



## 项目 1



# 认识半导体元器件

### 项目导读

半导体元器件是电子电路中使用最为广泛的元器件,也是构成集成电路的基本单元。为了准确分析电子电路的工作原理并合理使用半导体元器件,我们必须掌握半导体元器件的结构、性能、工作原理及其特点。本项目主要介绍二极管、晶体管和场效应管的结构、性能、主要参数以及各元器件的选用原则。

### 学习目标

知识目标	1. 二极管基本知识; 2. 晶体管的基本知识
能力目标	1. 半导体元器件的识别、检测能力; 2. 仪器仪表使用能力
学习重难点	1. 掌握二极管的符号、特性、应用、检测; 2. 掌握晶体管的符号、特性、应用、检测

## 任务 1.1 认识二极管

### ■ 想一想:

- (1) 什么是半导体? 其材料和特性是什么?
- (2) 二极管的结构、符号是怎样的?
- (3) 晶体管的结构、符号是怎样的?

带着问题查阅相关资料,请学生以组为单位进行讨论,得出以上问题的答案后,及时写在项目日志上。

## 1.1.1 二极管的相关知识

### 1. 半导体基础知识

#### 1) 半导体的概念

导电性能介于导体与绝缘体之间的物质被称为半导体。常用的半导体材料包括硅(Si)、锗(Ge)、硒(Se)、砷化镓(GaAs)及其他金属氧化物和硫化物等,这些半导体材料一般呈晶体结构。

#### 2) 半导体的特性

半导体之所以引起人们注意并得到广泛应用,其主要原因并不仅仅在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,更重要的是它有以下几个特点。

(1) 掺杂性。在半导体中掺入微量杂质,可改变其电阻率和导电类型。

(2) 温度敏感性。半导体的电阻率对温度变化很敏感,且随着掺杂浓度的不同,电阻温度系数可能为正或为负。

(3) 光敏感性。光照能改变半导体的电阻率。

根据半导体的以上特点,可将其制成各种半导体元器件,如热敏元件、光敏元件、二极管、晶体管及场效应管等。

#### 3) 本征半导体

不含任何杂质且晶体结构排列整齐的半导体称为本征半导体。本征半导体的最外层电子(即价电子)除受到原子核的吸引外,还受到共价键的束缚。这种情况下,价电子很难挣脱原子核的吸引力和共价键的束缚成为自由电子,因此其导电能力相对较差。

本征半导体的导电能力随着外界条件的改变而发生变化。它具有热敏特性和光敏特性,即当温度升高或受到光照时,半导体材料的导电能力会增强。这是因为价电子从外界获得能量,能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子。这时,在共价键结构中留下相同数量的空位,每当原子失去价电子后,都会变成一个带正电荷的离子。从等效的角度看,每个空位相当于带一个基本电荷量的正电荷,称为空穴,如图 1-1 所示。在半导体中,空穴也参与导电,其导电的实质是在电场作用下,相邻共价键中的价电子填补了空穴,从而产生新的空穴,这些新的空穴又会被其相邻的价电子填补,这个过程持续下去,就相当于带正电荷的空穴在移动。

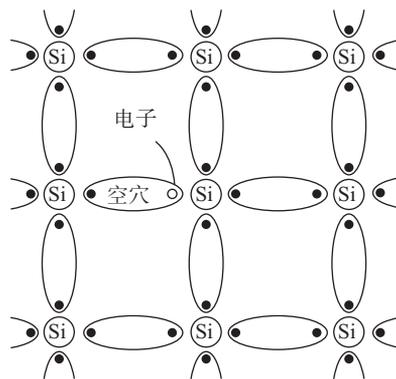


图 1-1 共价键结构与空穴产生的示意



#### 4) N 型和 P 型半导体

本征半导体的导电能力差,但是在本征半导体中掺入某种微量元素(杂质)后,它的导电能力可增加几十万甚至几百万倍。其中,N 型和 P 型半导体就是在本征半导体基础上通过掺杂杂质实现的。

(1) N 型半导体。用特殊工艺在本征半导体中掺入微量五价元素,如磷或砷。这种元素在和半导体原子组成共价键时,会多出一个电子。这个多余的电子不受共价键的束缚,很容易成为自由电子并参与导电。这种掺入五价元素后,电子为多数载流子,而空穴为少数载流子的半导体称为电子型半导体,简称 N 型半导体,如图 1-2(a)所示。

(2) P 型半导体。在半导体硅或锗中掺入少量三价元素,与含有外层电子数是 4 个的硅或锗原子组成共价键时,会自然形成一个空穴,这使得半导体中的空穴载流子增多,导电能力增强。这种掺入三价元素后,空穴为多数载流子,而自由电子为少数载流子的半导体称为空穴型半导体,简称 P 型半导体,如图 1-2(b)所示。

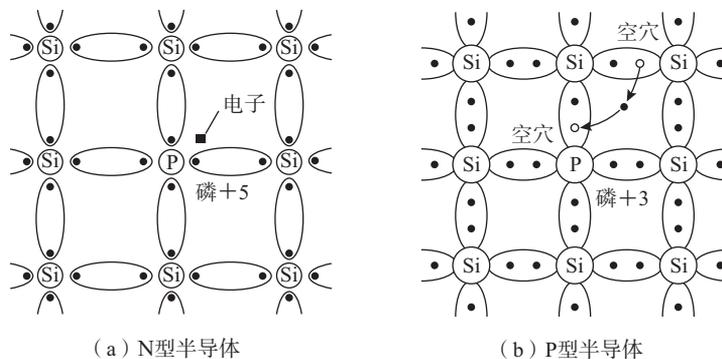


图 1-2 掺杂半导体共价键结构示意图

#### 5) PN 结

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然得到极大增强,但仍不能直接用来制造半导体元器件。通常是在一块纯净的半导体晶体上,采取特定的工艺措施,在两侧掺入不同的杂质,分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,它们的交界面就形成了 PN 结。PN 结是构成各种半导体元器件的基础。

(1) PN 结的形成。在一块纯净的半导体晶体上,采用特殊掺杂工艺,在两侧分别掺入三价元素和五价元素。一侧形成 P 型半导体,另一侧形成 N 型半导体,如图 1-3 所示。

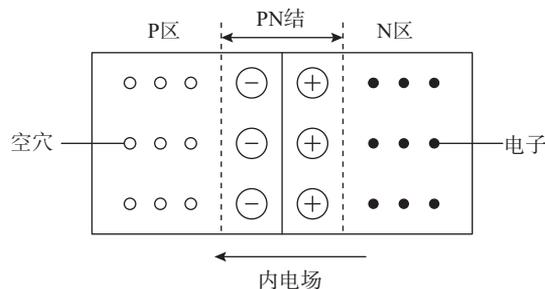


图 1-3 PN 结的形成

P区的空穴浓度大,空穴会向N区扩散;N区的电子浓度大,电子会向P区扩散。这种在浓度差作用下多数载流子的运动称为扩散运动。空穴带正电,电子带负电,这两种载流子在扩散到对方区域后复合并消失,但在P型半导体和N型半导体交界面的两侧分别留下了不能移动的正、负离子,形成了一个空间电荷区,这个空间电荷区就称为PN结。PN结的形成会产生一个由N区指向P区的内电场,内电场的产生会阻碍P区和N区间多数载流子的相互扩散运动。同时,在内电场的作用下,P区中的少数载流子和N区中的少数载流子会越过交界面向对方区域运动。这种在内电场作用下少数载流子的运动称为漂移运动。漂移运动和扩散运动最终会达到动态平衡,使PN结的宽度保持一定。

(2) PN结的单向导电性。如果在PN结的两端施加正向电压,即P区接电源的正极,N区接电源的负极,称为PN结正偏,如图1-4(a)所示。外加电压在PN结上所形成的外电场与PN结内电场的方向相反,削弱了内电场的作用,破坏了原有的动态平衡,使PN结变窄,增强了多数载流子的扩散运动,形成较大的正向电流,这时称PN结为正向导通状态。

如果给PN结外加反向电压,即P区接电源的负极,N区接电源的正极,称为PN结反偏,如图1-4(b)所示。外加电压在PN结上所形成的外电场与PN结内电场的方向相同,增强了内电场的作用,破坏了原有的动态平衡,使PN结变厚,加强了少数载流子的漂移运动,因此少数载流子的数量很少,所以只有很小的反向电流,一般情况下可以忽略不计。这时称PN结为反向截止状态。

综上所述,PN结正偏时导通,反偏时截止,因此它具有单向导电性,这也是PN的特性。

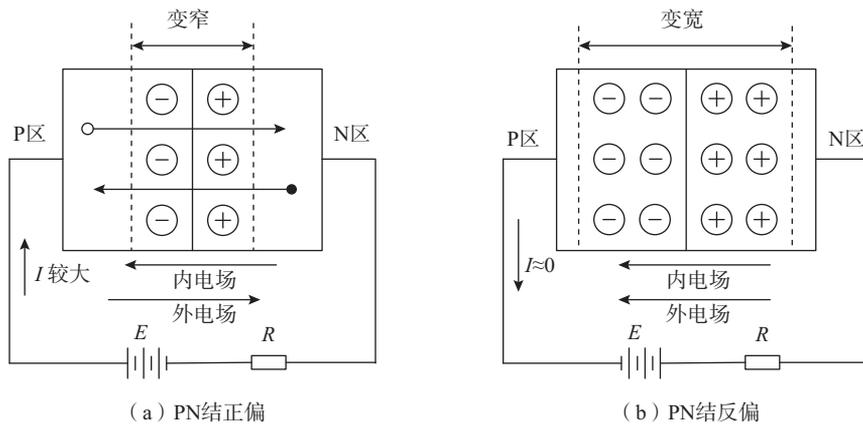


图 1-4 PN 结的单向导电性

## 2. 半导体二极管

### 1) 二极管的结构

在PN结的两端各引出一根电极引线,然后用外壳封装起来就构成了半导体二极管,简称二极管,如图1-5(a)所示。由P区引出的电极称正极(或阳极),由N区引出的电极称负极(或阴极)。电路符号中的箭头方向表示正向电流的流通方向,如图1-5(b)所示。

### 2) 二极管的类型

二极管的种类很多,按制造材料分类,主要有硅二极管和锗二极管;按用途分类,主要有整流二极管、检波二极管、稳压二极管、开关二极管等;按接触面积大小分类,可分为点接触型和面接触型两类。其中,点接触型二极管是由一根很细的金属触丝(如三价元素铝材质)



和一块 N 型半导体(如 N 型锗片)的表面接触构成,然后在正方向通过很大的瞬时电流,使金属触丝和 N 型锗片牢固地接在一起,从而构成 PN 结,如图 1-5(c)所示。

由于点接触型二极管金属触丝很细,因此形成的 PN 结很小,这导致它不能承受较大的电流和较高的反向电压。

面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,其结构如图 1-5(d)所示。由于这种二极管的 PN 结面积较大,因此可承受较大的电流。但其极间电容较大,使得这类器件更适用于低频电路,尤其是整流电路。硅工艺面型二极管的结构如图 1-5(e)所示,它是集成电路中常见的一种形式。

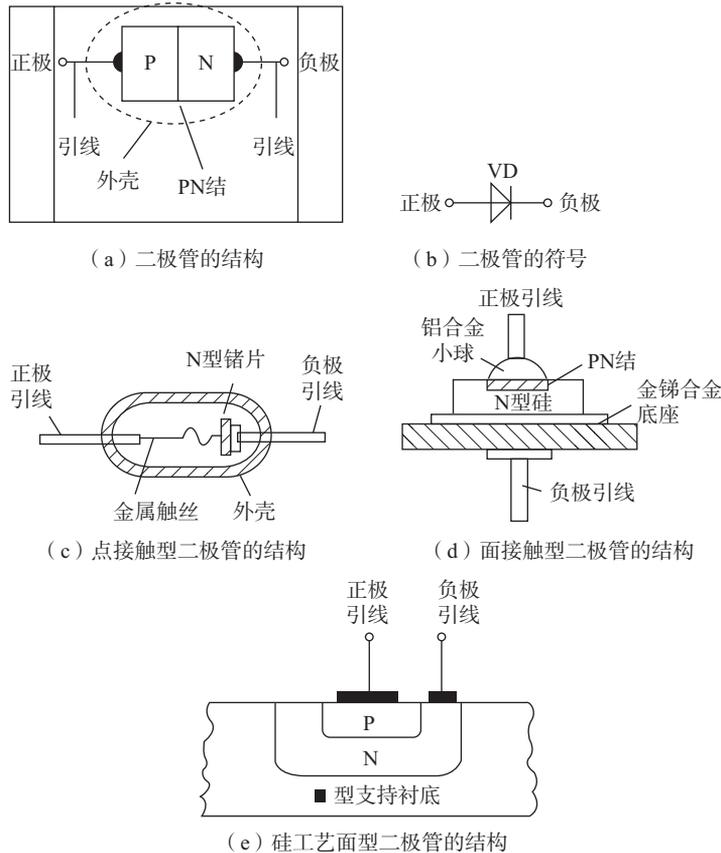


图 1-5 半导体二极管的结构和符号

### 3) 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端的端电压(伏特)与流过二极管的电流(安培)之间的关系,这一特性可以通过实验数据来说明。以二极管 2CP31 为例,当外加正向电压和反向电压时,该二极管两端电压  $U$  和流过电流  $I$  的一组实验数据分别见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 二极管 2CP31 外加正向电压的实验数据

电压 $U/\text{mV}$	0	100	500	550	600	650	700	750	800
电流 $I/\text{mA}$	0	0	0	10	60	85	100	180	300

表 1-2 二极管 2CP31 外加反向电压的实验数据

电压 $U/\text{mV}$	0	-10	-20	-60	-90	-115	-120	-125	-135
电流 $I/\text{mA}$	0	-10	-10	-10	-10	-25	-40	-150	-300

将表 1-1 和表 1-2 中的实验数据绘成曲线,可得到二极管的伏安特性曲线,如图 1-6 所示。

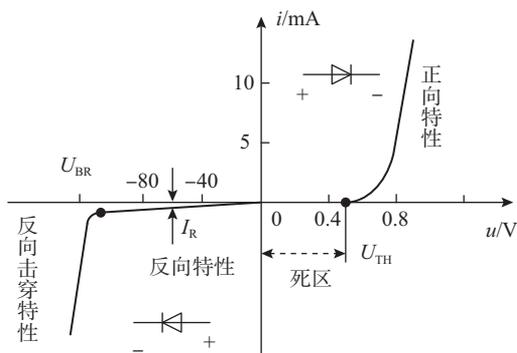


图 1-6 半导体二极管的伏安特性曲线

(1) 正向特性。当二极管外加正向电压时,其电流和电压的关系称为二极管的正向特性。当二极管所加正向电压较小时( $0 < U < U_{\text{TH}}$ ),二极管上几乎没有电流流过,此时二极管处于截止状态,这一区域称为死区, $U_{\text{TH}}$ 称为死区电压(也称门槛电压)。硅二极管的死区电压约为 0.5V,锗二极管的死区电压约为 0.1V。

当二极管所加正向电压大于死区电压时,正向电流增加,二极管导通,电流随电压的增大而上升,这时二极管呈现的电阻很小,认为二极管处于正向导通状态。硅二极管的正向导通压降约为 0.7V,锗二极管的正向导通压降约为 0.3V。

**说明:**二极管的导通压降是指当二极管处于正向偏置状态(即阳极相对于阴极为正电压)时,使流经二极管的电流开始显著增加的电压值。在这个电压下,二极管开始从高阻态变为低阻态。

(2) 反向特性。当二极管外加反向电压时,其电流和电压的关系称为二极管的反向特性。由图 1-6 可见,当二极管外加反向电压时,反向电流很小,并且在相当宽的反向电压范围内,反向电流几乎不变。因此,称此电流值为二极管的反向饱和电流。此时,二极管呈现的电阻很大,可以认为二极管处于截止状态。一般来说,硅二极管的反向电流比锗二极管的反向电流要小很多。

(3) 反向击穿特性。由图 1-6 可见,当反向电压增大到  $U_{\text{BR}}$  时,若反向电压轻微增加,反向电流会急剧上升,此现象称为反向击穿,其中  $U_{\text{BR}}$  为反向击穿电压。对于常规二极管来说,反向击穿现象可能会导致元器件损坏。然而,稳压二极管在设计 and 制造过程中,其 PN 结经过了特殊调整,即使反向电流过大,也不会被损坏,并且其反向电压值能稳定在反向击穿电压  $U_{\text{BR}}$  附近。因此,二极管的反向击穿特性常应用于稳压二极管中,但一般的二极管不允许在反向击穿区工作。



#### 4) 二极管的主要参数

电子元器件的参数是国家标准或制造厂家为生产的元器件所设定的技术指标和数值要求,这些参数是合理选择和正确使用元器件的依据。二极管的参数可以在产品手册上查到,下面对二极管的几种常用参数进行简要介绍。

(1) 最大整流电流  $I_{FM}$ 。 $I_{FM}$  是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。其值与 PN 结的材料、面积及散热条件有关。在使用大功率二极管时,为了散热,一般要加散热片。

(2) 最高反向工作电压  $U_{RM}$  (反向峰值电压)。 $U_{RM}$  是指二极管在使用时允许外加的最大反向电压,其值通常是二极管反向击穿电压的一半左右。在实际使用时,二极管所承受的最大反向电压值不应超过  $U_{RM}$ ,以防止二极管发生反向击穿。

(3) 反向电流  $I_R$  与最大反向电流  $I_{RM}$ 。 $I_R$  是指在室温下,二极管未击穿时的反向电流值。 $I_{RM}$  是指二极管在常温下承受最高反向工作电压  $U_{RM}$  时所产生的反向电流,该值一般很小,但它受温度影响很大。当温度升高时, $I_{RM}$  显著增大。

(4) 最高工作频率  $f_M$ 。如果二极管的工作频率超过一定值,就可能失去单向导电性,这一频率称为最高工作频率。

 **说明:** 如果二极管的工作频率超过一定值,就可能失去单向导电性,这是因为二极管的响应速度具有局限性。在高频条件下,二极管无法迅速实现从截止到导通或从导通到截止的状态转换。当电流方向改变时,二极管需要一段时间来消除存储在其 PN 结中的少数载流子,这段时间称为反向恢复时间。因此,为了保持单向导电性,必须选择适合特定频率范围的二极管类型。

反向恢复时间主要由 PN 结的结电容大小决定。由于电容充放电过程需要一定的时间,这个时间会限制元器件的开关速度。因此,结电容越大,元器件的开关速度就越慢,其能够有效工作的最大频率也就越低。点接触型二极管的结电容较小, $f_M$  可达几百兆赫兹;面接触型二极管结电容较大, $f_M$  只能达到几十兆赫兹。

 **注意:** 产品手册上给出的参数是在一定测试条件下测得的数值。如果测试条件发生变化,相应参数也会随之改变。因此,在选择使用二极管时应注意留有裕量。

### 3. 特殊二极管

#### 1) 稳压二极管

稳压二极管是一种在规定的反向电流范围内可以重复击穿的硅平面二极管。其伏安特性曲线、图形符号及稳压电路如图 1-7 所示。稳压二极管的正向伏安特性与普通二极管相同。不同的是,稳压二极管主要利用其反向伏安特性来工作:当通过电阻  $R$  将流过稳压二极管的反向击穿电流  $I_Z$  限制在  $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$  时,稳压二极管两端的电压变化不大(即  $\Delta U_Z$  很小),也就是  $U_Z$  几乎保持不变,如图 1-7(a)所示。利用稳压二极管的这种特性,就能达到稳压的目的。

稳压二极管的稳压电路如图 1-7(c)所示。稳压二极管  $U_Z$  与负载  $R_L$  并联,构成并联稳压电路。此时负载两端的输出电压  $U_O$  等于稳压二极管的稳定电压  $U_Z$ 。

稳压二极管的主要参数如下。

(1) 稳定电压  $U_Z$ 。 $U_Z$  是指稳压二极管在反向击穿时稳定工作的电压值。不同型号的稳压二极管,其  $U_Z$  值不同,应根据需要查手册确定。

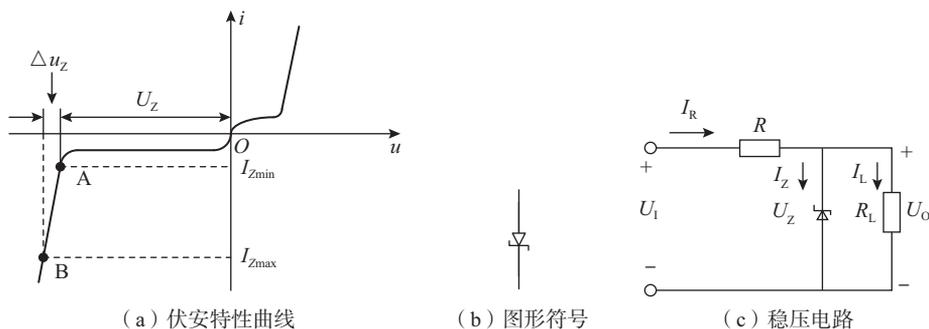


图 1-7 稳压二极管的伏安特性曲线、图形符号及稳压电路

(2) 稳定电流  $I_Z$ 。 $I_Z$  是指稳压二极管在正常工作时所需的最小电流值。如果实际工作电流小于  $I_Z$ , 那么稳压二极管的稳压性能差, 甚至失去稳压作用。

(3) 动态电阻  $R_Z$ 。 $R_Z$  是指稳压二极管在反向击穿工作区内, 电压的变化量与对应的电流变化量的比值, 即

$$R_Z = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-1)$$

式中:  $R_Z$  越小, 稳压性能越好。

## 2) 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管, 是一种将光信号转换为电信号的特殊二极管。与普通二极管一样, 其基本结构也是一个 PN 结, 它的管壳上设有一个嵌着玻璃的窗口, 以便光线射入。光电二极管的外形及符号如图 1-8 所示。

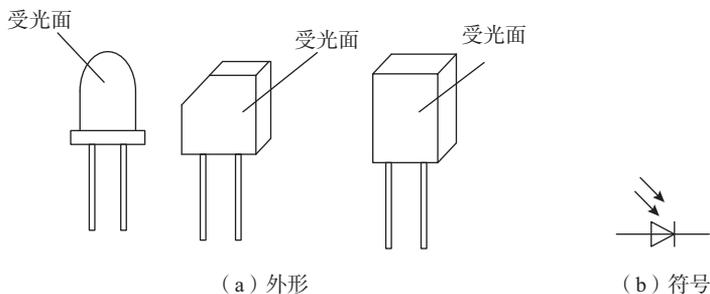


图 1-8 光电二极管的外形及符号

当光电二极管反偏且无光照时, 流过它的电流(称为暗电流)很小。当有光照时, 光电二极管会产生电子-空穴对(称为光生载流子), 在反向电压的作用下, 流过它的电流(称为光电流)会明显增强。利用这一特性可以制成光电传感器, 将光信号转变为电信号, 从而实现控制或测量等功能。

如果将发光二极管和光电二极管组合并封装在一起, 就会构成二极管型光电耦合器。光电耦合器可以实现输入和输出电路的电气隔离, 以及信号的单方向传递。它在数模混合电路或计算机控制系统中常用作接口电路。



### 3) 发光二极管

发光二极管(LED)是一种将电能转换成光能的特殊二极管,其外形和符号如图 1-9 所示。在 LED 的管头一般都加装了玻璃透镜。

通常制成 LED 半导体的掺杂浓度很高。当向 LED 施加正向电压时,大量的电子和空穴在空间电荷区复合,释放出的能量大部分转换为光能,从而使 LED 发光。

LED 通常由砷、磷、镓等半导体及其化合物制成,其发光颜色主要取决于所用的半导体材料。通电后,LED 不仅能发出红、绿、黄等可见光,还能发出不可见的红外光,使用时必须正向偏置。LED 工作时只需 1.5~3V 的正向电压和几毫安的电流就能正常发光。由于 LED 允许的工作电流小,因此在实际应用中应串联一个限流电阻。

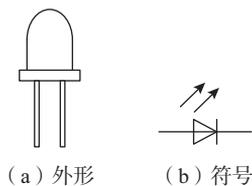


图 1-9 发光二极管的外形和符号

## 1.1.2 二极管的测量方法

使用万用表二极管挡可测量二极管的类型并判断其是否完好。

(1) 正向测量时,红表笔接正极,黑表笔接负极,此时表头会显示数字。当显示数字为 200 多时,表示该二极管为锗管;当显示数字在 600~700 时,该二极管为硅管。

(2) 反向测量时,红表笔接负极,黑表笔接正极,此时表头电阻无穷大。

(3) 若正向和反向测量的数值都很小,则二极管被击穿。

(4) 若正向和反向测量的数值都为无穷大,则二极管断路。

## 任务 1.2

## 认识晶体管

### 想一想:

- (1) 晶体管有几个 PN 结?
- (2) 晶体管的种类有哪些?
- (3) 晶体管的结构、分区、引脚、符号是怎样的?

带着问题查阅相关资料,请学生以组为单位进行讨论,得出以上问题的答案后,及时写在项目日志上。

## 1.2.1 晶体管的相关知识

### 1. 晶体管的符号和工作原理

晶体管是电子电路中基本的电子元器件之一,在模拟电子电路中,其主要作用是构成放大电路。

#### 1) 晶体管的结构和类型

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



晶体管介绍

个 PN 结,三个区引出三个电极,就构成晶体管。采用平面工艺制成的 NPN 型硅材料晶体管的结构示意图如图 1-10(a)所示。位于中间的 P 区称为基区,它很薄且掺杂浓度很低;位于上层的 N 区是发射区,其掺杂浓度最高;位于下层的 N 区是集电区,其集电结面积很大。集电区和发射区虽然属于同一类型的掺杂半导体,但不能调换使用。NPN 型管的结构示意图如图 1-10(b)所示,基区与集电区相连接的 PN 结称集电结,基区与发射区相连接的 PN 结称发射结。由三个区引出的三个电极分别称集电极 c、基极 b 和发射极 e。

晶体管按三个区的组成形式,可分为 NPN 型和 PNP 型,如图 1-10(c)所示。从符号上区分,NPN 型发射极箭头指向外,而 PNP 型发射极箭头指向内。发射极的箭头方向除了用来区分晶体管的类型外,更重要的是表示晶体管工作时电流的流动方向。

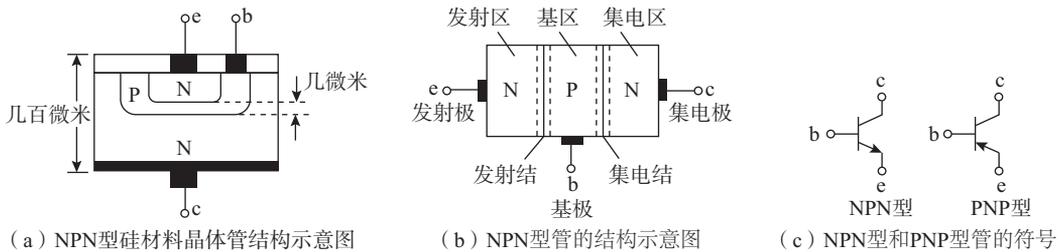


图 1-10 晶体管的结构示意图

晶体管根据所用的半导体材料,可分为硅管和锗管;根据功率大小,可分为大功率管、中功率管和小功率管;根据工作频率的不同,可分为低频管和高频管等。常见的晶体管类型如图 1-11 所示。



图 1-11 常见晶体管的类型

## 2) 晶体管的工作原理

为了实现晶体管的电流放大作用,除了制造时必须具备内部条件外,还必须满足一定的外部条件。无论是 NPN 型晶体管还是 PNP 型晶体管,都应将发射结加正偏电压,集电结加反偏电压。下面以 NPN 型晶体管为例,说明晶体管的电流放大原理。对于 NPN 型晶体管,可按如图 1-12 所示的电路分析其内部载流子的运动过程以及各极电流的形成情况。

(1) 发射区发射自由电子,形成发射极电流  $I_E$ 。当发射结施加正向电压时,在外电场作用下,发射区的多数载流子(自由电子)越过发射结扩散到基区(发射区的自由电子由直流电源补充),而基区的多数载流子(空穴)越过发射结扩散到发射区,从而形成了发射极电流  $I_E$ ,  $I_E$  的方向与电子流的方向相反。

(2) 基区复合电子形成基极电流  $I_B$ 。发射区发射到基区的大量自由电子只有很少一部分与基区的空穴复合,形成基极电流  $I_B$ ,复合的空穴由基极直流电源补充。

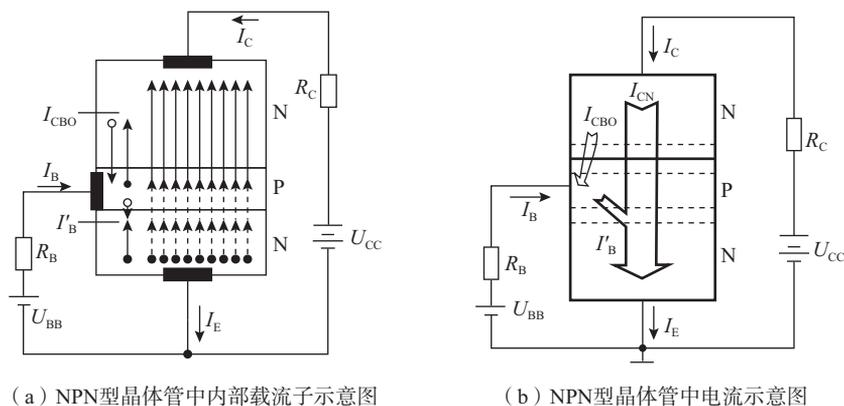


图 1-12 NPN 型晶体管中电流产生示意图

(3) 集电区收集自由电子,形成集电极电流  $I_C$ 。由于集电结施加反向电压且基区很薄,在基区没有被复合的大量带负电荷的自由电子在外电场的作用下被吸引到集电区,形成集电极电流  $I_C$ 。另外,基区的少数载流子(自由电子)和集电区的少数载流子(空穴)在集电极反向电压作用下会进行漂移运动,这些漂移运动的载流子成了集电极电流的一部分,这部分电流称为反向饱和电流  $I_{CBO}$ ,它们受温度影响比较大。由于  $I_{CBO}$  较小,一般分析时可忽略不计。

**说明:**因为反向饱和电流是由少数载流子的漂移运动形成的,而这些少数载流子是由本征激发产生的,温度越高,本征激发产生的少数载流子越多,所以反向饱和电流也就越大。

发射极电流  $I_E$ 、基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$  三个电流之间的关系为

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-2)$$

当发射结电压  $U_{BE}$  增大时,发射区发射的载流子数量会增多,导致  $I_E$ 、 $I_C$ 、 $I_B$  都相应增大。实验证明,改变  $U_{BE}$  时,  $I_C$  与  $I_B$  几乎按一定比例变化,这一比值用  $\beta$  表示,称为晶体管的电流放大系数,且  $\beta \gg 1$ 。

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-3)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (1-4)$$

$$I_E = I_C + I_B = (1 + \beta) I_B \quad (1-5)$$

从式(1-4)可以看出,当  $I_B$  发生微小变化时,会引发  $I_C$  较大的变化,这就是晶体管的电流放大作用。其实质是一种电流的控制作用,即用基极电流的微小变化来控制集电极电流的较大变化。 $\beta$  越大,  $I_B$  对  $I_C$  的控制作用越强。

## 2. 晶体管的伏安特性和主要参数

### 1) 晶体管的伏安特性

晶体管的伏安特性是指晶体管各极间电流与电压的关系。它是分析晶体管放大性能的主要依据。将晶体管的发射极作为公共端,基极与发射极作为输入端,集电极和发射极作为

输出端,形成共射电路。晶体管的伏安特性测试电路如图 1-13 所示。

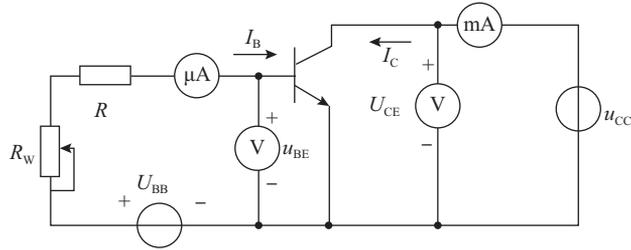


图 1-13 晶体管伏安特性测试电路

(1) 输入特性曲线。晶体管的输入特性曲线表示当晶体管的输出电压  $U_{CE}$  为常数时,基极电流  $i_B$  与基-射电压  $u_{BE}$  之间的关系曲线,即

$$i_B = f(u_{BE}) | U_{CE} = \text{常数} \quad (1-6)$$

图 1-14(a)为实测的输入特性曲线。显然,这一曲线与二极管正向特性曲线相似。

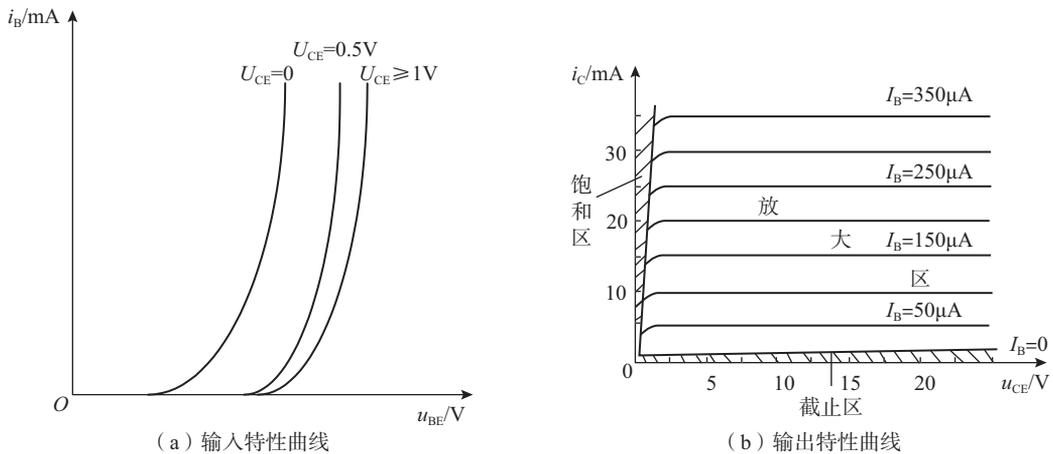


图 1-14 晶体管输入和输出特性曲线

(2) 输出特性曲线。当  $I_B$  为常数时,集电极电流  $i_C$  与集-射电压  $u_{CE}$  之间的关系曲线称为输出特性曲线,即

$$i_C = u_{CE} | I_B = \text{常数} \quad (1-7)$$

图 1-14(b)为实测的输出特性曲线。调节  $R_W$ ,使  $I_B = 50\mu A$ ,并维持这一值保持不变,逐渐调大  $u_{CE}$ ,可测得图 1-14(b)中  $I_B = 50\mu A$  所示的曲线。当取不同的  $I_B$  值时,可得到如图 1-14(b)所示的曲线簇。

从输出特性曲线可看出:

- 曲线起始部分较陡,  $I_B = 0, u_{CE} = 0, u_{CE} \uparrow \rightarrow i_C \uparrow$ 。
- 当  $u_{CE}$  增加到大于 1V 时,曲线变化逐渐趋于平稳,当  $u_{CE}$  进一步增大时,曲线不再产生显著变化,而是一条基本与横轴平行的直线。



在晶体管的输出特性曲线上,可以将晶体管的工作状态分为三个区域,即截止区、放大区和饱和区,如图 1-14(b)所示。

(a) 截止区。一般将  $I_B \leq 0$  的区域称为截止区,在图 1-14(b)中截止区为  $I_B = 0$  的一条曲线的以下部分,此时  $i_c$  也近似为 0。此时由于各极电流都基本等于 0,因而晶体管没有放大作用,发射结反偏,发射区不再向基区注入自由电子,晶体管处于截止状态。即在截止区,晶体的两个结均处于反偏状态。对 NPN 晶体管,  $u_{BE} < 0, u_{BC} < 0$ 。

(b) 放大区。即曲线上比较平坦的部分称为放大区,此时发射结正偏,集电结反偏。表示当  $I_B$  一定时,  $i_c$  的值基本上不随  $u_{CE}$  的变化而变化。在这个区域内,当基极电流发生微小的变化量  $\Delta i_B$  时,相应的集电极电流将产生较大的变化量  $\Delta i_c$ ,  $i_c$  相当于受  $I_B$  控制的受控电流源,有电流放大作用。对于 NPN 晶体管,工作在放大区时,  $u_{BE} \geq 0.7V$ , 而  $u_{BC} < 0$ 。

(c) 饱和区。在输出特性曲线上,不易明确界定饱和区的准确范围,它大致在曲线簇的左侧,即  $u_{CE}$  较小的区域 ( $u_{CE} < u_{BE}$ )。

当晶体管处于饱和状态时,如果保持基极电流  $I_B$  的值不变,那么集电极电流  $i_c$  会随着  $u_{CE}$  的增大迅速增大。此时晶体管失去了电流放大作用。饱和状态时晶体管集电极 c 与发射极 e 间的电压记作  $U_{CES}$ ,称为饱和压降。一般小功率管中,硅管  $U_{CES} = 0.3V$ ,锗管  $U_{CES} = 0.1V$ 。此时发射结、集电结都处于正偏,晶体管处于饱和状态。当集电极外接电阻  $R_C$  阻值很大或者集电极电流  $i_c$  较大时,就会出现这种情况。

## 2) 晶体管的主要参数

晶体管的参数是选择和使用晶体管的重要依据。其参数可分为性能参数和极限参数两大类。值得注意的是,由于制造工艺的离散性,即使是同一型号规格的晶体管,参数也不完全相同。

(1) 电流放大系数  $\beta$  和  $\bar{\beta}$ 。 $\beta$  是晶体管共射连接时的直流放大系数,  $\beta = \frac{I_c}{I_B}$ 。 $\bar{\beta}$  是晶体管共射连接时的交流放大系数,它是集电极电流变化量  $\Delta i_c$  与基极电流变化量  $\Delta i_B$  的比值,即  $\bar{\beta} = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_B}$ 。 $\beta$  和  $\bar{\beta}$  在数值上相差很小,一般情况下可以互相代替。电流放大系数是衡量晶体管电流放大能力的参数,若  $\beta$  值过大,则热稳定性差。

(2) 穿透电流  $I_{CEO}$ 。 $I_{CEO}$  是指当晶体管基极开路(即  $I_B = 0$ )时,集电极与发射极之间的电流。它受温度的影响很大,而晶体管的温度稳定性相对较好。

(3) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。当晶体管的集电极电流  $I_c$  增大时,其  $\beta$  值将减小。当  $I_c$  的增加使  $\beta$  值下降到正常值的  $2/3$  时,此时的集电极电流称为集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。

(4) 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ 。 $P_{CM}$  是晶体管集电结上允许的最大功率损耗,如果集电极耗散功率  $P_c > P_{CM}$ ,晶体管将被烧坏。对于功率较大的晶体管,为了防止过热,应加装散热器。集电极的耗散功率为  $P_c = u_{CE} i_c$ 。

(5) 反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$ 。 $U_{(BR)CEO}$  是晶体管基极开路时,集电极与发射极之间的最大允许电压。当集电极与发射极之间的电压大于此值时,晶体管将被击穿损坏。

## 1.2.2 晶体管的电路分析

晶体管的主要应用体现在以下两个方面：一是工作在放大状态，用作放大器；二是在数字电路中，工作在饱和与截止状态，用作晶体管开关。

放大电路中仅由一个晶体管构成时，称为基本放大电路。共发射极放大电路是一种应用非常广泛的放大电路，下面以 NPN 型晶体管组成的共发射极放大电路为例进行分析。

### 1. 电路组成

在组成晶体管放大电路时，应遵循以下原则。

(1) 要有直流通路，即保证晶体管的发射极处于正偏，集电极处于反偏，使晶体管工作在放大区，以实现电流放大作用。

(2) 要有交流通路，确保输入信号能够加到发射结上，以控制晶体管的电流，且放大后的信号能无失真地从电路中取出，并传送给负载。

### 2. 元器件作用

共发射极基本放大电路如图 1-15 所示，各组成元件的作用如下。

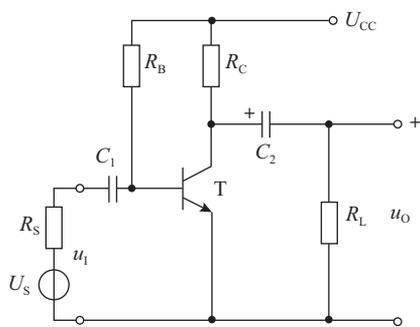


图 1-15 共发射极基本放大电路

(1) 晶体管 T。由于它具有电流放大能力，因此是共发射极基本放大电路的核心元器件，起着控制能量转换的作用。

(2) 直流电源  $U_{CC}$ 。它保证为晶体管提供合适的偏置电压，使晶体管工作在放大区，同时也为信号的放大提供所需的能量。

(3) 偏置电阻  $R_B$ 。其作用是使晶体管获得一个合适的基极直流电流。

(4) 集电极电阻  $R_C$ 。它保证晶体管处于合适的直流工作状态，并使晶体管的电流放大转换成负载上的电压放大。

(5) 电容  $C_1$ 、 $C_2$  称为隔直电容或耦合电容，其作用是隔直流、通交流，即在保证信号正常传输的情况下，使直流电源与交流电源相互隔离，互不影响。采用这种方式连接的放大器，通常称为阻容耦合放大器。

### 3. 工作原理

信号源提供的输入电压  $U_s$ ，加在放大电路的输入端，由于电容  $C_1$  的隔直流、通交流作用，可以认为  $U_s$  直接加在晶体管的基极和发射极之间，引起基极电流  $i_B$  做相应的变化，如



图 1-16(a)所示。通过晶体管 T 的放大作用,  $i_C$  也发生相应的变化, 即

$$i_C = \beta i_B \quad (1-8)$$

$i_C$  的变化使集电极电阻  $R_C$  上的电压也发生变化, 从而使得晶体管的 C、E 极之间电压发生变化, 因为

$$u_{CE} = U_{CC} - i_C R_C \quad (1-9)$$

此时,  $u_{ce}$  中的交流分量经过电容  $C_2$  后传送给负载  $R_L$ , 成为输出电压  $U_o$ 。只要电路参数选择合适, 就可以在负载上得到经过放大的电压信号, 从而实现了电压放大的功能。上述过程中, 除输入电压和输出电压是纯交流电外, 其余的电压和电流中均包含直流分量和交流分量, 它们的波形变化情况如图 1-16(b)所示。

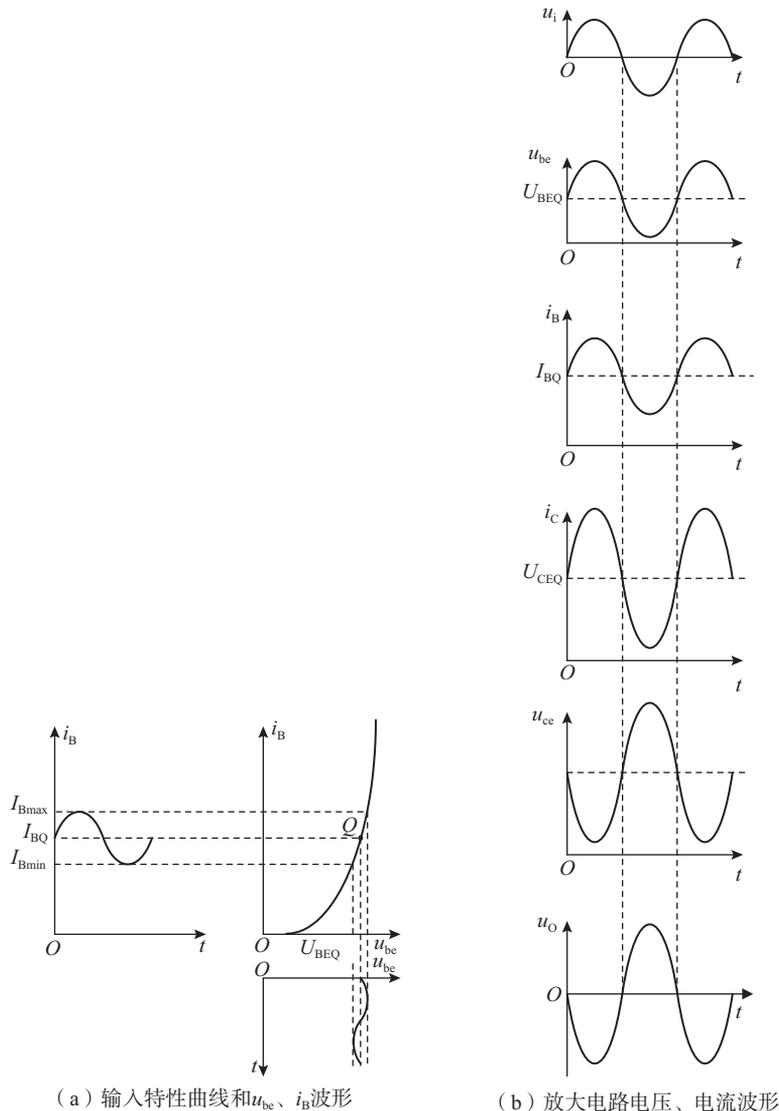


图 1-16 晶体管

### 1.2.3 晶体管的开关作用

晶体管的主要应用分为两个方面：一是工作在放大状态，作为放大器；二是在数字电路中，晶体管工作在饱和与截止状态，作为晶体管开关。实际应用中，常通过测量  $u_{CE}$  值的大小来判断晶体管的工作状态。

**【例 1-1】** 晶体管开关电路如图 1-17 所示，输入信号为幅值  $U_1 = 3V$  的方波，若  $R_B = 100k\Omega$ ,  $R_C = 5.1k\Omega$ ，验证晶体管是否工作在开关状态？

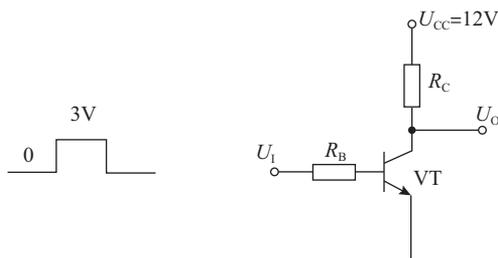


图 1-17 晶体管开关电路

**解：**当  $U_1 = 0$  时， $U_B = U_E = 0$ ,  $I_B = 0$ ,  $I_C = \beta I_B + I_{CEO} = 0$ 。则  $U_C = U_{CC} = 12V$ ，说明晶体管处于截止状态。

当  $U_1 = 3V$  时，取  $U_{BE} = 0.7V$ ，则基极电流为

$$I_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{3 - 0.7}{100 \times 10^3} = 2.3 \times 10^{-5} (A) = 23 (\mu A)$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 23 = 230 (\mu A) = 2.3 (mA)$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = 12 - 2.3 \times 5.1 = 0.27 (V)$$

当  $U_{CE} < U_{CES}$  时，晶体管工作在饱和状态。

可见， $U_1$  为幅值达 3V 的方波时，晶体管工作在开关状态。

## 任务 1.3 认识场效应晶体管

### 想一想：

- (1) 场效应晶体管的作用是什么？
- (2) 场效应晶体管的结构、分区、引脚、符号是怎样的？

带着问题查阅相关资料，请学生以组为单位进行讨论，得出以上问题的答案后，及时写在项目日志上。



### 1.3.1 场效应晶体管的相关知识

#### 1. 场效应晶体管的符号和工作原理

晶体管是电流控制型元器件,使用时信号源必须提供一定的电流,因此输入电阻较低,一般在几百欧至几千欧。场效应晶体管是一种由输入电压控制其输出电流大小的半导体元器件,属于电压控制型元器件;使用时不需要信号源提供电流,因此输入电阻很高(最高可达 $10^{15}\Omega$ ),这是场效应晶体管最突出的优点;此外,场效应晶体管还具有噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强和功耗低等优点,因此得到了广泛的应用。

按结构的不同,场效应晶体管可分为绝缘栅场效应晶体管(IGFET)和结型场效应晶体管(JFET)两大类,它们都只有一种载流子(多数载流子)参与导电,故又称为单极型晶体管。

#### 2. N 沟道增强型 MOS 管的结构和符号

图 1-18 是 N 沟道增强型 MOS 管结构示意图,它以一块掺杂浓度较低的 P 型硅片作为衬底,利用扩散工艺在 P 型衬底上面的左右两侧制成两个高掺杂的 N 区,并用金属铝在两个 N 区分别引出电极,作为源极 s 和漏极 d;然后在 P 型硅片表面覆盖一层很薄的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )绝缘层,在漏极与源极之间的绝缘层上再喷一层金属铝作为栅极 g,另外在衬底引出衬底引线 b(它通常在管内与源极 s 相连接)。可见这种晶体管的栅极与源极、漏极是绝缘的,故称为绝缘栅场效应晶体管。

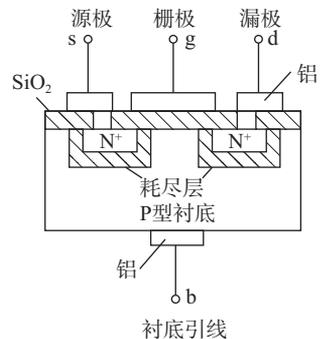
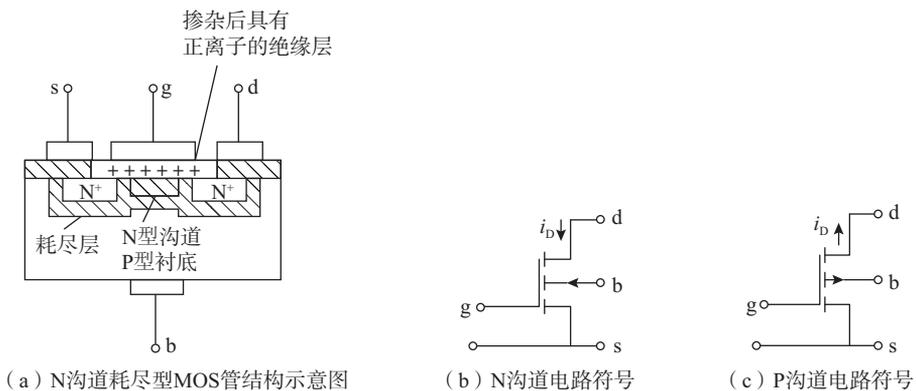


图 1-18 N 沟道增强型 MOS 管结构示意图

这种晶体管由金属、氧化物和半导体制成,故称为 MOSFET,简称 MOS 管。同理,P 沟道增强型 MOS 管是在低掺杂的 N 型硅片的衬底上通过扩散工艺制成两个高掺杂的 P 区而制得的。

#### 3. N 沟道耗尽型 MOS 管的结构和符号

N 沟道耗尽型 MOS 管的结构示意图如图 1-19(a)所示。其结构和增强型基本相同,主要区别在于:这类晶体在制造过程中,已经在  $\text{SiO}_2$  绝缘层中掺入了大量的正离子,在正离子产生的电场作用下,漏极与源极间形成了 N 型导电沟道(即反型层)。其电路符号如图 1-19(b)所示。同理,P 沟道电路符号如图 1-19(c)所示。



(a) N 沟道耗尽型 MOS 管结构示意图

(b) N 沟道电路符号

(c) P 沟道电路符号

图 1-19 耗尽型 MOS 管的结构与符号

### 1.3.2 场效应晶体管的工作原理与特性曲线

下面以 N 沟道增强型 MOS 管为例讲解其工作原理。

#### 1. 工作原理

工作时, N 沟道增强型 MOS 管的栅源电压  $u_{GS}$  和漏源电压  $u_{DS}$  均为正向电压。当  $u_{GS}=0$  时, 漏极与源极之间无导电沟道, 是两个背靠背的 PN 结, 故即使加上  $u_{DS}$ , 也无漏极电流, 即  $i_D=0$ , 如图 1-20(a) 所示。

当  $u_{GS}>0$  且  $u_{GS}$  较小时, 在  $u_{GS}$  作用下, 栅极下面的  $\text{SiO}_2$  层中产生了指向 P 型衬底且垂直于衬底的电场, 这个电场排斥靠近  $\text{SiO}_2$  层的 P 型衬底中的空穴(多数载流子), 同时吸引 P 型衬底中的电子(少数载流子)向  $\text{SiO}_2$  层方向运动。但由于  $u_{GS}$  较小, 吸引电子的电场不强, 只形成耗尽层, 在漏极与源极间尚无导电沟道出现, 即  $i_D=0$ , 如图 1-20(b) 所示。

若  $u_{GS}$  继续增大, 则吸引到栅极  $\text{SiO}_2$  层下面的电子增多, 在栅极附近的 P 型衬底表面形成一个 N 型薄层(电子浓度很大), 由于其导电类型与 P 型衬底相反, 故称为反型层。它将两个 N 区连通, 于是在漏极与源极间形成了 N 型导电沟道, 这时若有  $u_{GS}>0$ , 则会有漏极电流  $i_D$  产生, 如图 1-20(c) 所示。开始形成导电沟道时的  $u_{GS}$  值称为开启电压, 用  $U_{GS(th)}$  表示。一般情况下,  $U_{GS(th)}$  约为几伏。随着  $u_{GS}$  的增大, 沟道变宽, 沟道电阻减小, 漏极电流  $i_D$  增大, 这种  $u_{GS}=0$  时没有导电沟道,  $u_{GS}>U_{GS(th)}$  后才出现 N 型导电沟道的 MOS 管, 称为 N 沟道增强型 MOS 管。

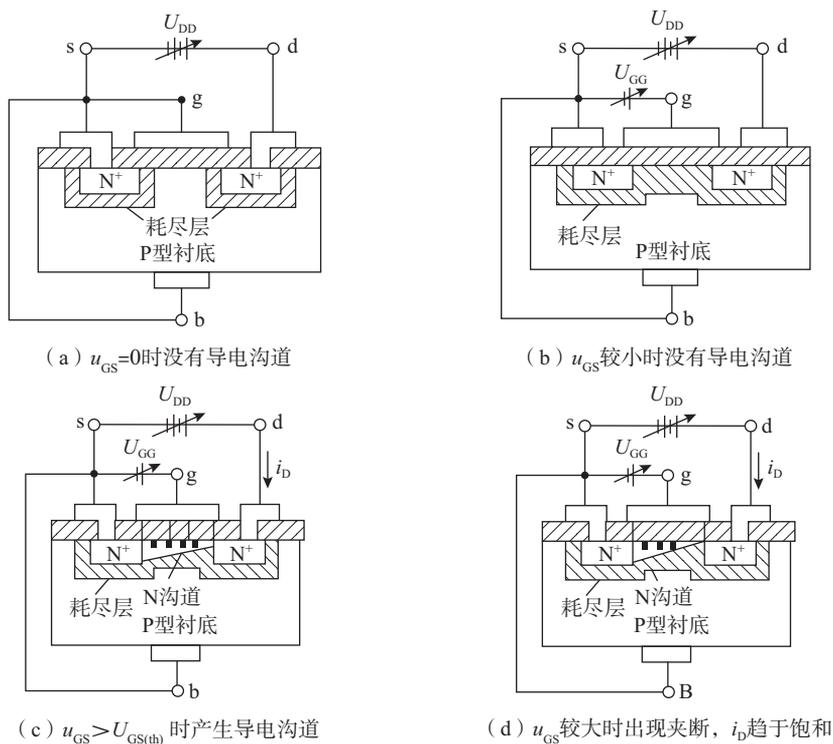


图 1-20 N 沟道增强型 MOS 管工作图解



导电沟道形成后,当  $u_{GS}=0$  时,管内沟道是等宽的。随着  $u_{GS}$  的增加,漏极电流  $i_D$  沿沟道从漏极流向源极并产生电压降,使栅极与沟道内各点的电压不再相等,靠近源极一端的电压最大,其值为  $u_{GS}$ ,靠近漏极一端的电压最小,其值为  $u_{GD}$  ( $u_{GD}=u_{GS}-u_{DS}$ ),于是沟道变得不等宽,靠近漏极处最窄,靠近源极处最宽。

当  $u_{GS}$  增大到使  $u_{GD}=u_{GS}-u_{DS}=U_{GS(th)}$  时,在漏极一端的沟道宽度接近于 0,这种情况称为沟道预夹断。若再增大,夹断区将向源极方向延伸,如图 1-20(d)所示。

## 2. 特性曲线

场效应晶体的特性曲线有输出特性曲线和转移特性曲线两种。因为输入电流(栅极电流)几乎等于 0,所以讨论场效应晶体的输入特性是没有意义的。场效应晶体的输出特性又称为漏极特性。 $i_D$  与漏源电压  $u_{DS}$  和栅源电压  $u_{GS}$  有关,当栅源电压  $u_{GS}$  为某一常数时,漏极电流  $i_D$  与漏源电压  $u_{DS}$  之间的关系式为输出特性关系式,即

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS}=\text{常数}} \quad (1-10)$$

当漏源电压  $u_{DS}$  为某一常数时,漏极电流  $i_D$  与栅源电压  $u_{GS}$  之间的关系式为转移特性关系式,即

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=\text{常数}} \quad (1-11)$$

N 沟道增强型 MOS 管共源组态的输出特性曲线和转移特性曲线分别如图 1-21(a)和图 1-21(b)所示。

N 沟道增强型 MOS 管的输出特性曲线可分为四个区域,即可变电阻区、恒流区、夹断区和击穿区。

(1) 可变电阻区(也称非饱和区)。满足  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  (开启电压)且  $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$ ,为图 1-21(a)中预夹断轨迹左边的区域,其沟道开启。在该区域  $u_{DS}$  值较小,沟道电阻基本上仅受  $u_{GS}$  的控制。当  $u_{GS}$  一定时, $i_D$  与  $u_{DS}$  呈线性关系,该区域近似为一条直线。这时场效应晶体管漏极和源极间相当于一个受电压  $u_{GS}$  控制的可变电阻。

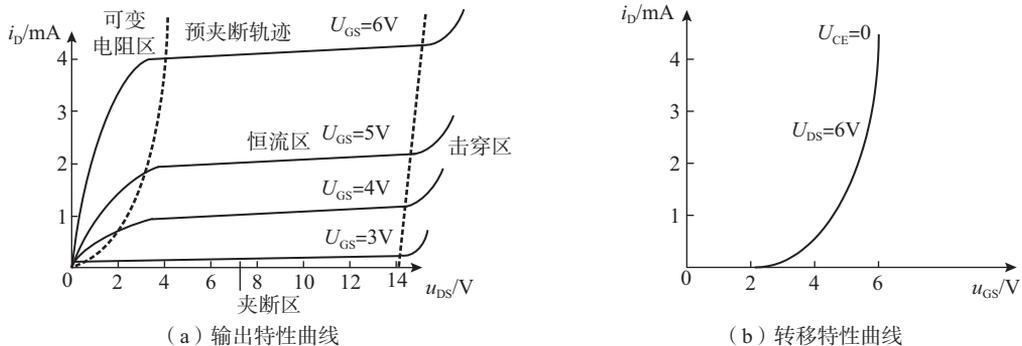


图 1-21 N 沟道增强型 MOS 管共源组态的输出特性曲线和转移特性曲线

(2) 恒流区(也称饱和区、放大区、有源区)。满足  $u_{GS} = U_{GS(th)}$  且  $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$ ,为图 1-21(a)中预夹断轨迹右边尚未击穿的区域,当  $u_{GS}$  一定时, $i_D$  几乎不随  $u_{DS}$  的变化而变化,故呈恒流特性。 $i_D$  仅受  $u_{GS}$  的控制,这时场效应晶体管漏极和源极间相当于一个受电压

$u_{GS}$  控制的电流源。场效应晶体管用于放大电路时,一般就工作在该区域,所以也称为放大区。

(3) 夹断区(也称截止区)。满足  $u_{GS} < U_{GS(th)}$ , 为图 1-21(a) 中靠近横轴的区域,其沟道被全部夹断,称为全夹断,即  $i_D = 0$ , MOS 管不工作。

(4) 击穿区。位于图 1-21(a) 中右边的区域,随着  $u_{DS}$  的不断增大,PN 结因承受太大的反向电压而击穿,  $i_D$  急剧上升。工作时应避免 MOS 管工作在击穿区。

转移特性曲线可以从输出特性曲线上用作图的方法求得。例如,在图 1-21(a) 中作  $u_{DS} = 6V$  的垂直线,将其与各条曲线的交点对应的  $i_D$ 、 $u_{GS}$  值在  $i_D - u_{GS}$  坐标中连成曲线,即得到转移特性曲线,如图 1-21(b) 所示。

### 1.3.3 场效应晶体管的技术参数

#### 1. 开启电压 $U_{GS(th)}$ 和夹断电压 $U_{GS(off)}$

当  $U_{DS}$  一定时,使漏极电流  $i_D$  等于某一微小电流,此时栅极与源极之间所加的电压为  $u_{GS}$ ,对于增强型 MOS 管称为开启电压  $U_{GS(th)}$ ,对于耗尽型 MOS 管称为夹断电压  $U_{GS(off)}$ 。

#### 2. 饱和漏极电流 $I_{DSS}$

饱和漏极电流  $I_{DSS}$  是耗尽型 MOS 管的参数,指工作在饱和区的耗尽型 MOS 管在  $u_{GS} = 0$  时的饱和漏极电流。

#### 3. 直流输入电阻 $R_{GS}$

直流输入电阻  $R_{GS}$  是指漏极与源极间短路时,栅极与源极之间所加直流电压与栅极直流电压之比。一般 JFET 的  $R_{GS} > 10^7 \Omega$ ,而 MOS 管的  $R_{GS} > 10^9 \Omega$ 。

#### 4. 低频跨导(互导) $g_m$

低频跨导(互导)  $g_m$  是指在  $U_{DS}$  为某定值时,漏极电流  $i_D$  的变化量与  $u_{GS}$  的变化量之比。

## ◆ 项目小结 ◆

本项目是全书的基础,介绍了半导体的元器件,包含二极管、晶体管及场效应晶体管的结构、原理、符号及技术参数等知识。

## ◆ 习 题 ◆

1. 【单选题】硅材料的二极管的正向导通电压为( )V。  
A. 0.3                      B. 0.7                      C. 2                      D. 3
2. 【单选题】二极管的主要特性是具有( )。  
A. 热敏性                      B. 光敏性  
C. 掺杂性                      D. 单向导电性

