
目 录

目 录	1
引 言	1
第一章 半导体器件	3
1.1 半导体的导电特性	3
1.1.1 本征半导体	3
1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体	4
1.1.3 PN 结及单向导电性	5
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 结构和符号	6
1.2.2 伏安特性和主要参数	7
1.2.3 含二极管电路的分析	9
1.2.4 稳压二极管	11
1.3 晶体管	13
1.3.1 双极型晶体管的结构和符号	13
1.3.2 双极型晶体管的特性曲线	14
1.3.3 双极型晶体管的主要参数	16
1.3.4 场效应管简介*	18
习 题	20
第二章 数字电路基础及逻辑门	错误!未定义书签。
2.1 数字电路基础	错误!未定义书签。
2.1.1 逻辑电平	错误!未定义书签。
2.1.2 脉冲信号和波形图	错误!未定义书签。
2.1.3 常用数制和码制	错误!未定义书签。
2.2 逻辑门	错误!未定义书签。
2.2.1 逻辑门的符号、表达式及真值表	错误!未定义书签。

2.2.2 集成逻辑门电路特性.....	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第三章 逻辑代数	错误!未定义书签。
3.1 逻辑代数的基本规则和运算法则.....	错误!未定义书签。
3.1.1 基本运算关系.....	错误!未定义书签。
3.1.2 德摩根定律.....	错误!未定义书签。
3.2 逻辑函数化简	错误!未定义书签。
3.2.1 用代数法化简逻辑函数.....	错误!未定义书签。
3.2.2 用卡诺图化简逻辑函数.....	错误!未定义书签。
习 题.....	错误!未定义书签。
第四章 组合逻辑电路	错误!未定义书签。
4.1 小规模组合逻辑电路的一般分析和设计方法.....	错误!未定义书签。
4.1.1 组合逻辑电路的分析方法.....	错误!未定义书签。
4.1.2 组合逻辑电路设计方法.....	错误!未定义书签。
4.2 常用组合逻辑电路	错误!未定义书签。
4.2.1 加法器.....	错误!未定义书签。
4.2.2 数值比较器.....	错误!未定义书签。
4.2.3 编码器.....	错误!未定义书签。
4.2.4 译码器.....	错误!未定义书签。
4.2.5 数据选择器和数据分配器.....	错误!未定义书签。
4.3 组合逻辑电路中的竞争冒险现象.....	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第五章 双稳态触发器及应用	错误!未定义书签。
5.1 RS 触发器	错误!未定义书签。
5.1.1 基本 RS 触发器.....	错误!未定义书签。
5.1.2 门控 RS 触发器.....	错误!未定义书签。
5.2 边沿触发器	错误!未定义书签。
5.2.1 边沿触发的概念.....	错误!未定义书签。

5.2.2 边沿触发的 D 触发器和 JK 触发器	错误!未定义书签。
5.2.3 异步置数和清零输入端子	错误!未定义书签。
5.3 触发器的应用	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第六章 555 定时器及其应用	错误!未定义书签。
6.1 555 定时器结构和功能	错误!未定义书签。
6.2 555 定时器构成单稳态触发器	错误!未定义书签。
6.2.1 单稳态触发器	错误!未定义书签。
6.2.2 555 定时器构成的单稳态触发器	错误!未定义书签。
6.3 555 定时器构成多谐振荡器	错误!未定义书签。
6.3.1 多谐振荡器	错误!未定义书签。
6.3.2 555 定时器构成的多谐振荡器	错误!未定义书签。
6.4 555 定时器的其他应用*	错误!未定义书签。
6.4.1 555 定时器构成的施密特触发器	错误!未定义书签。
6.4.2 555 定时器构成的双稳态触发器	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第七章 时序逻辑电路	错误!未定义书签。
7.1 时序逻辑电路概述	错误!未定义书签。
7.2 时序逻辑电路的一般分析方法	错误!未定义书签。
7.3 时序逻辑电路的一般设计方法	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第八章 常用时序逻辑电路	错误!未定义书签。
8.1 计数器	错误!未定义书签。
8.1.1 常用计数器芯片	错误!未定义书签。
8.1.2 基于计数器芯片的任意进制计数器构成	错误!未定义书签。
8.1.3 计数器芯片的级联	错误!未定义书签。
8.1.4 计数器应用举例	错误!未定义书签。
8.2 寄存器	错误!未定义书签。

8.2.1 寄存器的基本功能和类型	错误!未定义书签。
8.2.2 常用寄存器芯片	错误!未定义书签。
8.2.3 移位寄存器型计数器	错误!未定义书签。
8.2.4 寄存器应用举例	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第九章 分立元件放大电路基础	错误!未定义书签。
9.1 放大的概念及放大电路的主要性能指标	错误!未定义书签。
9.1.1 放大的概念	错误!未定义书签。
9.1.2 放大电路的性能指标	错误!未定义书签。
9.2 共射放大电路的组成及工作原理	错误!未定义书签。
9.2.1 共射放大电路的组成	错误!未定义书签。
9.2.2 共射放大电路的工作原理	错误!未定义书签。
9.3 放大电路的分析方法	错误!未定义书签。
9.3.1 交流通路和直流通路	错误!未定义书签。
9.3.2 静态分析	错误!未定义书签。
9.3.3 动态分析	错误!未定义书签。
9.4 常用单管放大电路	错误!未定义书签。
9.4.1 分压偏置放大电路	错误!未定义书签。
9.4.2 射极输出器	错误!未定义书签。
9.5 放大电路的频率特性简介*	错误!未定义书签。
9.6 多级放大电路简介*	错误!未定义书签。
9.7 差分放大电路简介*	错误!未定义书签。
9.8 互补对称功率放大电路简介*	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第十章 集成运算放大器	错误!未定义书签。
10.1 集成运算放大器介绍	错误!未定义书签。
10.1.1 集成运放的电路结构特点	错误!未定义书签。
10.1.2 集成运放电路的组成和各部分作用	错误!未定义书签。
10.1.3 理想运放	错误!未定义书签。

10.1.4 集成运放的电压传输特性	错误!未定义书签。
10.2 集成运放工作在线性区的应用---运算电路	错误!未定义书签。
10.2.1 比例运算电路	错误!未定义书签。
10.2.2 加减运算电路	错误!未定义书签。
10.2.3 积分和微分电路	错误!未定义书签。
10.3 集成运放工作于非线性区的应用---电压比较器	错误!未定义书签。
10.3.1 简单比较器	错误!未定义书签。
10.3.2 滞回比较器*	错误!未定义书签。
10.3.3 窗口比较器*	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第十一章 电子电路中的反馈	错误!未定义书签。
11.1 反馈的基本概念和判别方法	错误!未定义书签。
11.1.1 反馈的基本概念	错误!未定义书签。
11.1.2 反馈的分类及其判断方法	错误!未定义书签。
11.2 放大电路中的负反馈	错误!未定义书签。
11.2.1 负反馈放大电路的四种基本组态	错误!未定义书签。
11.2.2 负反馈放大电路的一般表达式	错误!未定义书签。
11.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	错误!未定义书签。
11.3 正反馈应用举例---RC 正弦波振荡电路	错误!未定义书签。
11.3.1 自激振荡和正弦波振荡电路组成	错误!未定义书签。
11.3.2 RC 正弦波振荡电路	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第十二章 直流稳压电源	错误!未定义书签。
12.1 直流稳压电源的组成及各部分的作用	错误!未定义书签。
12.2 单相整流电路	错误!未定义书签。
12.2.1 单相半波整流电路	错误!未定义书签。
12.2.3 单相桥式整流电路	错误!未定义书签。
12.3 滤波电路*	错误!未定义书签。
12.4 稳压电路	错误!未定义书签。

12.4.1 稳压管稳压电路.....	错误!未定义书签。
12.4.2 串联型直流稳压电路.....	错误!未定义书签。
12.4.3 集成稳压器.....	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
第十三章 模拟量和数字量的转换	错误!未定义书签。
13.1 数字信号处理流程	错误!未定义书签。
13.1.1 数字信号处理流程概述.....	错误!未定义书签。
13.1.2 抗混叠滤波.....	错误!未定义书签。
13.1.3 采样-保持	错误!未定义书签。
13.1.4 量化和编码.....	错误!未定义书签。
13.1.5 DAC 与重建滤波	错误!未定义书签。
13.2 模数转换的具体方法	错误!未定义书签。
13.2.1 并联比较型模数转换器.....	错误!未定义书签。
13.2.2 逐次逼近型模数转换器.....	错误!未定义书签。
13.2.3 双积分型模数转换器.....	错误!未定义书签。
13.2.4 模数转换器的主要技术指标	错误!未定义书签。
13.3 数模转换的具体方法	错误!未定义书签。
13.3.1 权电阻网络数模转换器.....	错误!未定义书签。
13.3.2 $R/2R$ 梯形网络数模转换器	错误!未定义书签。
13.2.4 数模转换器的主要技术指标	错误!未定义书签。
习 题	错误!未定义书签。
参考文献.....	错误!未定义书签。

引言

“模拟电子技术”和“数字电子技术”是普通高等学校电子电气信息类各专业学习电子技术入门的必修课程。课程的理论性和实践性都很强，是介于基础课和专业课之间起到搭桥作用的课程。为适应学校教学改革精简学时的要求以及和实践课程的配合，本讲义在对原有课程内容进行研究和探讨的基础上，对课程内容进行必要的删节和重组，以符合我校计通学院相关专业的教学要求。

“模拟电子技术”和“数字电子技术”的区别在于所处理的信号不同。自然界中的物理量可以分为模拟量和数字量两大类。在时间上或在数值上是连续的物理量，称为模拟量，如图 0.1(a)所示。表示模拟量的信号称为模拟信号。工作在模拟信号下的电子电路称为模拟电路。如热电偶工作时输出的电压或电流信号就是一种模拟信号，因为被测的温度不可能发生突跳，所以测得的电压或电流无论在时间上还是在数量上都是连续的。而且，这个信号在连续变化过程中的任何一个取值都有特定的物理意义，即表示一个相应的温度。模拟信号可以用计量仪器测量出某个时刻的瞬时值和有效值。

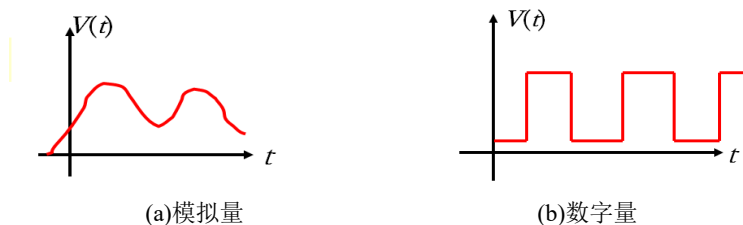


图 0.1 模拟量和数字量

自然界另一类物理量的变化在时间上和数量上都是离散的，它们的变化在时间上是不连续的，总是发生在一系列离散的瞬间，且它们数值的大小和每次的增减变化都是某一个最小数量单位的整数倍，小于这个最小数量单位的数值没有任何物理意义。这类物理量称为数字量。如产品数目、电梯停靠楼层等。表示数字量的信号称为数字信号，工作在数字信号下的电子电路称为数字电路。数字信号是离散的，通常用数码形式给出，在电路常常用和二进制数对应的高低电平来表达，图 0.1(b)即为用高低电平来表达的数字量。处理数字信号的电路称为数字电路。

和模拟信号相比，数字信号有更高的抗干扰能力，便于存储和传输。随着计算机科学技术的发展，用数字电路进行信号处理的优势更为突出。为了充分发挥和利用数字电

路在信号处理上的强大功能，往往先将模拟信号按大小比例转换成数字信号，然后送到数字电路进行处理，最后再将处理结果根据需要转换成相应的模拟信号输出。自 20 世纪 70 年代以来，这种用数字电路处理模拟信号的所谓“数字化”浪潮已经席卷了电子技术几乎所有的应用领域，数字电路的广泛使用和高度发展标志着现代电子技术的水准。

需要指出的是，模拟电路和数字电路不是对立关系，而是相互依存的关系，两者有着各自的应用领域。模拟和数字电子技术课程是一门实践性很强的课程，有其自身的理论体系。与之前学过的数理基础课及电路基础课相比，更贴近工程实际。本课程的学习不仅需要掌握模拟与数字电子技术的基本知识和理论，更重要的在于建立工程思维。在分析问题和进行计算时掌握工程分析的特点，忽略一些次要因素，抓住主要因素进行简便运算。而不是像数学、物理等基础课进行严格的计算。对于电子器件内部的物理过程只需要了解，以能够正确的分析和使用器件为目标。

本书第一章半导体器件为模拟和数字电子技术器件的基础，第二章到第八章属于数字电子技术的内容，包括数字电路的基本器件---逻辑门（第二章）、数字电路的分析工具---逻辑代数（第三章）、组合逻辑电路的分析和设计方法以及常用组合逻辑芯片（第四章）、时序逻辑电路的基本单元---触发器（第五章）、用作产生脉冲波形的 555 器件（第六章）、时序逻辑电路的一般分析和设计方法（第七章）和计数器及寄存器这些常用时序逻辑电路（第八章）。第九章至十一章属于模拟电子技术的内容，包括分立元件放大电路（第九章）、集成运算放大器（第十章）、电子电路中的反馈（第十一章）。第十二章介绍电子电路工作所需要的直流电源，是电子电路工作状态确立的保证和能源提供者。第十三章为模拟量和数字量的转换，是能将模拟、数字这两类电路联系在一起的接口电路。

第一章 半导体器件

1.1 半导体的导电特性

1.1.1 本征半导体

按照导电能力的不同，物体可分为导体、半导体和绝缘体。导电能力率介于导体与绝缘体之间的材料称为半导体。完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。

常见的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge），它们各有四个价电子，如图 1.1.1 所示。这四个价电子分别与相邻的四个原子的价电子形成共价键。共价键中的价电子被相邻原子所共有，把相邻原子结合在一起，在空间形成排列有序的晶体，图 1.1.2。

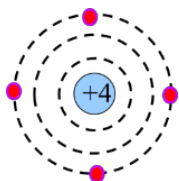


图 1.1.1 硅/锗原子结构示意图

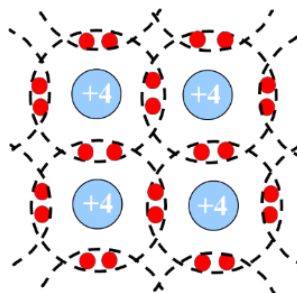


图 1.1.2 硅/锗晶体中的共价键结构

共价键中电子通常处于较为稳定的状态。在绝对 0 度且没有外界激发时，价电子完全被共价键束缚，相当于绝缘体。然而，共价键中电子并不像绝缘体中的价电子被束缚得那样紧。在温度升高或受到光的照射获得一定能量时，有一部分价电子会挣脱原子核的束缚，成为**自由电子**。温度越高，半导体中产生的自由电子愈多。这一现象称为**本征激发**，也称**热激发**。在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，在其原来的共价键中就会出现一个空位。原子的电中性被破坏，呈现出正电性，其正电荷量与电子的负电荷量相等。呈现正电性的这个空位被为**空穴**。因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的，称为**电子空穴对**，如图 1.1.3 所示。游离的一部分自由电子也可能回到空穴中去，被空穴所俘获，称为**复合**。在其它力如电场力的作用下，空穴可吸引附近的价电子来填补，其结果相当于空穴的迁移，见图 1.1.4。电子和空穴的定向运动会形成电流，所以电子和空穴都可以看作是运载电荷的粒子，称为**载流子**。因此，半导体中有两种载流子：带负电荷的自由电子在晶格中运动，带正电荷的空穴在共价键中运动。

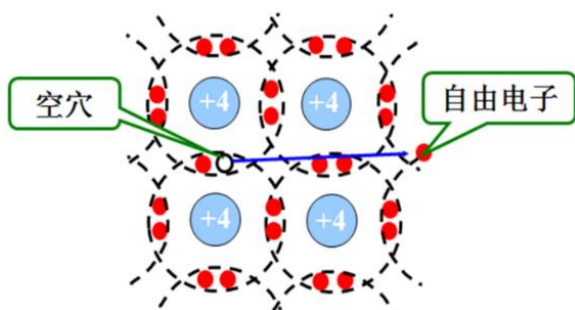


图 1.1.3 晶格中出现自由电子空穴对

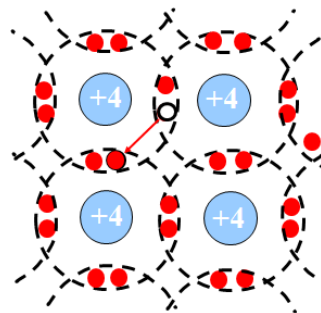


图 1.1.4 空穴被邻近价电子填补

半导体的导电能力取决于载流子的浓度。本征半导体的载流子很少，导电能力弱。环境温度变化时，载流子的浓度也发生相应的变化，因此温度是影响半导体性能的重要因素，称为**热敏特性**，这也是后面理解半导体性能时需要注意的。光照也会影响到载流子的浓度，因而半导体还具有**光敏特性**。

1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

掺入某些杂质后半导体的导电能力会发生明显改变，称为掺杂特性。利用半导体的掺杂特性可以制作不同类型的杂质半导体。半导体的掺杂一般在百万分之一左右，因此掺杂并不改变原晶体结构，而仅仅是在晶体点阵的某些位置，半导体的原子被杂质原子所替代了。根据掺入杂质的化合价的不同，杂质半导体可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。

在硅或锗晶体中掺入少量的五价元素磷（或锑），晶体点阵中的某些半导体原子被杂质取代，形成 **N 型半导体**。如图 1.1.5 所示，由于磷原子的最外层有五个价电子，其中四个与相邻的半导体原子形成共价键，必定多出一个电子，这个电子几乎不受束缚，很容易被激发而成为自由电子，磷原子就成了带正电的离子。

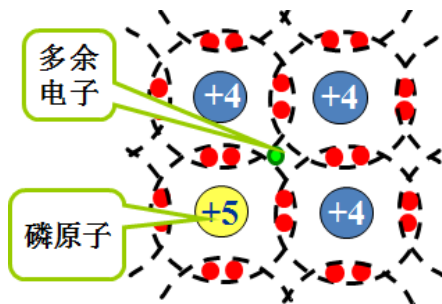


图 1.1.5 N 型半导体形成示意

N 型半导体中的载流子，既有本征半导体中成对产生的电子和空穴，也有由掺入杂

质原子提供的自由电子。因掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度（N 型半导体中掺入的杂质浓度大约是本征激发产生的电子浓度的一百万倍），所以自由电子浓度远大于空穴浓度。在 N 型半导体中，自由电子为**多数载流子**，简称**多子**；空穴为**少数载流子**，简称**少子**。多子与杂质浓度近似相等，受温度影响较小。少子与本征激发有关，受温度影响较大。

在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓、铟等，晶体点阵中的某些半导体硅原子被杂质硼取代就形成了 **P 型半导体**。硼原子的最外层有三个价电子，与相邻的半导体原子形成共价键时，产生一个空位，如图 1.1.6(a)。这个空位可能吸引束缚电子来填补，产生一个空穴，同时使得硼原子成为带负电的离子，见图 1.1.6(b)。和上段分析类似，由于掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度，P 型半导体中空穴是多子，自由电子是少子。

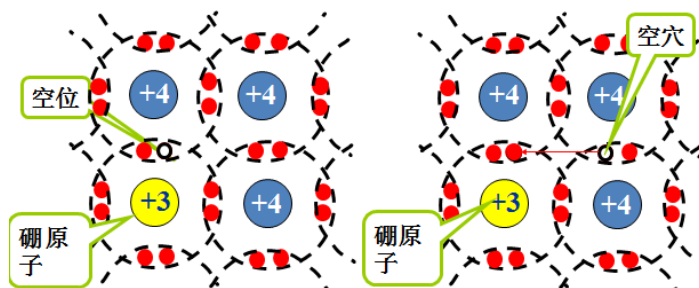


图 1.1.6 P 型半导体形成示意

1.1.3 PN 结及单向导电性

P 型半导体和 N 型半导体带电粒子情况可以用图 1.1.7 示意表达。P 型半导体中存在很多带负电的离子，多数载流子是空穴，少数载流子是自由电子。N 型半导体中存在很多带正电的离子，多数载流子是自由电子，少数载流子是空穴。不管是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体是不带电的。在外力如电场力的作用下，载流子可以做定向移动。

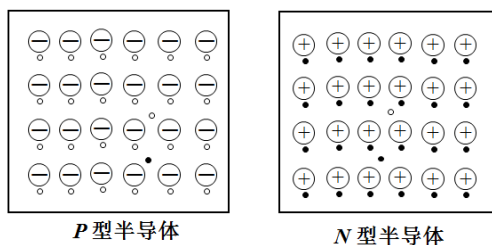


图 1.1.7 杂质半导体示意表示法

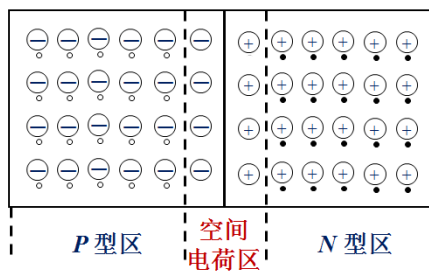


图 1.1.8 PN 结的形成

通常在一块 N 型（P 型）半导体的局部再掺入浓度较大的三价（五价）杂质，使其变成 P 型（N 型）半导体。在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面处，由于载流子浓度分布的不均匀性会产生扩散运动，从而使得交界面附近形成一个很薄（ μm 数量级）的空间电荷区，见图 1.1.8。空间电荷区会在交界面处建立一个内电场，电场力会阻碍半导体内多子的扩散运动，促成少子的漂移运动，最终达到动态平衡。这个空间电荷区被称为 **PN 结**。PN 结的电路符号见图 1.1.9。



图 1.1.9 PN 结的电路符号

PN 结加正向偏置电压（P 正，N 负）时，内电场被削弱，多子扩散加强，能够形成较大的正向电流，见图 1.1.10(a)。此时 PN 结呈现低电阻，处于导通状态。PN 结加反向偏置电压（N 正，P 负）时，内电场被加强，多子扩散受到抑制，少子漂移加强，但因少子数量有限，只能形成较小的反向电流，见图 1.1.10(b)。此时 PN 结呈现高电阻，处于截止状态。

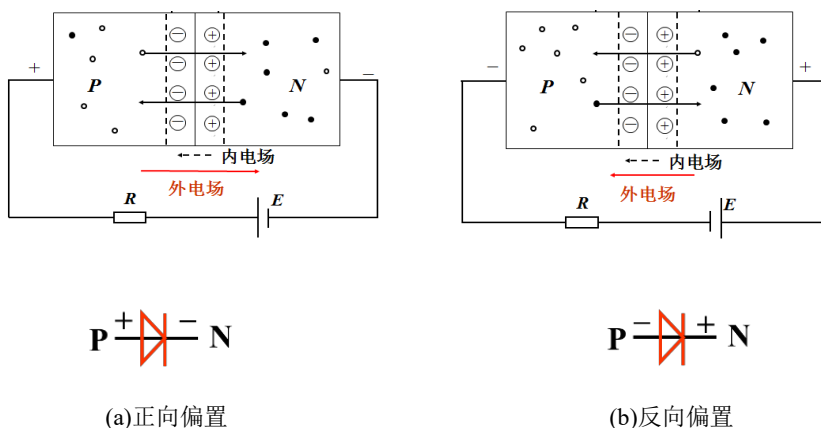


图 1.1.9 PN 结的单向导电性

PN 结是构成各种半导体器件的基础。PN 结正向偏置（简称**正偏**）导通，反向偏置（简称**反偏**）截止称为 PN 结的**单向导电性**。

1.2 半导体二极管

1.2.1 结构和符号

在 PN 结的外面装上管壳，再引出两个电极，就可以做成半导体二极管。图 1.2.1 示

出了一些常见的二极管的外形图。图 1.2.2 是二极管的图形符号，其中阳极从 P 区引出，阴极从 N 区引出。阳极电位高于阴极电位时二极管为正向偏置，反之为负向偏置。

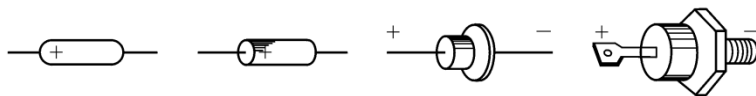


图 1.2.1 二极管的几种外形



图 1.2.2 符号

二极管的类型很多，从制造二极管的材料来分，有硅二极管和锗二极管。从管子的结构来分，主要有点接触型和面接触型。点接触型二极管的特点是 PN 结的面积小，因而，管子中不允许通过较大的电流。点接触型二极管的结电容小，因此可在高频下工作，适用于检波和小功率的整流电路。面接触型二极管则相反，由于 PN 结的面积大，故可允许流过较大的电流，但只能在较低频率下工作，常用于整流电路。此外还有一种开关型二极管，适用于在脉冲数字电路中作为开关管。

1.2.2 伏安特性和主要参数

二极管的性能可用其伏安特性来描述。流过二极管的电流 i 与加在管子两端的电压 u 之间的关系曲线 $i=f(u)$ 就是二极管的伏安特性。

一个典型的二极管的伏安特性如图 1.2.3 所示。特性曲线包括两部分：正向特性和反向特性。

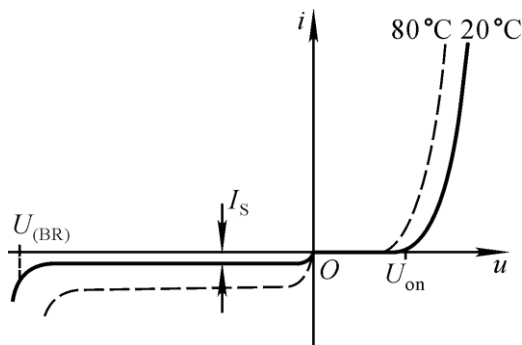


图 1.2.3 二极管的伏安特性

1. 正向特性

图 1.2.3 的右半部分示出了二极管的正向特性。由图可见, 当正向电压比较小时, 正向电流几乎等于零。只有当正向电压超过一定值时, 正向电流才开始快速增长, 此对应的电压通常称为开启电压 U_{on} 。开启电压的大小与二极管的材料以及温度等因素有关。通常硅二极管的开启电压为 0.5V 左右, 锗二极管为 0.1V 左右。

2. 反向特性

图 1.2.3 的左半部分为二极管的反向特性。由图可见, 二极管加上反向电压时, 反向电流的值很小。而且, 在一定范围内, 反向电流并不随着反向电压而增大, 故此电流为反向饱和电流, 用符号 I_s 表示。

如果反向电压继续升高, 当超过某定值以后, 反向电流将急剧增大, 这种现象称为击穿, 对应的电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。二极管击穿以后, 不再具有单向导电性。

发生击穿并不意味着二极管被损坏。实际上, 当二极管反向击穿时, 只要注意控制反向电流的数值, 不使其过大, 以免因过热而烧坏管子, 则当反向电压降低时, 二极管的性能可能恢复正常。

半导体二极管的主要参数有以下几个:

最大整流电流 I_F 指二极管长期运行时, 允许通过管子的最大正向平均电流。 I_F 的数值是由二极管允许的温升所限定。使用时, 管子的平均电流不得超过此值, 否则可能使二极管过热而损坏。

最高反向工作电压 U_R 工作时加在二极管两端的反向电压不得超过此值, 否则二极管可能被击穿。为了留有余地, 通常将击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半定为 U_R 。

反向电流 I_R 指在室温条件下, 在二极管两端加上规定的反向电压时, 流过管子的反向电流。通常希望 I_R 值愈小愈好。反向电流愈小, 说明二极管的单向导电性愈好。此外, I_R 受温度的影响很大。

最高工作频率 f_M 主要取决于 PN 结结电容的大小。结电容愈大, 二极管允许的最高工作频率愈低。

二极管除了具有单向导电性以外, 还具有一定的电容效应。这是因为如果二极管两端的电压发生变化, PN 结中存储的电荷量也随之产生变化, 如同一个电容器一样。这种电容效应用 PN 结的结电容来表示。二极管结电容的值通常为几皮法~几十皮法, 有些结面积大的二极管结电容可达几百皮法。

1.2.3 含二极管电路的分析

二极管的伏安特性具有非线性，给二极管应用电路的分析带来一定的困难。为便于分析，在一定的条件下，常用线性元件所构成的电路来近似模拟二极管的特性，并用之取代电路中的二极管。对于不同的应用场合，不同的分析要求，可以构造不同的等效电路。

图 1.2.4 为由二极管伏安特性折线化得到的等效电路，图中粗实线为折线化近似的伏安特性，虚线表示实际的伏安特性。图（a）所示的折线化伏安特性表示的二极管正向偏置时管压降为 0，导通电阻为 0；反向偏置时，电流为 0，电阻为 ∞ ，称为理想二极管，用空心的二极管符号来表示。适用于信号电压远大于二极管压降时的近似分析。

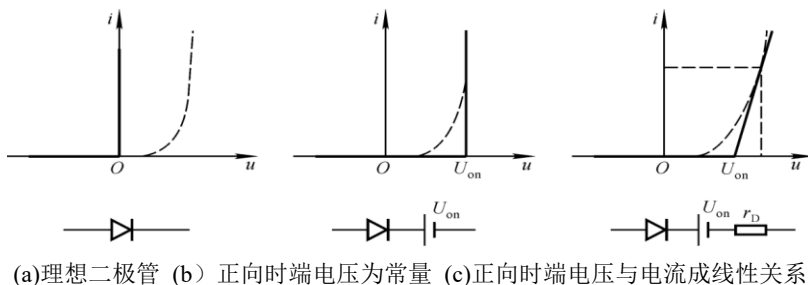


图 1.2.4 由伏安特性折线化得到的等效电路

图（b）所示的折线化伏安特性表示二极管正向导通时，压降为一个常量 U_{on} ；截止时，反向电流为 0。因而等效电路是理想二极管串联电压源 U_{on} 。

图（c）所示的折线化伏安特性表明当二极管正向电压 U 大于 U_{on} 后，其电流 I 与 U 成线性关系，直线斜率为 $1/r_D$ 。二极管截止时，反向电流为零。因此等效电路是理想二极管串联电压源 U_{on} 和电阻 r_D ，且 $r_D = \Delta U / \Delta I$ 。这种模型可用来计算叠加在直流工作点 Q 上的微小电压或电流变化时的响应。

例如在图 1.2.5 所示电路中，若电压源 V 远大于二极管的导通电压 U_D ，则可以认为电阻 R 上的电压 U_R 约等于电压源电压 V ，即认为二极管具有图 1.2.4（a）所示特性，回路电流 $I \approx V/R$ 。

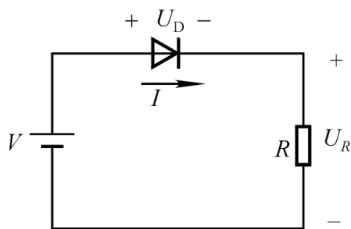


图 1.2.5 二极管加正向电压的情况

因为二极管导通电压的变化范围很小,所以多数情况下可以认为图 1.2.5 所示的电路中的二极管具有图 1.2.4 (b) 所示特性,对于硅管,可取 $U_D = U_{on} = 0.7V$;对于锗管,可取 $U_D = U_{on} = 0.2V$,因而回路电流 $I = \frac{V-U_{on}}{R}$ 。

为使计算出的回路电流 I 更接近实际情况,可以选择图 1.2.5 所示电路中的二极管具有图 1.2.4 (c) 所示的特性,此时回路电流 $I = \frac{V-U_{on}}{r_D+R}$ 。

三个等效电路中以图 (a) 误差最大,图 (c) 误差最小,图 (b) 应用最为普遍。

[例 1.2.1] 电路如图 1.2.6 所示,二极管导通电压 U_D 约为 $0.7V$ 。试分别估算开关断开和闭合时输出电压的数值。

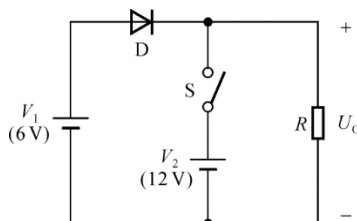


图 1.2.6 例 1.2.1 电路图

解: 当开关断开时,二极管因加正向电压而导通,故输出电压

$$U_O = V_1 - U_D \approx (6 - 0.7)V = 5.3V$$

当开关闭合时,二极管因外加反向电压而截止,故输出电压

$$U_O = V_2 = 12V$$

[例 1.2.2] 电路如图 1.2.7 所示,二极管导通电压 U_D 约为 $0.3V$ 。 $V_a = 3V$, $V_b = 0V$, 求 $V_y = ?$

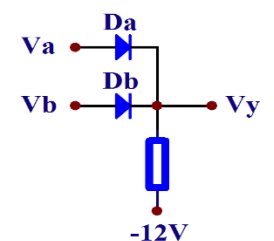


图 1.2.7 例 1.2.2 电路图

解: 含多个二极管电路分析,先判二极管是否导通。假设两个二极管都不通,此时 $V_y = -12V$ 。因 V_a, V_b 均大于 $-12V$,故至少会有一个导通。采用“压差大者优先导通”的原则来判断导通情况。因 $V_a > V_b$,故 D_a 优先导通,导通后管导通压降为 $0.3V$,故 $V_y = 2.7V$ 。因 $V_b < V_y$,所以 D_b 截止,最后输出电压仍为 $2.7V$ 。

1.2.4 稳压二极管

稳压二极管简称**稳压管**，它是一种特殊的二极管。稳压管与一般二极管不同之处在于它的反向击穿是可逆的。通常稳压管工作在反向击穿区。此时，当反向电流有一个比较大的变化量 ΔI 时，管子两端相应的电压变化量 ΔU 却很小。利用这一特点，可以实现“稳压”作用。

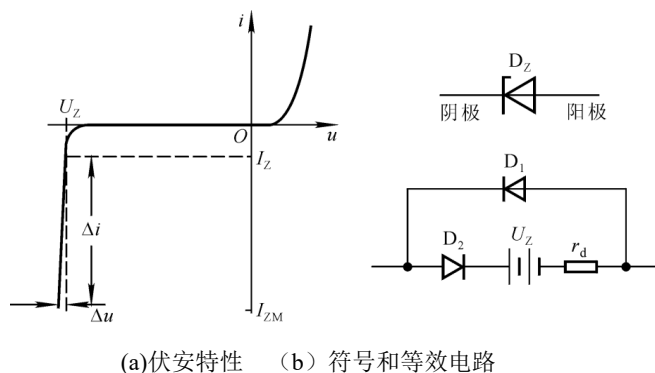


图 1.2.8 稳压管的伏安特性和等效电路

稳压管的伏安特性和符号分别见图 1.2.8 (a) 和 (b) 所示。稳压管的主要参数有以下几项：

稳定电压 U_Z

U_Z 是稳压管工作在反向击穿区时的工作电压。稳定电压 U_Z 是挑选稳压管的主要依据之一。由于稳定电压随着工作电流的不同而略有变化，所以测试 U_Z 时应使稳压管的电流为规定值。不同型号的稳压管，其稳定电压值不同。对于同一型号的稳压管，由于制造工艺的分散性，不同管子的 U_Z 也有些差别。例如稳压管 2DW7C，其 $U_Z=6.1\sim 6.5\text{V}$ ，表示型号同为 2DW7C 的各稳压管，其稳定电压有的可能为 6.1V，有的可能为 6.5V 等，但并不意味着同一个管子的稳定电压会有如此之大的变化范围。

稳定电流 I_Z

I_Z 是使稳压管正常工作时的参考电流。若工作电流低于 I_Z ，则管子的稳压性能变差；如工作电流高于 I_Z ，只要不超过额定功耗，稳压管可以正常工作。而且一般来说，工作电流较大时稳压性能较好。

动态内阻 r_Z

r_Z 指稳压管两端电压和电流的变化量之比，即

$$r_Z = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

显然,稳压管的 r_z 值愈小,则稳压性能愈好。对于同一个稳压管,一般工作电流愈大,其 r_z 值愈小。通常手册上给出的 r_z 值是在规定的稳定电流之下得到的。

额定功耗 P_Z

由于稳压管两端加有电压 U_Z ,而管子中又流过一定的电流,因此要消耗一定的功率。这部分功耗转化为热能,使稳压管发热。额定功耗 P_Z 决定于稳压管允许的温升。也有手册上给出最大稳定电流 I_{ZM} 。稳压管的最大稳定电流 I_{ZM} 与耗散功率 P_Z 之间存在以下关系: $I_{ZM} = P_Z / U_Z$ 。如果手册上只给出 P_Z ,可由上式自行计算出 I_{ZM} 。

稳定电压的温度系数 α_U

α_U 表示当稳压管的电流保持不变时,环境温度每变化 1°C 所引起的稳定电压变化的百分比。一般来说,稳定电压大于 7V 的稳压管,其 α_U 为正值,即当温度升高时,稳定电压值将增大。稳定电压小于 4V 的稳压管,其 α_U 为负值,即温度升高时,稳定电压值将减小。而稳定电压在 4V 至 7V 之间的稳压管, α_U 的值比较小,表示其稳定电压值受到温度的影响较小,性能比较稳定。

使用稳压管组成稳压电路时,需要注意几个问题。首先,应保证稳压管工作在反向击穿区。其次,稳压管应与负载电阻 R_L 并联,由于稳压管两端电压的变化量很小,因而使输出电压比较稳定。第三,必须限制流过稳压管的电流 I_Z ,使其不超过规定值,以免因过热而烧毁管子。但 I_Z 的值也不能太小,若小于临界值 $I_{Z\min}$,则稳压管将失去稳压作用。因此稳压管电路中必须接入合适的限流电阻 R 来调节稳压管电流 I_Z 的大小。

[例 1.2.3] 在图 1.2.9 所示稳压管稳压电路中,已知稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$,最小稳定电流 $I_{Z\min} = 5\text{mA}$,最大稳定电流 $I_{Z\max} = 25\text{mA}$;负载电阻 $R_L = 600\Omega$ 。求解限流电阻 R 的取值范围。

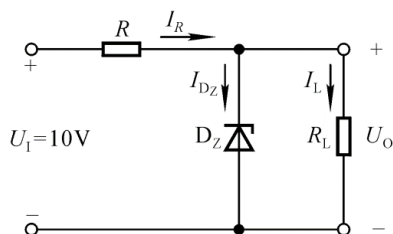


图 1.2.9 稳压管稳压电路

解: 从图 1.2.9 所示电路可知, R 上的电流 I_R 等于稳压管中电流 I_{D_Z} 和负载电流 I_L 之和, 即 $I_R = I_{D_Z} + I_L$ 。而 $I_{D_Z} = (5 \sim 25) \text{mA}$, $I_L = U_Z / R_L = (6/600) \text{A} = 0.01 \text{A} = 10\text{mA}$, 所以 $I_R = (15 \sim 35) \text{mA}$ 。 R 上的电压 $U_R = U_I - U_Z = (10 - 6) \text{V} = 4\text{V}$, 因此

$$R_{\max} = \frac{U_R}{I_{R_{\min}}} = \left(\frac{4}{15 \times 10^{-3}} \right) \Omega \approx 267 \Omega$$

$$R_{\min} = \frac{U_R}{I_{R_{\max}}} = \left(\frac{4}{35 \times 10^{-3}} \right) \Omega \approx 114 \Omega$$

限流电阻 R 的取值范围为 114~267 Ω 。

1.3 晶体管

晶体管有双极型晶体管(Bipolar Junction Transistor, BJT)和场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)两大类型。双极型晶体管是由两种载流子参与导电的半导体器件，又称晶体三极管、半导体三极管等，后面简称晶体管。场效应晶体管只有一种载流子参与导电的晶体管，为单极型器件，简称场效应管。

1.3.1 双极型晶体管的结构和符号

图 1.3.1 所示为双极型晶体管的几种常见外形。图(a)、(b)所示为小功率管，图(c)所示为中等功率管，图(d)所示为大功率管。它们常常是组成各种电子电路的核心器件。

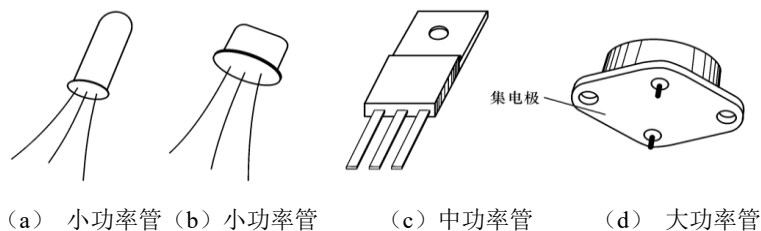
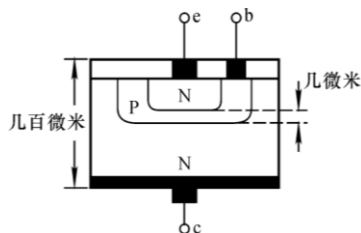


图 1.3.1 双极型晶体管的几种常见外形

在半导体中根据不同的掺杂方式在同一个硅片上制造出三个掺杂区域，并形成两个 PN 结，可构成双极型晶体管。采用平面工艺制成的 NPN 型硅材料晶体管的结构如图 1.3.2(a)所示，位于中间的 P 区称为基区，它很薄且杂质浓度很低；位于上层的 N 区是发射区，掺杂浓度很高；位于下层的 N 区是集电区，面积很大。



(a) NPN 型硅管的工艺结构

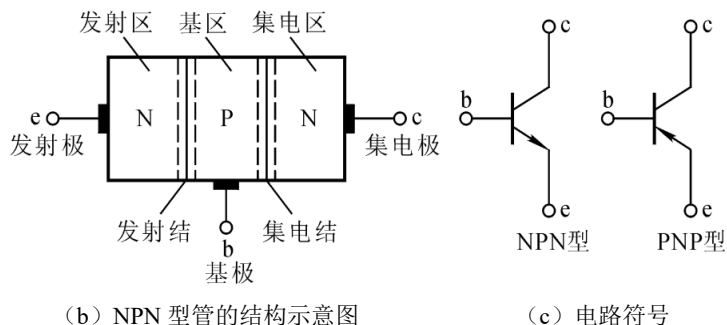


图 1.3.2 晶体管的结构和符号

晶体管的外特性与三个区域的上述特点紧密相关。它们所引出的三个电极分别为基极 b 、发射极 e 和集电极 c 。图 (b) 所示为 NPN 型管的结构示意图，发射区与基区间的 PN 结称为发射结，基区与集电区间的 PN 结称为集电结。图 (c) 所示为 NPN 型管和 PNP 型管的符号。

1.3.2 双极型晶体管的特性曲线

晶体管的最大特点就是具有电流放大作用，所谓放大有两个方面的含义，一是对微小的变化量（交流信号）进行放大，二是电路的输出端的功率大于输入端的功率，即电路的输出电压或电流的变化量大于输入端的电压或电流的变化量。这体现了放大结果实质上是对能量的控制，具有能量控制的器件称为有源器件，除晶体管外，还有场效应管和集成运放等。

利用晶体管的输入、输出特性曲线，可以较全面地描述晶体管各极电流和电压之间的关系，它们可以由晶体管特性图示仪直接得到，也可用实验的方法测量得到。本节 NPN 型晶体管为例介绍共射特性曲线。

1. 输入特性

晶体管的输入特性是指在 U_{CE} 一定的情况下，基极电流 i_B 和输入电压 u_{BE} 的关系曲线，用函数式表示如下

$$i_B = f(u_{BE}) | U_{CE} = \text{常数} \quad (1.3.1)$$

硅晶体管的正向输入特性曲线如图 1.3.3 所示。从图中可以看出，当 $U_{CE}=0$ 时，输入特性曲线类似于二极管的正向特性曲线。随着 U_{CE} 的增加，特性曲线将向右移，如图 1.3.3 中标出的 $U_{CE}=0.5V$ 和 $U_{CE} \geq 1V$ 。当 $U_{CE} \geq 1V$ 以后的输入特性曲线基本上是重合的。此时， U_{CE} 增加对基极电流 i_B 不再有明显的影晌。通常只画出一条 $U_{CE} \geq 1V$ 的输入特性曲线。

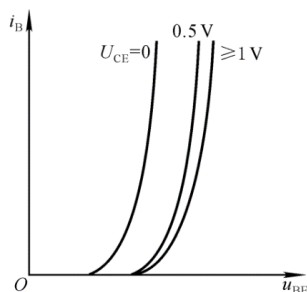


图 1.3.3 晶体管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线描述基极电流 I_B 为常数时，集电极电流 i_C 与管压降 u_{CE} 之间的函数关系，即

$$i_C = f(u_{CE})|_{I_B = \text{常数}} \quad (1.3.2)$$

对于每一个确定的 I_B ，都有一条输出曲线。不同的 I_B 有不同的曲线，所以输出特性是如图 1.3.4 所示的一簇曲线。对于某一条曲线，当 u_{CE} 从零逐渐增大时， i_C 随之逐渐增大。而当 u_{CE} 增大到一定数值时 i_C 不再增大，表现为曲线几乎平行于横轴，即 i_C 几乎仅仅取决于 I_B 。

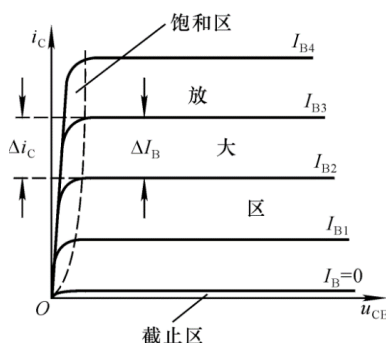


图 1.3.4 晶体管的输出特性曲线

从输出特性曲线可以看出，晶体管有三个工作区域（见图 1.3.4 中所标注）：

（1）截止区： $i_B=0$ 的曲线以下的区域称为截止区。对应于发射结电压小于 PN 结开启电压 U_{on} ($u_{BE} \leq U_{on}$)。对 NPN 型硅管而言， $i_B=0$ 时， $u_{BE} < 0.5V$ 时即已开始截止，此时，集电极电流 I_{CEO} 称为穿透电流。一般小功率硅管的 I_{CEO} 在 $1\mu A$ 以下，锗管的 I_{CEO} 小于几十微安。在近似分析中可以认为晶体管截止时的 $i_C \approx 0$ 。为了让晶体管可靠截止，常使 $u_{BE} \leq 0$ 。

（2）放大区：输出特性曲线中近似水平的部分是放大区。其特征是发射结正向偏置且集电结反向偏置。对于 NPN 晶体管来说 $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{BC} < 0$ 。此时， i_C 几乎仅仅取决于 i_B ，而与 u_{CE} 无关，表现出 i_B 对 i_C 的控制作用。基极电流有一个微小的变化量 Δi_B 时，相

应的集电极电流将产生一个较大的变化量 Δi_C 。此时，晶体管具有电流放大作用。

将集电极电流与基极电流的变化量之比定义为晶体管的共射交流电流放大系数，用 β 表示，即

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

(3) 饱和区：输出特性曲线中靠近纵轴的部分，各条输出特性曲线的上升部分属于晶体管的饱和区。对应于晶体管工作在发射结和集电结都处于正向偏置状态。在饱和区，不能用放大区中的 β 来描述 i_C 和 i_B 的关系。

由图 1.3.4 可见，在饱和区，晶体管的管压降 u_{CE} 很小。晶体管饱和时的管压降用 U_{CES} 表示，一般小功率硅晶体管的 $U_{CES} < 0.3V$ ，在一些分析中可近似用零处理。

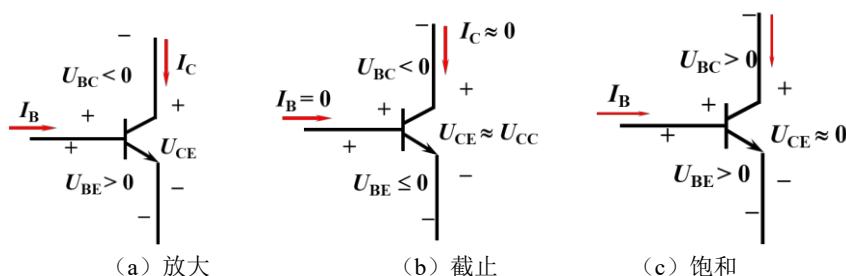


图 1.3.5 NPN 型晶体管的三种工作状态

图 1.3.5 给出了 NPN 型晶体管工作在三种不同状态下的电压和电流关系。图 (a) 对应于晶体管工作在放大区，此时有 $I_C = \beta I_B$ 和 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 。晶体管集电极电流受基极的电流控制，可实现对基极电流的放大，是模拟电路的常用工作区域。图 (b) 对应于晶体管工作在截止区，此时有 $I_C \approx 0$ ，发射极和集电极之间如同开关断开。图 (c) 对应于晶体管工作在饱和区，此时有 $U_{CE} \approx 0$ ，发射极和集电极之间如同开关接通。可以看出，在截止区和饱和区这两种状态下的晶体管可以看作是一个受输入控制的开关。在数字电路中的晶体管往往工作在这样的开关状态。

1.3.3 双极型晶体管的主要参数

在计算机辅助分析和设计中，根据晶体管的结构和特性，要用几十个参数全面描述它。这里只介绍在近似分析中最主要的参数，它们均可在半导体器件手册中查到。

1. 电流放大系数

晶体管的电流放大系数是表征管子放大作用的主要参数。晶体管的电流放大系数有以下几个：

(1) 共射交流电流放大系数 β

体现共射接法时晶体管的电流放大作用。

共射接法指输入回路和输出回路的公共端是发射极，见图 1.3.6。

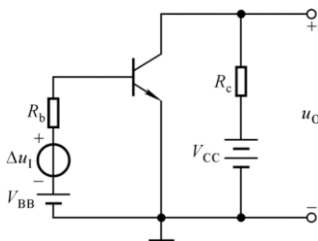


图 1.3.6 基本共射放大电路

共射交流电流放大系数 β 的定义为集电极电流与基极电流的变化量之比，即

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

(2) 共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

当忽略穿透电流 I_{CEO} 时， $\bar{\beta}$ 近似等于集电极电流与基极电流的直流量之比，即

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

直流参数 $\bar{\beta}$ 与交流参数 β 的含义是不同的，但对于大多数晶体管来说，同一管子的 β 与 $\bar{\beta}$ 的数值差别不大，所以在今后的计算中，常常不再将它们严格地区分。

2. 集电极和基极之间的反向饱和电流 I_{CBO}

表示当发射极 e 开路时，集电极 c 和基极 b 之间的反向电流。一般小功率锗晶体管的 I_{CBO} 约为几微安~几十微安，硅晶体管的 I_{CBO} 要小得多，有的可以达到纳安数量级。

3. 集电极和发射极之间的穿透电流 I_{CEO}

表示当基极 b 开路时，集电极 c 和发射极 e 之间的电流。

上述两个反向电流之间存在以下关系：

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta})I_{CBO}$$

当温度升高时， I_{CBO} 和 I_{CEO} 都将急剧地增大。实际工作中选用晶体管时，要求晶体管的反向饱和电流 I_{CBO} 和穿透电流 I_{CEO} 尽可能小一些，这两个反向电流的值愈小，表明晶体管的质量愈好。

4. 极限参数

晶体管的极限参数是指使用时不得超过的限度，以保证晶体管的安全或保证晶体管参数的变化不超过规定的允许值。主要有以下几项：

集电极最大允许电流 I_{CM} ：当集电极电流过大时，晶体管的 β 值会减小。当 $i_C = I_{CM}$ 时，管子的 β 值下降到额定值的三分之二。

集电极最大允许耗散功率 P_{CM} ：当晶体管工作时，管子两端的压降为 u_{CE} ，集电极流过的电流为 i_C ，因此损耗的功率为 $p_C = i_C u_{CE}$ 。集电极消耗的电能将转化为热能使管子的温度升高。如果温度过高，将使晶体管的性能恶化甚至被损坏，所以集电极损耗有一定的限制。在晶体管的输出特性上，将 i_C 与 u_{CE} 的乘积等于规定的 P_{CM} 值的各点连接起来，可以得到一条双曲线，如图 1.3.7 中的虚线表示。双曲线的左下方的区域中，满足 $i_C u_{CE} < P_{CM}$ 的关系，是安全的。而在双曲线的右上方， $i_C u_{CE} > P_{CM}$ ，即晶体管的功率损耗超过了允许的最大值，属于过损耗区。

极间反向击穿电压：表示外加在晶体管各电极之间的最大允许反向电压，如果超过这个限度，则管子的反向电流急剧增大，甚至可能被击穿而损坏。极间反向击穿电压主要有以下几项：

$U_{(BR)CEO}$ ：基极开路时，集电极和发射极之间的反向击穿电压。

$U_{(BR)CBO}$ ：发射极开路时，集电极和基极之间的反向击穿电压。

根据给定的极限参数 P_{CM} 、 I_{CM} 和 $U_{(BR)CEO}$ ，可以在晶体管的输出特性曲线上画出管子的安全工作区，如图 1.3.7 所示。

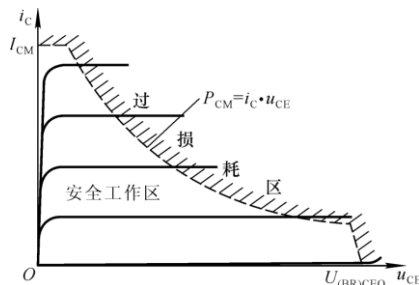


图 1.3.7 晶体管的安全工作区

1.3.4 场效应管简介*

除晶体管外，还有一种常用的半导体器件——场效应管，它利用输入回路的电场效应来控制输出回路的电流，并以此命名。根据参与导电的载流子的不同，场效应管分为电子作为载流子的 N 沟道器件和空穴作为载流子的 P 沟道器件。从结构上分，场效应晶体管有结型场效应管 (Junction type Field Effect Transistor, JEFT) 和绝缘栅型场效应管 (Insulated Gate Field Effect Transistor, IGEFT) 两种类型。对绝缘栅型场效应管，又可进一步分成耗尽型和增强型两类。绝缘栅型场效应管根据其结构特点也称为金属-氧化物-半

导体效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor FET，MOSFET）。由于绝缘栅型场效应管制作工艺简单，便于集成化，性能优于结型场效应管，因此得到广泛应用。本节仅对绝缘栅型场效应管做简单介绍，详细内容请看参考文献【1】。

如图 1.3.8 给出了 N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构与符号。它是以一块杂质浓度比较低的 P 型半导体硅片为衬底，在其上扩散两个相距很近的高掺杂 N 型区，并在硅片表面生成一层薄薄的二氧化硅绝缘层。然后在两个 N 型区之间的二氧化硅表面及两个 N 型区的表面分别安置三个电极：栅极 G、源极 S 和漏极 D。由于栅极是绝缘的，栅极电流几乎为零，故场效应管输入电阻很高，最高可达 $10^{14} \Omega$ 。

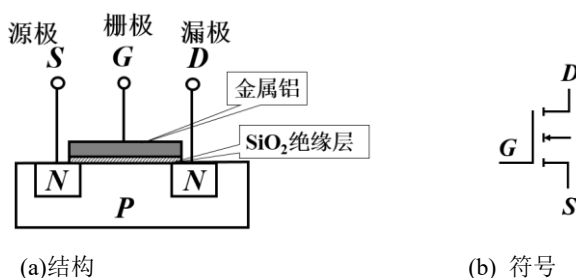


图 1.3.8 N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构与符号

由于 N 型漏区和源区之间被 P 型衬底隔开，漏极和源极之间是两个背靠背的 PN 结。当栅源电压 $U_{GS} = 0$ 时，不管漏极和源极之间所加电压的极性如何，其中总有一个 PN 结是反向偏置的，反向电阻很高，漏极电流 I_D 近似为零。

如果栅极和源极之间加正向电压 U_{GS} ，情况就会发生变化，见图 1.3.9。在 U_{GS} 的作用下，会产生垂直于衬底表面的电场。由于二氧化硅绝缘层很薄，即使 U_{GS} 很小（如几伏）也能产生很强的电场[电场强度可达 $(10^5 \sim 10^6) \text{ V/cm}$]，P 型衬底中的电子受到电场力的吸引到达表层，填补空穴所形成负离子的耗尽层。当 U_{GS} 大于一定值时，在表面附近会形成一个 N 型层，称反型层。反型层作为源区和漏区的 N 型导电沟道，将漏极和源极连接起来。 U_{GS} 正值愈高，导电沟道愈宽。形成导电沟道后，在漏、源之间加有电压 U_{DS} 时，将产生漏极电流 I_D 。

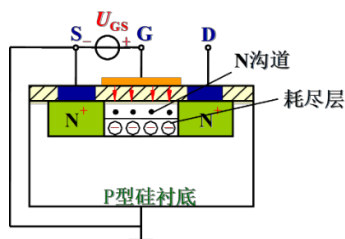


图 1.3.9 N 沟道增强型绝缘栅场效应管导电沟道的形成及导通

图 1.3.10 给出了管子的转移特性曲线，即栅源电压对漏极电流的控制特性。在一定的漏源电压 U_{DS} 作用下，使管子由不导通变为导通的临界栅源电压称为开启电压 $U_{GS(th)}$ 。图 1.3.11 为管子的输出特性曲线。在恒流区漏极电流 I_D 的大小与栅源电压 U_{GS} 成比例。

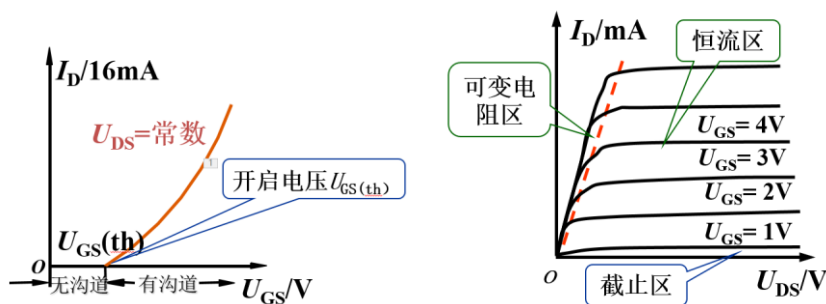


图 1.3.11 N 沟道增强型管的转移特性曲线 图 1.3.12 N 沟道增强型管的输出特性曲线

场效应管仅有一种载流子---多数载流子导电，所以又称单极型晶体管。它是一种电压控制电流的器件，输出电流决定于输入电压的大小。它的输入电阻很大，基本上不需要信号源提供电流。和前面学习的双极型晶体管相比较，它不但具备双极型晶体管体积小、重量轻、寿命长等优点，而且输入回路的内阻高达 $10^7 \sim 10^{12} \Omega$ ，比后者耗电省。同时具有噪声低，热稳定性好，抗辐射能力强的优点。这些特点，使之从 60 年代诞生起就广泛地应用于各种电子电路之中。因篇幅所限本节仅做简单介绍，详细内容请同学们自行学习参考书籍【1】。

习 题

1.1. 写出图 P1.1 所示各电路的输出电压值，设二极管导通电压 $U_D = 0.7V$ 。

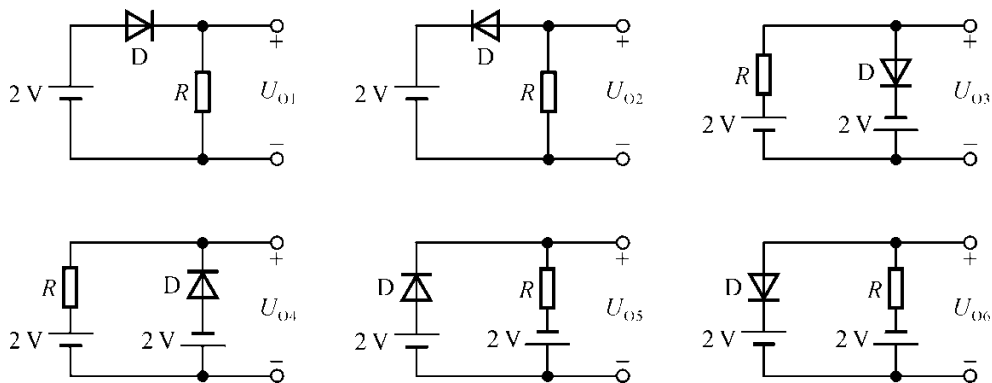


图 P1.1

1.2. 电路如图所示, 已知 $u_i = 10\sin\omega t$ (V), 试画出 u_i 与 u_o 的波形。二极管正向导通电压可忽略不计

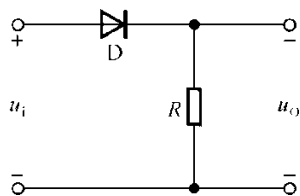


图 P1.2

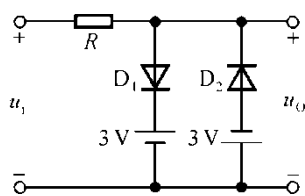


图 P1.3

1.3 电路如图所示, 已知 $u_i = 5\sin\omega t$ (V), 二极管导通电压 $U_D = 0.7V$ 。试画出 u_i 与 u_o 的波形, 并标出幅值。

1.4 电路图和输入电压波形如图所示, 二极管导通电压 $U_D = 0.7V$ 。试画出输出电压 u_o 的波形, 并标出幅值。

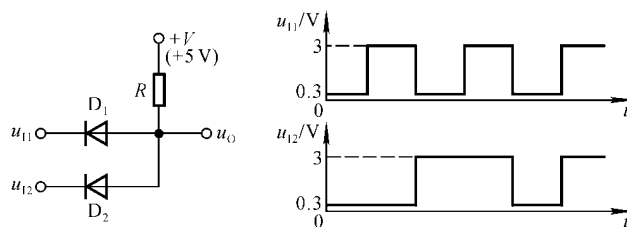


图 P1.4

1.5 现有两只稳压管, 它们的稳定电压分别为 6V 和 8V, 正向导通电压为 0.7V。试问:

- (1) 若将它们串联相接, 可得到几种稳压值? 各为多少?
- (2) 若将它们并联相接, 又可得到几种稳压值? 各为多少?

1.6 已知电路中稳压管的稳定电压 $U_Z = 6V$, 最小稳定电流 $I_{Zmin} = 5mA$, 最大稳定电流 $I_{Zmax} = 25mA$ 。

- (1) 分别计算 U_i 为 10V、15V、35V 三种情况下输出电压 U_o 的值;
- (2) 若 $U_i = 35V$ 时负载开路, 会出现什么现象? 为什么?

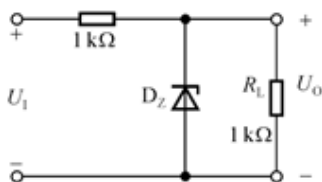


图 P1.6

1.7 已知两只晶体管的电流放大系数 β 分别为 50 和 100, 现测得放大电路中这两只管子两个电极的电流如图 P1.7 所示。分别求另一电极的电流, 标出其实际方向, 并在圆圈中画出管子。

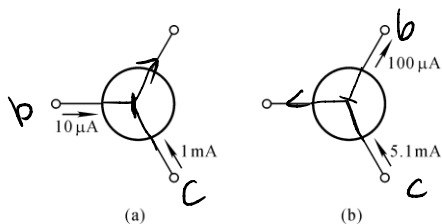


图 P1.7

- 1.8 电路如图 P1.8 所示，晶体管导通时 $U_{BE}=0.7V$ ， $\beta=50$ 。试分析 u_i 为 0V、1V、3V 三种情况下晶体管的工作状态及输出电压 u_o 的值。

$u_i = 0V \Rightarrow$ 截止

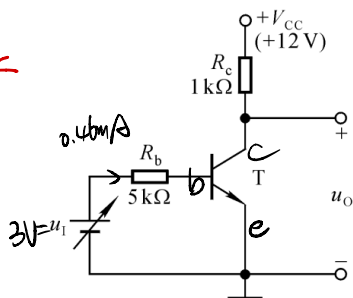


图 P1.8

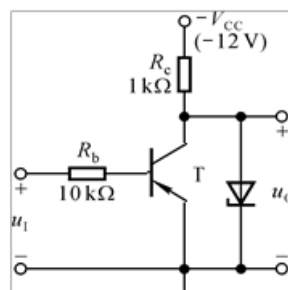


图 P1.9

- 1.9 电路如图 P1.9 所示，晶体管的 $\beta=50$ ， $|U_{BE}|=0.2V$ ，饱和管压降 $|U_{CES}|=0.1V$ ；稳压管的稳定电压 $U_Z=5V$ ，正向导通电压 $U_D=0.5V$ 。试问：当 $u_i=0V$ 时 $u_o=?$ 当 $u_i=-5V$ 时 $u_o=?$

- 1.10 分别判断图 P1.10 所示各电路中晶体管是否有可能工作在放大状态。

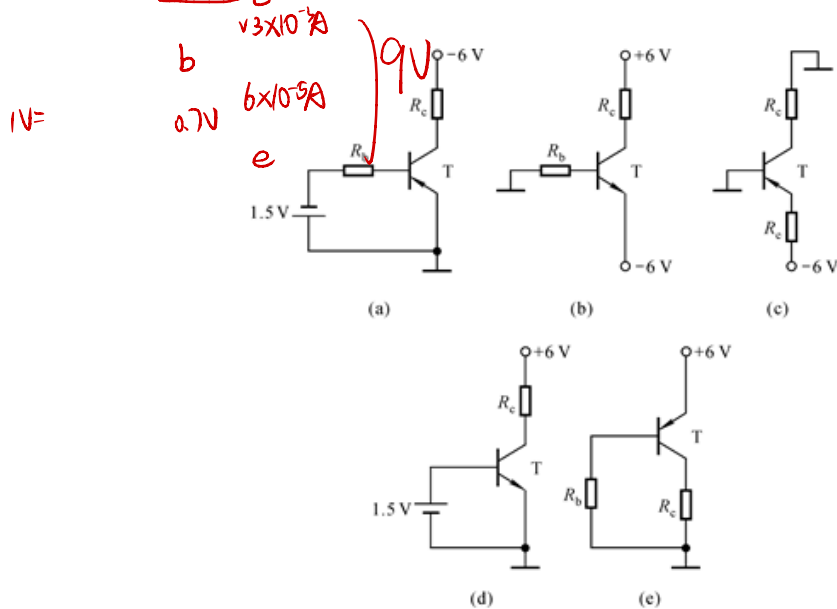


图 P1.10