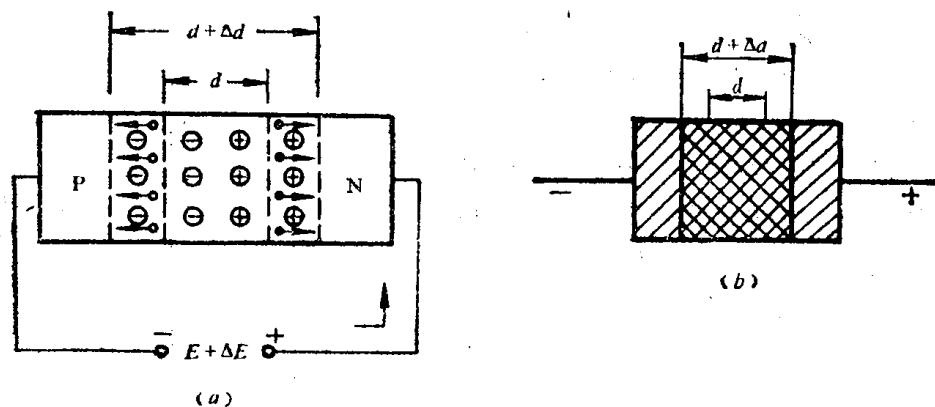


图1-7 PN结的电容
(a) 耗尽层宽度变化 (b) 结电容的等效电路

当外加电压为零时，耗尽层的宽度为 d ，这种情况好象平行板电容器一样。见图1-7(b)。导电性良好的P区和N区可看作电容器的两块极板，它们的距离为 d ；不包含载流子的耗尽层相当于电容器的介质。这样P区和N区之间就有一个等效电容 C_{j0} 。称为零偏压结电容。当外加反向电压增加时，P区和N区的载流子分别向电源负极和正极趋近，使耗尽层向两边加宽 Δd ，因此PN结的等效电容减小；随着反向电压的增加，PN结电容继续减小。一般，结电容 C_j 对外加电压的关系如图1-8所示，通常称 $C-V$ 曲线。

由于结电容的存在，限制了半导体器件的工作频率，增加了电路的复杂性。但是，另一方面，人们利用结电容对外加电压的关系，制成了变容二极管，广泛地用于各种电子电路

中。

另外,在外加正向电压时,由于载流子的扩散和积累作用,产生一个扩散电容,随着正向电压的增加而迅速增加,这里稍加提及,不再详述。

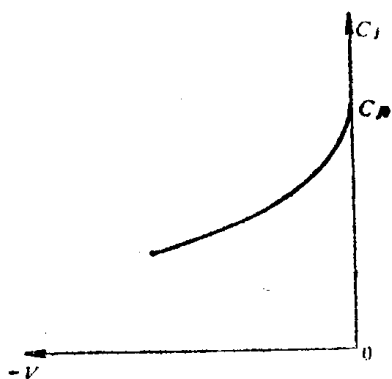


图1-8 PN结的C-V曲线

§1-3 半导体二极管的特性和主要参数

半导体二极管(下称二极管)一般由一个PN结和两条引出线所组成[⊖],安装在一个密封的壳体中。由于功能和用途的不同,二极管的外形各异,但一般可作如下分类:

(1) 按PN结的材料分类,可分为锗二极管和硅二极管。前者允许工作温度较低,一般制成中、小功率二极管,如2AP系列的二极管;后者允许工作温度较高,可制成中、大功率二极管,如2CP和2CZ系列的二极管。

(2) 按势垒的结构分类,可分为点接触二极管和面接触二极管。前者由于接触面积很小,因此结电容很小(通常1pF以下),宜于在高频和超高频下工作;后者由于接触面积大,允许通过较大的电流,多用作低频大功率整流器件,如2CP、2CZ系列的二极管。但也有些接触面很小的二极管,能在极高的频率下工作。

(3) 按用途分类,可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、变容二极管、开关二极管,以及微波二极管和特种二极管等。虽名目繁多,但它们都具有相似的伏安特性。

一、半导体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性反映了二极管电压和电流的关系,典型的二极管伏安特性示于图1-9,特性曲线的形状适合于各种二极管。

1. 特性曲线通过坐标原点

因为当外加电压 U 为零时,PN结处于动态平衡状态,没有电流通过外电路,即 $I = 0$ 。

2. 正向特性

如前所述,当外加正向电压时(或称正向偏置),开始出现较小的正向电流,而当电压抵消PN结自建电场之后,电流迅速增加。这样,特性曲线上出现了一个不太明显的拐点,它对应的电压 U_s 称为死区电压。 U_s 的值取决于PN结的材料和构造,锗管约为0.2V,硅管约为0.6V。在 U_s 之前的一段,电流很小,称为死区。当外加电压 U 继续增高时,二极管电流 I 急剧增加,直至二极管过热而烧毁。

3. 反向特性

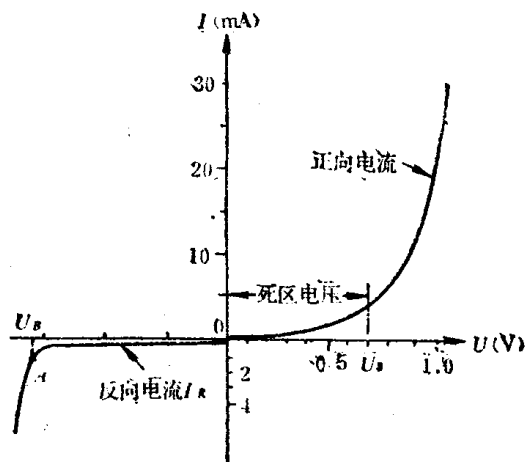


图1-9 二极管的伏安特性曲线

[⊖] 还有金属-半导体点接触和肖特基势垒二极管等,在此不作介绍。

当二极管加上反向电压（反向偏置）时，PN结截止，但由于少数载流子的存在，在电场的作用下产生漂移电流，再加上由于制造工艺的缺陷而引起的漏电电流，形成了一个很小的反向电流 I_R 。由于少数载流子的数量有限，所以反向电流几乎不随电压的增加而增加，故又称为反向饱和电流。但是，由于温度对少数载流子的产生起着决定作用，所以反向饱和电流随温度急剧上升，这是半导体电路中的一个特殊的问题。

当反向电压继续增加到达A点时，二极管电流突然猛增，称为击穿；这一点的电压称为击穿电压 U_B 。击穿的原因是，在强电场的作用下，电子可以挣脱共价键的束缚，产生大量电子-空穴对（齐纳击穿）；或是由于载流子的动能较高，将原子中的电子碰撞出来，形成大量电子-空穴对（雪崩击穿），从而使电流迅速增加。击穿以后，如果在二极管电路中串有电阻，则可起到限制电流的作用。当外加电压断开后，二极管可以恢复特性。但如果电流太大，致使二极管过热，则二极管被烧毁，这种现象称为热击穿。

二、二极管的主要参数

二极管的参数表征二极管的性能和使用特点，可作为选择管子的依据，主要参数如下：

1. 直流电阻（静态电阻）

二极管两端的电压 U_D 与通过二极管的电流 I_D 之比，称为二极管的直流电阻 R

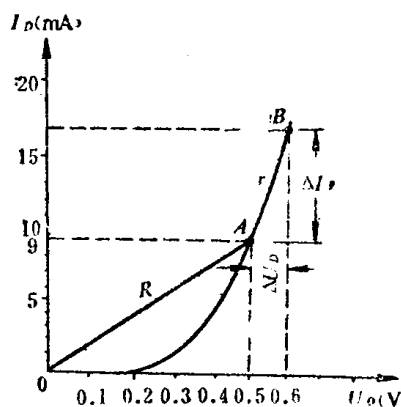


图1-10 二极管电阻的计算

$$R = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-1)$$

如图1-10所示，二极管工作于A点时， $U_A = 0.5$ 伏， $I_A = 9$ 毫安，则

$$R = \frac{0.5}{9} = 55(\Omega)$$

必须指出，随着工作点的改变，直流电阻也要变化。

2. 交流电阻（动态电阻）

交流电阻用来表示曲线在A点的陡度，即A点电压的增量 ΔU_D 和A点电流增量 ΔI_D 之比，称为二极管动态电阻 r

$$r = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \quad (1-2)$$

例如，在A点取电压增量 $\Delta U_D = 0.1$ V，相应的电流增量 $\Delta I_D = 8$ mA，则A点的动态电阻为

$$r = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{0.1}{8} = 12.5(\Omega)$$

通常，直流电阻和交流电阻都是愈小愈好，电阻愈小电流随电压的增加愈快。

二极管正向特性是非线性的，不同的工作点有不同的直流电阻和交流电阻，不能等同于一个不变的普通电阻。

3. 最大整流电流 I_{DM}

I_{DM} 指二极管作为整流管时所能够输出的最大平均电流值，也代表了整流管的功率容

量。

4. 最高反向工作电压 U_{RM}

为留有余量起见, U_{RM} 只取反向击穿电压的一半左右。

5. 最高工作频率 f_{max}

为保证二极管的单向导电性, 实际使用频率不得超过 f_{max} 。

6. 极间电容 C

C 指的是 PN 结电容与引线、壳体电容的总和, 一般结电容占主要成分。

三、二极管工作点的确定

理论上说, 只要知道二极管两端的电压就可以确定二极管的电流。但是, 当电压超过死区电压之后, 曲线很陡, 是无法精确地确定电流的。我们试确定图 1-11(a) 中的二极管的工作点。

1. 近似计算法

设电源电压为 E , 二极管电压为 U_D , 二极管电流为 I_D 。因为二极管与电阻 R 串联, 所以通过 R 的电流也是 I_D , 于是可以列出方程:

$$E = I_D R + U_D \quad (1-3)$$

因为二极管导通后, 其电压降与死区相差不多, 故先取 $U_D = 0.6$ 伏 (硅管), 则

$$E = I_D R + 0.6$$

$$I_D = \frac{E - 0.6}{R}$$

如果 $E \gg 0.6$, 则

$$I_D \approx \frac{E}{R} \quad (1-4)$$

例如, $E = 18V$, $R = 3k\Omega$, 则

$$I_D \approx \frac{E}{R} = \frac{18}{3} = 6 \text{ mA}$$

2. 图解法

如果不能满足 $E \gg 0.6V$, 则近似计算法的误差很大, 就应采用图解法。

式(1-3)中有两个未知数 I_D 和 U_D 。为了求出它们, 必须再建立一个方程。二极管正向特性曲线即是 I_D 和 U_D 的关系, 可写成 $I_D = f(U_D)$ 。满足这两个方程的解应该是两条曲线的交点。因此, 我们只要在伏安特性曲线 $I_D = f(U_D)$ 上作出式(1-3)的图象, 再求得它们的交点就行了, 见图1-11(b)。

根据代数知识, 式(1-3)代表一条直线, 直线上的两点可以这样确定:

A: 令 $U_D = 0$, 则

$$I'_D = \frac{E}{R}$$

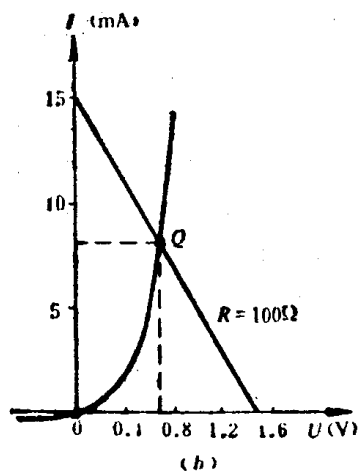
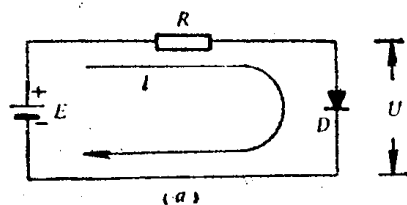


图1-11 确定二极管的工作点
(a) 二极管电路 (b) 工作点的确定

B: 再令 $I'_D = 0$, 则

$$U'_D = E$$

经过 $U_D = U'_D$ 和 $I_D = I'_D$ 两点连接直线, 称为负载线, 它与伏安特性曲线的交点即为所求的工作点 (U_D, I_D) 。

例如

$$E = 1.5\text{V}, R = 100\Omega$$

$$I'_D = \frac{E}{R} = \frac{1.5\text{V}}{100\Omega} = 15\text{mA}$$

$$U'_D = E = 1.5\text{V}$$

作负载线, 求出交点的坐标为 $U_D = 0.7\text{V}$, $I_D = 8\text{mA}$ 。

四、稳压二极管

利用PN结反向击穿的特性, 运用特殊的工艺方法, 可制成稳压二极管。它的反向击穿特性非常陡峭, 如图1-12(b)。

将稳压管接入稳压电路, 见图1-12(a)。则稳压管的工作点 U_A 、 I_A 可用图解法求得。如果外加电压 E 改变了, 负载线就跟着发生平移 (作法同上), 工作点移到 B 点。由于曲线很陡, 所以 $U_A \approx U_B$ 。也就是说, 虽然外加电压改变, 稳压管两端的电压基本保持不变, 这就起到了稳压作用。但要注意, 稳压管的电流是随着 E 改变的。

稳压管的主要参数有:

(1) 动态电阻 动态电阻的定义同一般二极管相似, 只是稳压管工作于击穿之后的一段。可以看出, 动态电阻越小则曲线越陡, 稳压性能越好。

(2) 稳定电压 稳定电压即稳压管正常工作时两端的压降。同一型号的稳压管只允许有很小的差异。

(3) 温度系数 温度变化 1°C 时, 稳定电压变化的百分比称为温度系数。因为PN结的击穿电压与温度有关, 所以稳压管的稳定电压亦受温度的影响, 如 $2\text{CW}20$ 的温度系数为 $+0.095\%/^\circ\text{C}$ 。一般情况下, 低于 6V 的稳压管为负温度系数, 高于 6V 的为正温度系数, 6V 左右的稳压管温度系数最低。为了获得较好的稳压性能, 常采用 6V 的稳压管, 或选用温度系数互相补偿的稳压管串联运用, 如 $2\text{DW}7$ 型稳压管。

(4) 最大稳定电流 稳压管正常工作时, 允许通过稳压管的最大电流为最大稳定电流。

(5) 耗散功率 稳压管正常工作时所能承受的最大功率为耗散功率。超过这个功率, 则管子有过热烧毁的危险。

(6) 稳定电流 稳压管正常工作时的参考电流值叫稳定电流。实际上多根据具体情况来选择, 但串联电阻不能太小或短路, 否则会使电流过大, 烧毁稳压管。

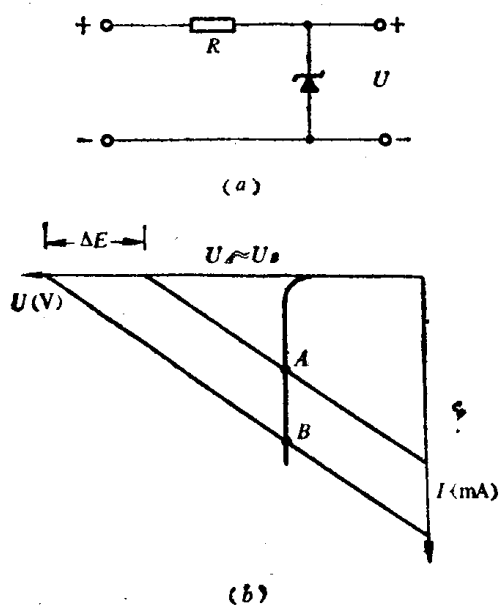


图1-12 稳压管的稳压作用
(a) 稳压电路 (b) 稳压管的工作点

§1-4 晶体三极管的特性和主要参数

一、晶体管的结构形式

晶体三极管，简称晶体管，由两个PN结组成，结构形式可分两种，图1-13(a)为PNP型，图1-13(b)为NPN型。

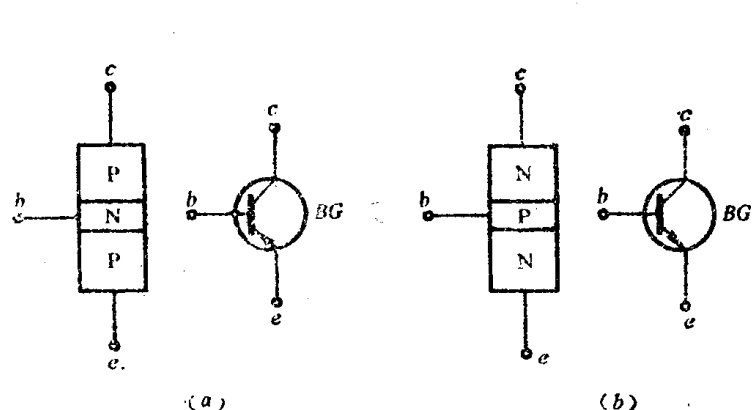


图1-13 晶体管的结构形式和符号
(a) PNP型 (b) NPN型

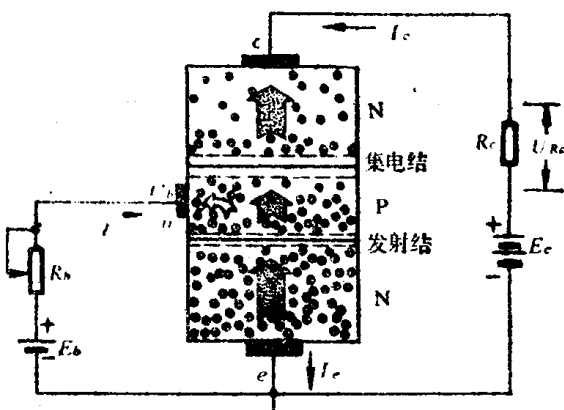


图1-14 晶体管中载流子的运动

目前我国生产的晶体管，PNP型多为锗管，NPN型多为硅管，但也有少量的PNP型硅管和NPN型锗管。

晶体管有三个电极（见图1-13）： b 为基极， c 为集电极， e 为发射极。在画符号时要注意，PNP型发射极箭头向里，NPN型发射极箭头向外。箭头的方向代表电流的方向。

比较而言，硅管的高温性能较好，而锗管往往在低温下工作较好。

二、晶体管的电流放大作用

晶体管的主要特点是具有电流放大作用。因此可做成放大器、振荡器……等各种功能的电路。

让我们首先分析晶体管中载流子的运动情况和电流分配，见图1-14。

以最常用的NPN型硅管为例，其中 e 和 b 间形成一个PN结，称为发射结，基极和集电极间形成一个PN结，称为集电极。如果在发射结上加正向电压，而在集电结上加反向电压，这时，晶体管中载流子的运动可分以下三个过程：

1. 发射区向基区的注入

发射结上加正向偏置，即 $U_b > U_e$ ，根据PN结的理论，发射区的电子大量注入基区，形成发射极电流 I_e ，它的方向与电子注入方向相反。

同时，基区的空穴也应该向发射区注入，但因基区杂质浓度做得很低，空穴电流很小，姑且忽略。

2. 基区中电子的扩散和复合

电子被注入基区后，由于浓度的差异，就会不断向集电极方面扩散，同时在扩散过程中也会和基区中的空穴相遇而产生复合。

由于基区的杂质浓度很低，同时基区的宽度做得很窄，所以被复合的电子数量很少，绝大多数电子都能一直扩散到集电结附近。