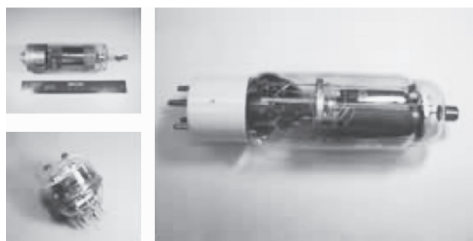


第1章 半导体及其基本器件

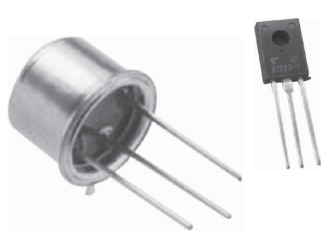
章节概述

20世纪40年代末，科学家发现了半导体（Semiconductor）晶体对电信号的放大作用，从而改变了电子管在电子技术领域一统天下的局面，使电子技术步入了辉煌的半导体时代。半导体器件具有体积小、重量轻、低功耗、寿命长、转换效率高等电子管不具备的优点。如今各种各样的半导体器件层出不穷，基于半导体技术的集成电路功能越来越强大，其优越性更是无与伦比，把半导体的各项优势发挥到了极致。随着半导体器件和集成电路在现代电子技术中的广泛应用，各种电子设备在微型化、可靠性等方面得到极大提高。我们使用的计算机、手机、MP3播放器以及直流充电器等都是半导体器件和集成电路应用的成果。

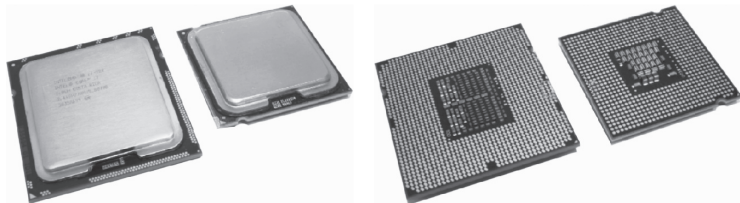
二极管和三极管是最基本的半导体器件，也是制作集成电路的基础。它们的结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路的每个电子爱好者所必须熟悉的。PN结是构成二极管和三极管的基本单元结构。本章从讨论半导体的导电特性和PN结的单向导电性开始，依次介绍半导体二极管、双极型三极管和MOS场效应管等常用半导体器件。从这里开始，本书将带领你踏入奇妙的电子世界。如果你能结合所学的典型电路，动手在面包板上亲自搭建由元器件构成的电路进行实践，或者用电路仿真软件搭建电路进行仿真，你会发现学习电子技术真的不难。



电子管



晶体三极管



左图中左边器件是Core i7 Extreme 920四核Nehalem架构处理器（共集成了7.31亿个晶体管）

右图是该芯片背面引脚特写



1.1 半导体的基本知识

导 入

当今信息时代，以半导体材料为芯片的各种产品已广泛进入人们的生产生活中，如我们身边的LED平板电视机、智能手机、计算机以及天上的人造卫星等。计算机是数字生活中的重要设备，它的核心部件是中央处理器（CPU）和存储器（RAM），是以大规模集成电路为基础制造起来的，而这些集成电路均由半导体材料制作而成，半导体材料为什么会有如此广泛的应用呢？半导体材料具有哪些特性呢？

学习目标

- (1) 了解半导体材料的特性。
- (2) 熟悉本征半导体、杂质半导体。
- (3) 熟悉PN结的形成。
- (4) 掌握PN结的单向导电性。

单 元 知 识

1.1.1 半导体材料

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一类材料，常用的半导体材料有硅Si、锗Ge、砷化镓GaAs，还有其它半导体材料如硼B、磷P、铟In和锑Sb等。Si是半导体中应用最广的材料，由于Si存量巨大，设计与制造技术成熟，硅晶体管的价钱便宜，温度稳定性高，因而在电子元器件和集成电路的制造和应用中处于主导地位。制作集成电路要求半导体晶片（如Si片等）必须要有大的直径、高的晶体完整性、高的几何精度和高的洁净度，所以半导体材料是否容易制作是它能否大量应用的重要条件。Si在这方面优势明显。Ge也容易加工，但温度稳定性差，因而已较少应用。

为了使集成电路具有高效率、低能耗、高速度的性能，相继发展了GaAs、InP等半导体单晶材料和SiC、GaN、ZnSe、金刚石等宽禁带半导体材料以及SiGe/Si、SOI（Silicon On Insulator）等新型硅基材料。砷化镓制成的半导体晶体管的工作速度是硅管的5倍，因而可用于制作高速高频的电子线路，同时它还具有高温、低温性能好，噪声小，抗辐射能力强等优点，在制作微波器件和高速数字电路方面得到广泛应用。砷化镓是半导体材料中兼具多方面优点的新型材料，但制作工艺相对不成熟，成本比较昂贵。随着对砷化镓等新型材料的深入研究，制造工艺不断进步，砷化镓等新型材料有望挑战硅在半导体材料中的主导

地位。

除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外，半导体还具有一些特殊的性质，如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等，即半导体受到光照和热辐射时，或在纯净的半导体中掺入微量的其它特定元素（也称“杂质”）后，它的导电能力将有明显的增强。正是利用半导体的这些特点，才制造出许多现代电子器件，为了理解这些特点，必须先了解半导体的内部结构。

1.1.2 本征半导体

完全纯净且结构完整的半导体晶体叫做本征半导体，它们都是四价元素，原子最外层轨道上具有4个电子，称为价电子。物质的物理、化学等性质是由价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关。现代半导体材料主要使用硅和锗，其外层均有4个价电子，而原子核和除价电子外的内层电子组成惯性核（相当于带有4个单位正电荷，在图1-1-2中用 $\oplus 4$ 代表惯性核）。

制造半导体器件的硅和锗是单晶材料，具有金刚石结构，其晶体共价键结构如图1-1-1所示。它们的原子形成有序的排列，每个硅（锗）原子的4个价电子与相邻的4个硅（锗）原子的各一个价电子分别结成共用电子对，形成稳定的共价键，如图1-1-2所示。

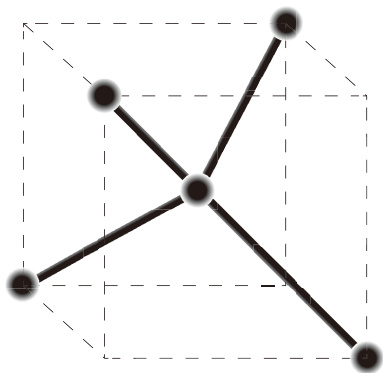


图1-1-1 硅和锗的晶体共价键结构

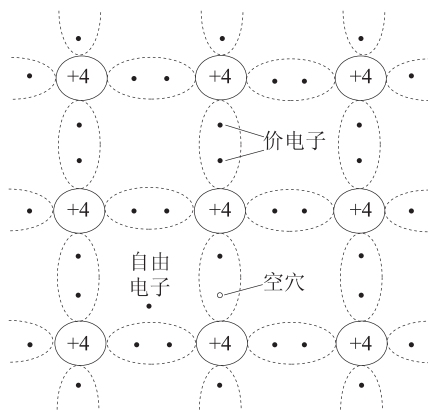


图1-1-2 硅和锗的晶格结构图

1. 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在绝对温度0K时，本征半导体中没有载流子，呈绝缘体特性。在室温下，本征半导体中少数共价键中的电子因受热而获得能量，摆脱原子核的束缚，从共价键中挣脱出来，成为自由电子。与此同时，失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下了一个空位，因自由电子带负电荷，可将其留下的空位看成带正电荷的粒子，称其为空穴。由于本征硅或锗每产生一个自由电子必然会有一个空穴对应出现，即电子与空穴成对出现，所以称为电子空穴对，如图1-1-3所示。在室温下，本征半导体内产生的电子空穴对数目很少，因此其导电能力差。

2. 本征半导体的热敏特性和光敏特性

本征半导体受热或光照后其导电能力大大增强。当温度升高或光照增强时，本征半导体内的原子运动加剧，有较多的电子获得能量成为自由电子，即电子空穴对增多，所以本征半导体中电子空穴对的数目与温度和光照有密切关系。温度越高（温度每升高10℃左



右，硅中的载流子浓度约增加一倍)、光照越好，本征半导体内载流子数目越多，导电性越强，这就是本征半导体的热敏特性和光敏特性。利用这种特性可以做成各种热敏元件和光敏元件，这些元件，可用于控制路灯的光敏管、用于控制温度的热敏管等，在自动控制系统中有着广泛的应用。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入其它微量元素，可使其导电能力大大加强。例如，在硅本征半导体中掺入千万分之几的其它微量元素，它的导电能力就会增强数百万倍，这就是本征半导体的掺杂特性。掺入的微量元素称为杂质，掺入杂质后的本征半导体称为杂质半导体。因掺入杂质的性质不同，杂质半导体可分为P（空穴）型半导体和N（电子）型半导体两大类。

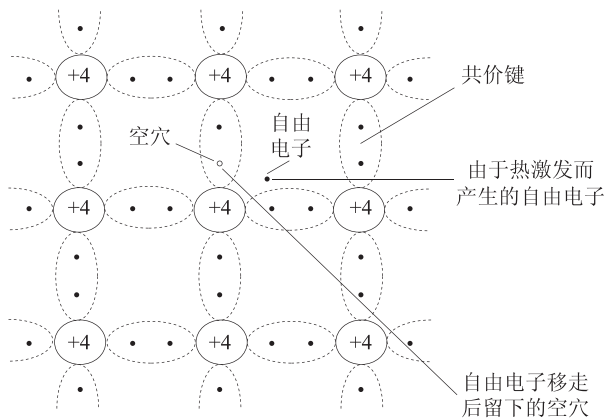


图1-1-3 共价键被打破而产生空穴和自由电子

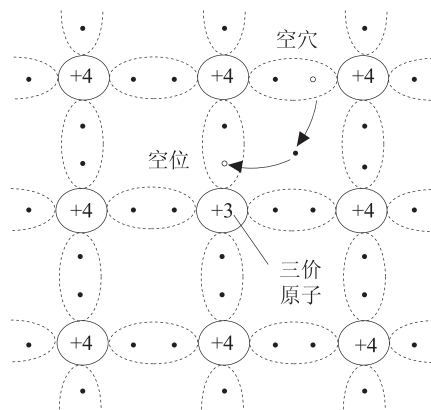


图1-1-4 P型半导体的共价键结构

1. P型半导体

如果在四价本征半导体中掺入微量三价元素，如硼B、镓In等，由于它的最外层只有3个价电子，在与周围4个本征原子组成共价键时，少一个电子而在共价键中产生一个空位，当相邻本征原子外层电子填补此空位时，本征原子共价键中失去一个电子而产生一个空穴，每掺入一个硼原子就能产生一个空穴，而无自由电子产生，所以，空穴数目远大于自由电子的数目，这种半导体叫做P型半导体，如图1-1-4所示。在P型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，带正电；电子是少数载流子，简称“少子”，带负电，但整个P型半导体呈现电中性。

2. N型半导体

如果在四价本征半导体中掺入微量五价元素，如磷P、砷As等，磷原子的最外层有5个价电子，只有4个价电子与周围4个本征原子形成四对共价键，多余的第五个电子被挤出共价键成为自由电子，因此每掺入一个磷原子就能产生一个自由电子，而无空穴产生，所以自由电子的数目大量增加，在半导体内产生的自由电子数量多于空穴数量，这种半导体叫做N型半导体，如图1-1-5所示。在N型半导体中，电子是多数载流子，简称“多子”，空穴是少数载流子，简称“少子”，整个N型半导体呈现电中性。

杂质半导体中“多子”的浓度取决于掺入杂质的多少，而“少子”的浓度与温度有密切的关系。

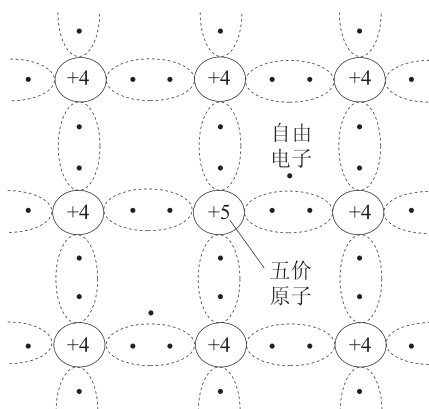


图1-1-5 N型半导体的共价键结构

1.1.4 PN结及其单向导电性

PN结是P型与N型半导体界面处形成的电学区域，是组成半导体器件的基本结构。

1. PN结的形成

用不同的掺杂工艺使同一半导体（如本征硅）一侧形成P型半导体，而另一侧形成N型半导体。此时，在它们的界面处就出现了自由电子和空穴的浓度差别，如图1-1-6所示。

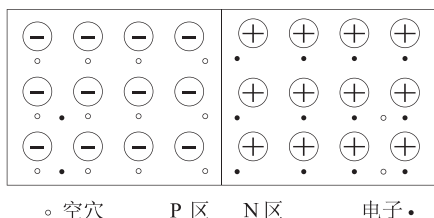


图1-1-6 浓度差使载流子发生扩散运动

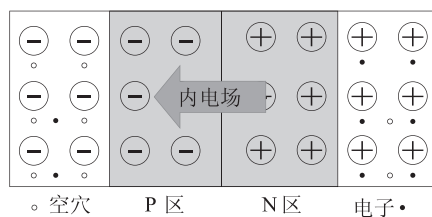


图1-1-7 内电场形成

P区的多子空穴浓度大大高于N区的少子空穴浓度，而N区的多子自由电子浓度大大高于P区的少子自由电子浓度，由于存在载流子的浓度差，载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域扩散。因此，P区的多子空穴向N区扩散，而N区的多子自由电子向P区扩散，由载流子扩散运动形成的电流叫扩散电流。当载流子通过两种半导体的交界面后，在交界面附近的区域里，P区扩散到N区的空穴与N区的自由电子复合，N区扩散到P区的自由电子与P区的空穴复合。扩散的结果破坏了P区和N区交界面附近的电中性条件。在P区一侧由于失去空穴，留下了不能移动的负离子；在N区一侧由于失去自由电子，留下了不能移动的正离子。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷，它们集中在P区和N区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区（如图1-1-7中阴影部分所示），这就是我们所说的PN结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方区域并复合掉了，或者说消耗了，因此空间电荷区又叫耗尽层，它的电阻率很高。扩散作用越强，空间电荷区越宽。在出现了空间电荷区以后，正负离子的电荷在空间电荷区中形成了一个由N区指向P区的电场。由于这个电场是因内部载流子的扩散运动（而不是由外加电压）形成的，因此叫内电场。空间电荷区越宽，内电场越强。显然，内电场的方向与多子扩散方向相反，因此它阻碍P区和N区的多子继续向对方区域扩散。另一方面，在内电场作用下，P区和N区的少数载流子因受电场力作用将



做定向运动。这种运动叫漂移运动，由此引起的电流叫漂移电流。这样，P区的少子自由电子向N区漂移，从而补充了N区交界面附近因扩散而失去的自由电子，使正离子减少；而N区的少子空穴向P区漂移，从而补充了P区交界面附近因扩散而失去的空穴，使负离子减少。因此，漂移运动的结果使空间电荷区变窄，其作用正好与扩散运动相反。

由此可见，在有P区和N区的同一半导体内，多子的扩散运动和少子的漂移运动是相互联系又相互对立的。多子的扩散运动使空间电荷区加宽，内电场增强。内电场的建立和增强又阻止多子的扩散，增强少子的漂移，其结果使空间电荷区变窄，内电场减弱，有利于多子的扩散。如此相互制约，相互促进，最后多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡。此时，扩散电流和漂移电流大小相等，方向相反，通过空间电荷区的净电流等于零，空间电荷区的宽度和内电场的强度为定值。

空间电荷区内基本不存在导电的载流子，导电率很低，相当于介质，两侧的P区和N区则导电率相对较高，相当于导体，与电容的结构有相似之处，所以PN结具有电容效应，这种效应称为PN结的结电容。

2. PN结的单向导电性

PN结具有特殊性质——单向导电性。PN结在外加电压作用下，形成了电流。外加电压的极性不同，流过PN结的电流大小有极大差别。

1) PN结外加正向电压

如图1-1-8所示，PN结外加电压的正端接P区，负端接N区，称PN结处于正向偏置，这时外加电场方向与PN结内电场方向相反，所起作用也相反，即：助长扩散运动，抑制漂移运动。在这个外加电场作用下，PN结原来扩散与漂移之间的动态平衡状态被打破，当P区空穴进入空间电荷区内后，就要和原来的一部分负离子中和，使P区一侧的空间电荷量减少。同样，当N区电子进入PN结时，中和了部分正离子，使N区一侧的空间电荷量减少，结果使空间电荷区变窄，即耗尽区厚度变薄（从原来未加电压时的11'变到22'），内电场被削弱，有利于多子的扩散而不利于少子的漂移，扩散运动起主要作用。

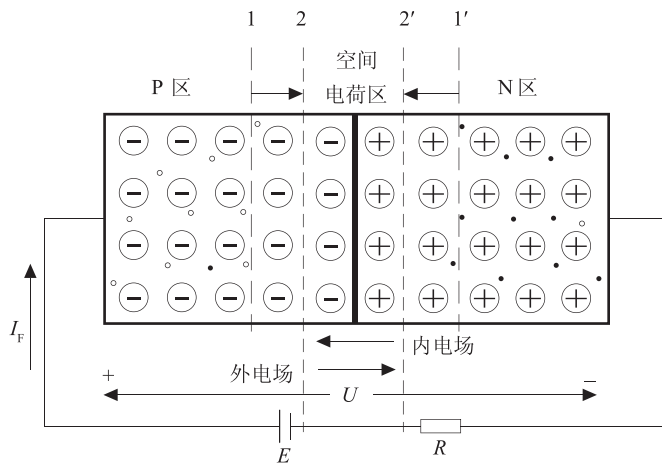


图1-1-8 外加正向电压时的PN结

当外加电压升高，PN结内电场便进一步减弱，扩散电流随之增加，在正常工作范围内，PN结上外加电压只要稍有变化（如0.1V），便能引起电流的显著变化，因此电流 I_F 将随外加电压的增加急速上升。这样，正向偏置的PN结表现为一个很小的电阻，在外电场作用下，多子将向PN结移动，结果，P区的多子空穴将源源不断地流向N区，而N区的多子自由电子亦不断流向P区，这两股载流子的流动就形成了PN结的正向电流。表现在外电路上是形成一个流入P区的大电流，称为正向电流 I_F 。

2) PN结外加反向电压

如图1-1-9所示，外加电压的正端接N区，负端接P区，称PN结处于反向偏置。这时外加电场方向与PN结内电场方向相同，PN结内电场被增强。所起作用：抑制扩散运动，助长漂移运动。在这种外电场作用下，P区中的空穴和N区中的自由电子都将进一步离开PN结，使耗尽区厚度加宽（从 $22'$ 变为 $11'$ ），这样P区和N区中的多数载流子就很难越过空间电荷区，因此扩散电流趋近于零。但此时，P区和N区中的少数载流子更容易产生漂移运动而形成漂移电流，因此在这种情况下，PN结的电流主要是漂移电流。漂移电流的方向与扩散电流相反，表现在外电路上是一个流入N区的电流 I_R ，称为反向电流。由于少数载流子的浓度很小，因此 I_R 是很微弱的，一般为 μA 级（甚至是 nA 级）。同时，少数载流子是由本征激发产生的，其数值决定于温度，在一定温度 T 下，由于热激发而产生的少数载流子的数量是一定的，反向电流几乎不随外加电压而变化，电流的值趋于恒定，如图1-1-9所示。这时的反向电流 I_R 就是反向饱和电流，用 I_S 表示。由于 I_S 很小，因此PN结在反向偏置时，呈现出一个很大的电阻。此时可认为它基本是不导电的。但 I_S 受温度的影响较大，在有些实际应用中，还必须予以考虑。

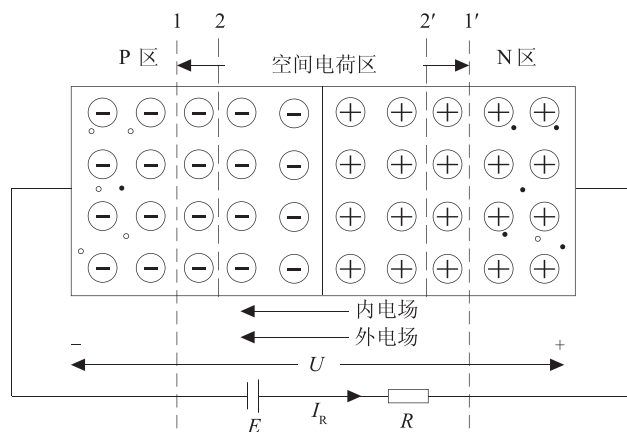


图1-1-9 外加反向电压时的PN结

综上所述，当PN结正偏时，正向电阻很小，回路产生一个较大的电流，PN结处于导通状态；当PN结处于反偏时，反向电阻很大，回路的电流几乎为零，PN结处于截止状态，这就是PN结的单向导电性。

3) PN结的伏安特性

PN结的伏安特性是指PN结两端的外加电压与流过PN结的电流之间的关系曲线。根据理论分析，PN结的伏安特性可用下式表示为

$$i = I_S \left(e^{\frac{u}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中： i 为通过PN结的电流；

u 为PN结两端的外加电压；

U_T 为温度的电压当量。

常温下 $U_T = kT/q \approx 0.026\text{V}$ ，其中 k 为玻耳兹曼常数（ $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ）， T 为热力学温度， q 为电子电荷（ $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ）； e 为自然对数的底； I_S 为反向饱和电流。由式（1-1）可以画出其伏安特性曲线，如图1-1-10所示。

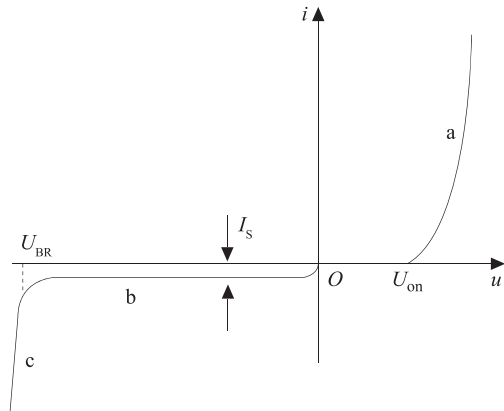


图1-1-10 PN结的伏安特性

(1) 当PN结两端加正向电压, 电压 u 为正值, 当 u 很小时, 式(1-1)中 $e^{\frac{u}{U_T}} \approx 1$, $i \approx 0$, PN结未导通, 称为死区; 当 u 比 U_T 大几倍时, 式(1-1)中 $e^{\frac{u}{U_T}}$ 远大于1, 1可以忽略。这样, PN结的电流 i 与电压 u 成指数关系, 如图1-1-10中的正向电压部分a所示, 等效电阻小, 正向电流大, 称为正向导通区。

(2) 当PN结外加反向电压, u 为负值。若 u 比 U_T 大几倍时, 指数项趋近于零, 因此 $i = -I_S$, 即反向电压达到一定数值后, PN结的反向电流就是反向饱和电流, 与外加反向电压的大小基本无关, 为一常数 I_S , 如图1-1-10中的反向电压部分b所示, 反向电流小, 等效电阻大, 称为反向截止区; 当 $|u| > U_{BR}$ 时, 反向电流迅速增大, 称为反向击穿区, 如图1-1-10曲线中的线段c所示。

4) 温度对PN结特性的影响

PN结的特性对温度的变化特别敏感, 反映在伏安特性上即为: 温度升高, 正向特性曲线左移, 反向特性曲线下移。具体变化规律为: 温度每升高 1°C , 正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$; 温度每升高 10°C , 反向饱和电流 I_S 约增大一倍。

3. PN结的反向击穿特性

当加到PN结两端的反向电压增大到一定数值(U_{BR})后, 反向电流会急剧增加, 如图1-1-10中左下边部分c所示。这个现象就称为PN结的反向击穿。发生击穿所需反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。产生PN结反向击穿的原因是: 自由电子和空穴的数目在强电场作用下大大地增加, 引起反向电流的急剧增加, 这种现象产生的机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种。雪崩击穿的物理过程为: 当PN结外加反向电压增加时, 空间电荷区中的电场随着增强, 从而使在漂移运动中少子(既有电子也有空穴)的运动速度加快, 并获得足够的动能。它们在晶体中不断地与晶体原子发生碰撞, 使共价键中的电子激发形成新自由电子—空穴对, 新电子—空穴与原有的电子—空穴一样, 在电场作用下, 又会受到电场的加速获得能量, 并撞击别的原子, 再产生电子—空穴对, 这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后, 载流子的倍增情况就像在陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样, 载流子增加得多而快, 使反向电流急剧增大, 造成PN结击穿, 称为雪崩击穿。雪崩击穿电压与半导体的掺杂浓度有关, 掺杂浓度低时击穿电压数值大。另一种是齐纳击穿, 只会在掺杂浓度特别大的PN结中出现, 因为杂质浓度大, 空间电荷区内电荷密度(即杂质离子密度)也大, 因而空间电荷区很窄, 在外加较小反向电压(一般为几伏)下, PN结空间电荷区中就

形成一个强电场，它能够将共价键中被束缚电子强行拉出，产生电子-空穴对，形成较大的反向电流，造成PN结击穿，这就是齐纳击穿。它的物理过程和雪崩击穿完全不同。雪崩击穿和齐纳击穿统称为电击穿。上述两种电击穿过程是可逆的，当加在PN结上的反向电压降低后，PN结仍可以恢复原来的状态，但前提条件是反向电流和反向电压的乘积不超过PN结允许的耗散功率。

若反向电流和反向电压的乘积超过PN结允许的耗散功率，就会因为热量散不出去而使PN结温度上升，而结温升高使反向电流更加增大，电流增大又使结温进一步升高，如此恶性循环，很快会把PN结烧毁，这种现象称为热击穿。热击穿真正烧毁PN结，不可逆转。

必须指出，热击穿和电击穿的概念是不同的。电击穿往往可为人们所利用（如稳压管），而热击穿则是必须尽量避免的。



练一练

一、选择题

1. 在本征半导体中掺入三价元素后的半导体称为（ ）。
A. 本征半导体 B. P型半导体 C. N型半导体 D. 混合半导体
2. N型半导体中少数载流子为（ ）。
A. 自由电子 B. 空穴
C. 带正电的杂质离子 D. 带负电的杂质离子
3. P型半导体（ ）。
A. 带正电 B. 带负电 C. 电中性 D. 不带电
4. PN结加正向电压时，其正向电流是（ ）。
A. 多数载流子扩散形成的 B. 多数载流子漂移形成的
C. 少数载流子漂移形成的 D. 少数载流子扩散形成的
5. 在本征半导体中，电子浓度（ ）空穴浓度。
A. 大于 B. 等于 C. 小于 D. 与温度有关
6. 本征半导体温度升高以后（ ）。
A. 自由电子增多，空穴数基本不变
B. 空穴数增多，自由电子数基本不变
C. 自由电子数和空穴数都增多，且数目相同
D. 自由电子和空穴数都不变
7. PN结未加外部电压时，扩散电流（ ）漂移电流。
A. 大于 B. 小于 C. 等于 D. 不确定
8. PN结正偏时正向电阻很小，正向电流很大，呈（ ）状态；PN结反偏时反向电阻很大，反向电流很小，呈（ ）状态。
A. 截止 B. 导通 C. 不通不断 D. 无法判断

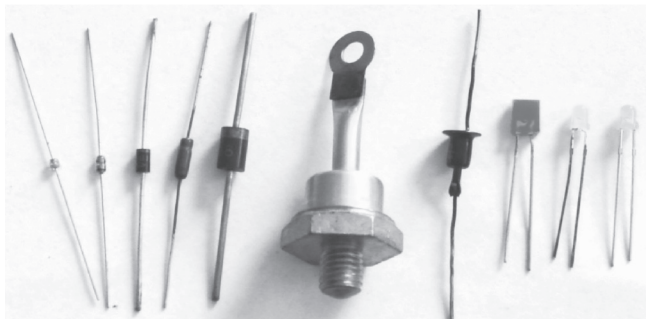
二、填空题

1. 在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于_____，而少数载流子的浓度则与_____有很大关系。
2. N型半导体是在本征半导体中掺入_____，P型半导体是在本征半导体中掺入_____。
3. PN结加正向电压时，由_____形成电流，其耗尽层变_____；加反向电压时，由_____形成电流，其耗尽层变_____。
4. 当温度升高时，PN结的反向电流变_____。

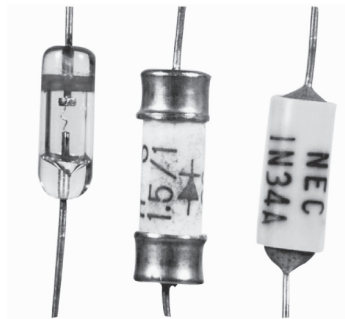
1.2 二极管

导入

收音机是如何从电波中提取出音频信号，使我们从耳机或喇叭中听到广播节目呢？直流充电器又是如何将交流电变为直流电呢？这些功能的实现都依赖二极管的独特作用。二极管的工作原理是什么？它在电路中有怎样的作用呢？



常用二极管



检波二极管

学习目标

- (1) 熟悉二极管的结构和类型。
- (2) 掌握二极管的伏安特性和主要参数。
- (3) 掌握二极管的简化模型和简单应用电路。

单元知识

1.2.1 基本结构与类型

1. 基本结构

晶体二极管（简称二极管）是有一个PN结的半导体器件，其基本结构是将PN结两端各加上一根电极引线，再用管壳封装组成，如图1-2-1（a）所示。二极管的两根引线分别称为正极和负极，也称阳极和阴极，P型半导体一侧引出的电极称为正（阳）极，N型半导体一侧引出的电极称为负（阴）极。

2. 类型

二极管的分类按所用半导体材料分硅二极管和锗二极管；按用途分普通二极管和特殊二极管，通常所说的二极管是指普通二极管；按内部结构可分为点接触型、面接触型和平



面型三类。

1) 点接触型二极管

如图1-2-1(a)所示,点接触型是由一根金属丝与半导体表面相接触,经过特殊工艺,在触点上形成PN结,做出引线,加上管壳封装而成。其突出优点是PN结面积很小,因此结电容很小,一般在1pF以下,适用于在高频(可达1 000MHz以上)信号下工作。其缺点是不能承受较高的正向电压和通过大的正向电流。因此点接触型二极管多用于高频检波以及在脉冲数字电路中作开关元件。

2) 面接触型二极管

如图1-2-1(b)所示,面接触型二极管的PN结是采用合金法工艺制作的,PN结面积较大,结电容也较大,因此,它能通过较大的正向电流,且反向击穿电压高,工作温度也较高,但其工作频率低,所以多用在大功率低频整流电路中。

3) 平面型二极管

如图1-2-1(c)所示,平面型二极管采用硅扩散法工艺制作而成,用二氧化硅做保护层,大大减少了PN结两端的漏电流,质量好,批量生产中产品性能较一致。平面型二极管结面积较小的用做高频管或开关元件,结面积较大的用作大功率调整管。

根据二极管的不同结构类型,分别用于检波、整流、限幅、开关、稳压等电路中。

二极管的符号如图1-2-1(d)所示,其中左边符号为国标符号,右边符号为国际符号。二极管符号形象地表示了电流流动的方向,即电流只能从正极流向负极,而不允许反方向流动。

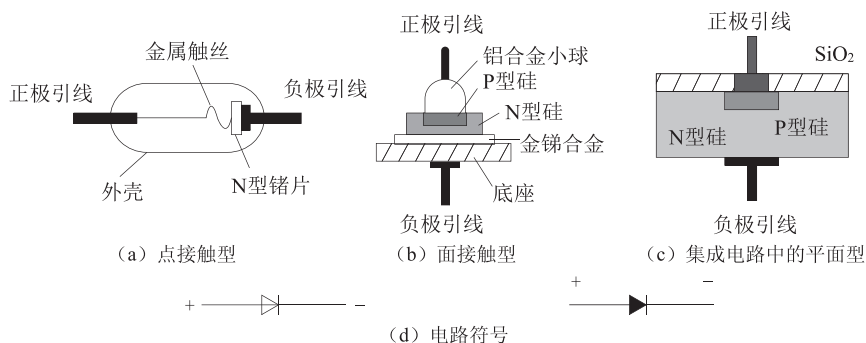


图1-2-1 半导体二极管的结构及符号

1.2.2 伏安特性与主要参数

1. 伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的函数关系,其伏安特性和PN结的伏安特性基本相似。

1) 正向特性

如图1-2-2(a)中的a段所示,曲线正向特性的起始部分称为死区,由于外加正向电压(P正N负)较小,不足以削弱PN结的内电场,因而这时的正向电流几乎为零,二极管呈现出一个大电阻,好像有一个门坎,使正向电流从零开始明显增大的外加电压称为门坎电压 U_{th} (又称死区电压)。锗管的 U_{th} 约为0.1V,硅管的 U_{th} 约为0.5V。当外加正向电压大于 U_{th} 后,正向电流迅速增大,二极管进入正向导通区,电阻小,电流大。此时,若正向电流

在一定范围内变化，正向管压降基本不变，其导通电压 $U_{D(on)}$ 锗管约为0.2~0.3V，硅管约为0.6~0.8V。图1-2-2 (b) 是利用Multisim仿真测试得到的二极管正向伏安特性曲线。

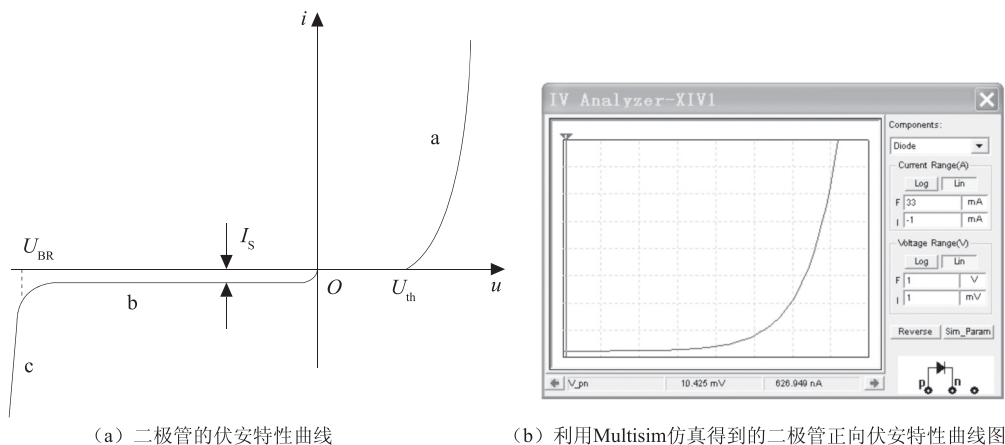


图1-2-2 二极管的伏安特性

2) 反向特性

在反向电压（P负N正）作用下P型半导体中的少数载流子（电子）和N型半导体中的少数载流子（空穴）很容易通过PN结，形成反向电流。由于管壳漏电流的影响，二极管的反向电流比理想PN结的 I_S 大，但总数值仍然很小，二极管进入反向截止区。二极管反向特性如图1-2-2 (a) 中b段所示。一般情况下，硅管的反向电流比锗管的反向电流小得多，所以硅管的温度稳定性远优于锗管。

3) 反向击穿特性

当反向电压增加到一定数值后，反向电流剧增，这种现象称为二极管的反向击穿，如图1-2-2 (a) 中c段所示，其原因和PN结反向击穿相同。

环境温度的变化对二极管的伏安特性影响较大，其规律与PN结的温度特性相似。

综上所述，二极管具有加正向电压导通、加反向电压截止的特性，即单向导电性。

2. 主要参数

半导体器件的参数是对其特性和极限运用条件的定量描述，是设计电路时正确选择和合理使用器件的依据。因此，正确理解参数的物理意义及其数值范围非常重要。

1) 最大整流电流 I_F

二极管长期正常工作时，允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过PN结要引起管子发热，电流太大，发热量超过限度，就会使PN结烧坏。使用中为确保安全，应选用 I_F 大于电路实际电流值的二极管，否则极不安全，将损坏二极管。

2) 最高反向工作电压 U_M

反向加在二极管两端而不引起PN结击穿的最大安全工作电压。如果实际工作电压的峰值超过 U_M ，二极管有可能被击穿损坏。为确保安全工作，一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压 U_{BR} 的一半。

3) 反向电流 I_R

二极管加反向工作电压未被击穿时的反向电流值。其值越小，二极管单向导电性能越好。但是反向电流值会随温度的上升而显著增加，在实际应用中应加以注意。一般Si管的 I_R

比Ge管小，所以Si管的温度稳定性比Ge管好。

4) 最高工作频率 f_M

保证二极管单向导电作用的最高工作频率。当工作频率超过 f_M 时，二极管的单向导电性能就会变差，甚至失去单向导电性。 f_M 主要由PN结的结电容大小决定，结电容越大， f_M 就越小。由于结电容很小，对低频工作影响很小，当工作频率升高时，其影响就会增大，所以在作检波使用时，应选用 f_M 至少两倍于电路实际工作频率的二极管，否则不能正常工作。点接触型锗管由于其PN结面积比较小，故结电容很小，通常小于1pF，其最高工作频率可达数百MHz，而面接触型硅整流二极管，其最高工作频率只有3kHz左右。

1.2.3 二极管的简化模型及应用电路

1. 简化模型

由于二极管的伏安特性是非线性的，为了分析计算时方便，可根据不同情况将二极管进行不同的线性化等效处理，即建立二极管的简化模型。

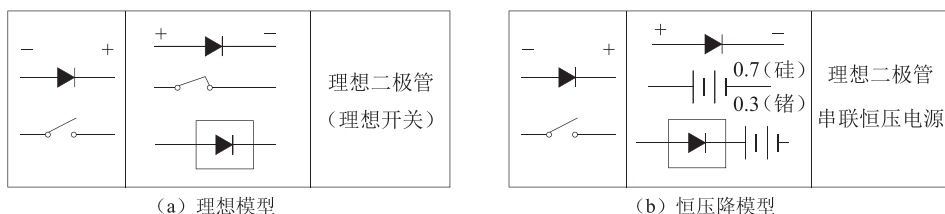


图1-2-3 二极管的简化模型

(1) 理想模型：如图1-2-3 (a) 所示，作为理想开关，正向导通时 $U_D = 0$ ，二极管相当于短路，其正向压降 U_F 和正向电阻 R_F 可以忽略；反向截止时 $I_S = 0$ ，二极管相当于断路。用于对电路（整流电路、开关电路）作定性分析和粗略估算。特性曲线如图1-2-4 (a) 所示，虚线是实际二极管的伏安特性，粗实线是理想模型的等效伏安特性。

(2) 恒压降模型：图1-2-3 (b) 所示为恒压降模型，忽略二极管导通电阻（即 $r_D = 0$ ），导通时二极管两端管压降恒定值 $U_D = U_{on}$ ；截止时 $I_S = 0$ ，二极管相当于断路。用于在 R_F 和 I_S 可以忽略的情况下，对电路进行分析或估算。特性曲线如图1-2-4 (b) 所示的粗实线部分。

(3) 微变等效电路模型：求动态电阻 r_d ，只考虑二极管两端的电压在某一固定值附近作微小变化时所引起的电流变化，如图1-2-4 (c) 所示，可以用曲线在该固定值处的切线来近似这一小段曲线。

$$\text{由式 (1-1) 求导 } \frac{1}{r_d} = \frac{\Delta i}{\Delta u} \approx \frac{di}{du} = \frac{I_s}{U_T} e^{u/U_T} \approx \frac{I_D}{U_T}$$

所以 $r_d \approx U_T / I_D$

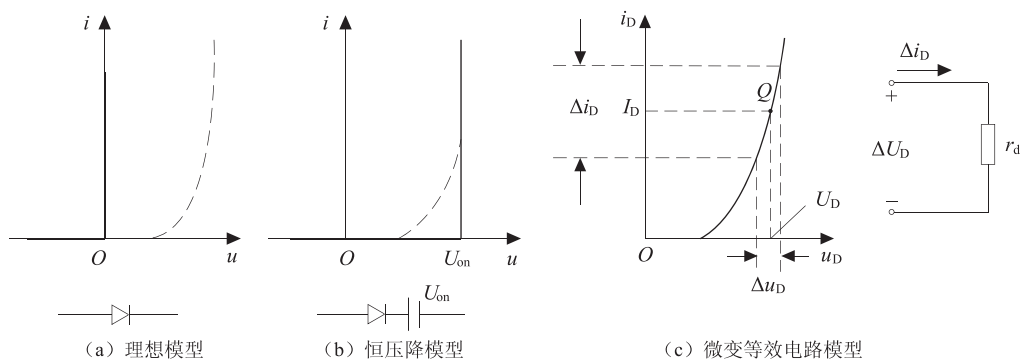


图1-2-4 二极管简化模型伏安特性图

常温下 $U_T = kT/q \approx 0.026\text{V}$ ，为温度电压当量，所以 $r_d = 26\text{mV}/I_{DQ}$ (I_{DQ} 为二极管的静态电流)。可见，二极管的动态电阻可用静态电流来计算，且 I_D 增大时， r_d 变小，正偏时 r_d 一般为几欧姆到几十欧姆，反偏时 r_d 为几百千欧到几兆欧。该模型主要用于二极管处于正向偏置，且 $U_D \gg U_T$ 条件下的交流动态分析。

除了以上几种较简洁明了的常用模型以外，还有其它更复杂、更精确的二极管模型，由于使用不太广泛，此处不做介绍，有兴趣的同学可以自学相关文献。

2. 应用电路

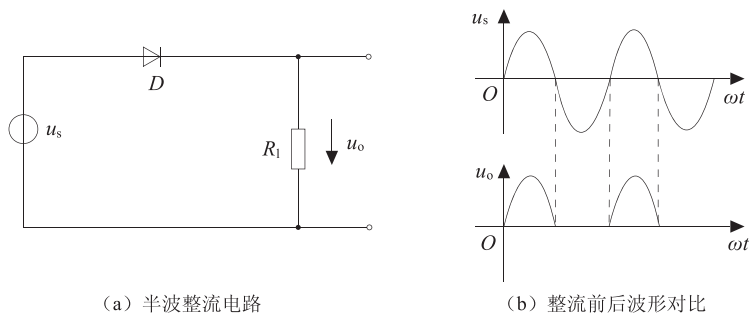
二极管作为基本电子元件，其应用范围较广。例如，利用二极管单向导电性，可实现将交流电变为单方向的脉动电压，此时二极管作为整流元件使用，直流充电器中的二极管即是如此；利用二极管单向导电性，可实现削波功能，收音机的检波二极管就是这样工作的；利用二极管正向导通后，端电压基本维持不变的特性，可用于限幅电路；利用二极管的温度效应，在有关电路中作为温度补偿元件使用，还可作为温度传感器用于温度测量中。下面通过几个例子来说明二极管的简单应用。

1) 整流电路

【例1-1】 电路如图1-2-5 (a) 所示，设电源电压 $u_s = 10\sin\omega t(\text{V})$ ，二极管采用理想模型，试分析电路输出电压，并画出其波形。

解： 一般分析含有二极管的电路，先假设D断开，求出二极管两端的电位 V_P (P端电位)、 V_N (N端电位)，据此判断二极管的状态：①若二极管采用理想模型，则当 $V_P > V_N$ 时，连接后D正偏，正向导通， $V_D = 0$ ，二极管相当于短路；当 $V_P \leq V_N$ 时，连接后D反偏，反向截止， $I_D = 0$ ，二极管相当于断路。②若二极管采用恒压降模型，则当 $V_P \geq V_N + U_{on}$ 时，连接后D正偏，正向导通， $U_D = U_{on}$ ，二极管相当于导通；当 $V_P < V_N + U_{on}$ 时，连接后D反偏，反向截止， $I_D = 0$ ，二极管相当于断路。

此例中D用理想二极管替代，假设D断开， $V_P = u_s$ ， $V_N = 0\text{V}$ ，当 $u_s < 0$ 时，D反偏截止，断路，电路电流为零， R_L 上的电压为零，所以 $u_o = 0$ ；当 $u_s > 0$ 时，D正偏导通，短路， $U_D = 0$ ，此时 $u_o = u_s$ ，因此可得出 u_o 的波形如图1-2-5 (b) 所示。上述分析表明，此题是利用D的单向导电性，使流过负载电阻 R_L 的电流方向保持不变，这种作用即为整流。由于负载电阻 R_L 上仅半个周期内有电流，所以这种电路称为半波整流电路。



(a) 半波整流电路

(b) 整流前后波形对比

图1-2-5 【例1-1】电路图

2) 限幅电路

(1) 二极管下限幅电路：在如图1-2-6所示的二极管下限幅电路中，因二极管是串在输入、输出之间，故称它为串联限幅电路。假设D断开， $V_p = u_i$ ， $V_N = E$ ，图中，设D具有理想的开关特性，那么，当 $u_i < E$ 时，D截止， $u_o = E$ ；当 $u_i > E$ 以后，D导通， $u_o = u_i$ 。该限幅器的限幅特性如图所示，当输入振幅大于E的正弦波时，输出电压波形见图1-2-6中的 u_o 波形。可见，该电路将输出信号的下限电平限定在某一固定值E上，所以称这种限幅器为下限幅器。如将图中二极管极性对调，则得到将输出信号上限电平限定在某一数值上的上限幅器。

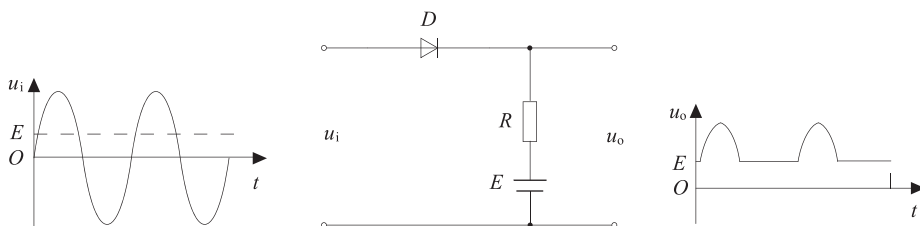


图1-2-6 二极管下限幅特性

(2) 二极管上限幅电路：在如图1-2-7所示的二极管上限幅电路中，当输入信号电压低于某一事先设计好的上限电压时，输出电压将随输入电压而增减；但当输入电压达到或超过上限电压时，输出电压将保持为一个固定值，不再随输入电压而变，这样，信号幅度即在输出端受到限制。

设D断开，则 $V_p = u_i$ ， $V_N = E$ ；当 $u_i < E$ 时，D截止， $u_o = u_i$ ； $u_i > E$ 时，D导通， $u_o = E$ 。输出波形如图1-2-7中的 u_o 所示，实现上限限幅。

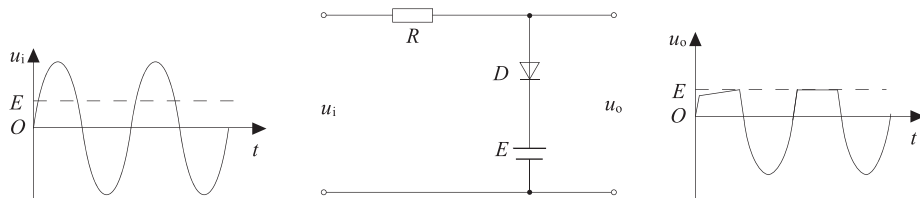


图1-2-7 二极管上限幅特性

【例1-2】二极管双向限幅电路如图1-2-8 (a) 所示，若输入电压 $u_i = 7\sin\omega t(V)$ ，试分析并画出电路输出电压的波形，设二极管的 U_{on} 为0.7V，二极管采用恒压降模型。

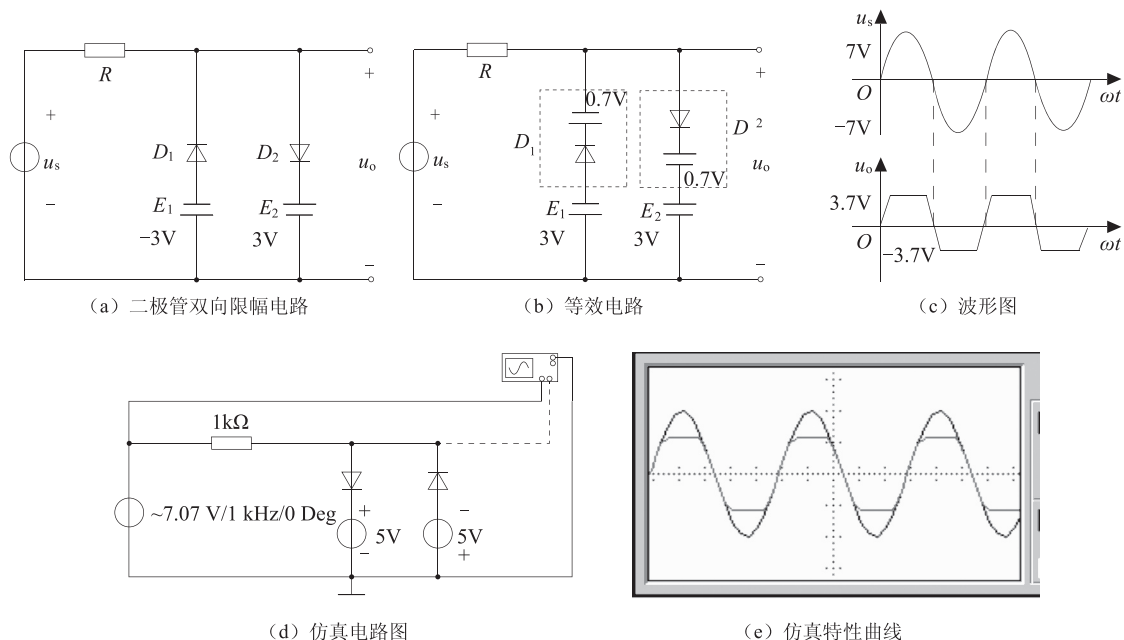


图1-2-8 【例1-2】电路图

解：用恒压降模型代替实际二极管，有等效电路如图1-2-8（b）所示，当 $u_i < -3.7\text{V}$ 时， D_2 反偏截止， D_1 正偏导通，输出电压被钳制在 -3.7V ；当 $-3.7\text{V} < u_i < 3.7\text{V}$ 时， D_1 、 D_2 均反偏截止，此时 R 中无电流，所以 $u_o = u_i$ ；当 $u_i > 3.7\text{V}$ 时， D_1 反偏截止， D_2 正偏导通，输出电压被钳制在 3.7V 。综合上述分析，可画出的波形如图1-2-8（c）所示。输出电压的幅度被限制在 $+3.7\text{V} \sim -3.7\text{V}$ ，其仿真电路图及仿真特性曲线如图1-2-8（d）和（e）所示。

3) 开关电路

【例1-3】电路如图1-2-9所示，已知 $U_{\text{on}} = 0.3\text{V}$ ，完成下表中的空白部分。

U_A/V	U_B/V	U_C/V	D_2	D_3	D_1	U_O/V
0	0	0				
0	3	3				
3	3	0				
3	3	3				

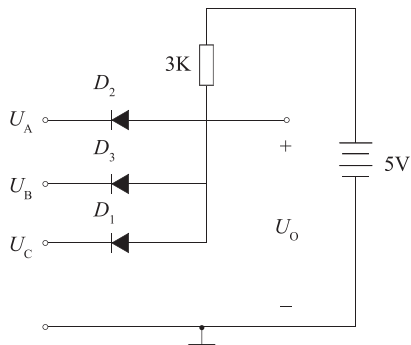


图1-2-9 【例1-3】电路图

解：电路中3个二极管P端连在一起，并联。分析时，先假设D均断开，求出各二极管的两端电位 V_P 和 V_N 的值，若加的都是正偏电压的话，正偏电压大的二极管优先导通，然后在此条件下再重新计算其余二极管断开时的 V_P 和 V_N 的值，重新判断二极管的导通和断开状态，最后计算输出电压 U_O 。

对于表中的第一行 $U_A = U_B = U_C = 0V$ ，设D均断开， $V_P = 5V$ ， $V_{NA} = V_{NB} = V_{NC} = U_A = U_B = U_C = 0V$ ，电位差相等， D_1 、 D_2 、 D_3 同时导通，使 $U_O = 0.3V$ ；第二行有 $V_{NA} = U_A = 0V$ ， $V_{NB} = V_{NC} = U_B = U_C = 3V$ ， $V_P = 5V$ ，则 D_2 上电压差值=5V， D_1 、 D_3 上电压差值=2V， D_2 上电压差值最大，故优先导通，使 $U_O = 0.3V$ ，从而使 D_1 、 D_3 反偏截止；同理第三行的输出 $U_O = 0.3V$ ；第四行 $U_A = U_B = U_C = 3V$ ，电位差相等， D_1 、 D_2 、 D_3 同时导通，使 $U_O = 0.3V$ 。结果见下表中的灰色部分。

U_A/V	U_B/V	U_C/V	D_2	D_3	D_1	U_O/V
0	0	0	通	通	通	0.3
0	3	3	通	止	止	0.3
3	3	0	止	止	通	0.3
3	3	3	通	通	通	3.3

此电路称为开关电路，是由二极管组成的与逻辑电路，在数字电路中应用广泛。

3. 用万用表对晶体二极管进行测试

模拟万用表电阻档等值电路如图1-2-10所示，当万用表处于 $R \times 1$ 、 $R \times 100$ 、 $R \times 1K$ 档时， $E_o = 1.5V$ ，而处于 $R \times 10K$ 档时， $E_o = 15V$ 。测试电阻时要记住，红表笔接在表内电池负端（表笔插孔标“+”号），而黑表笔接在正端（表笔插孔标“-”号）。

1) 晶体二极管管脚极性、质量的判别

晶体二极管由一个PN结组成，具有单向导电性，其正向电阻小（一般为几百欧）而反向电阻大（一般为几十千欧至几百千欧），利用此点可进行判别。

(1) 管脚极性判别

将万用表拨到 $R \times 100$ （或 $R \times 1K$ ）的欧姆档，把二极管的两只管脚分别接到万用表的两根测试笔上，如图1-2-11所示。如果测出的电阻较小（约几百欧），则与万用表黑表笔相接的一端是正极，另一端就是负极。相反，如果测出的电阻较大（约百千欧），那么与万用表黑表笔相连接的一端是负极，另一端就是正极。

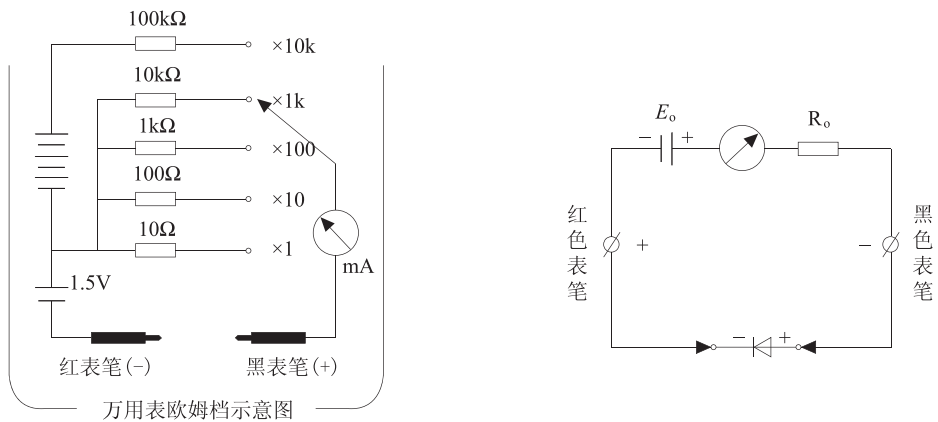


图1-2-10 万用表电阻档等值电路

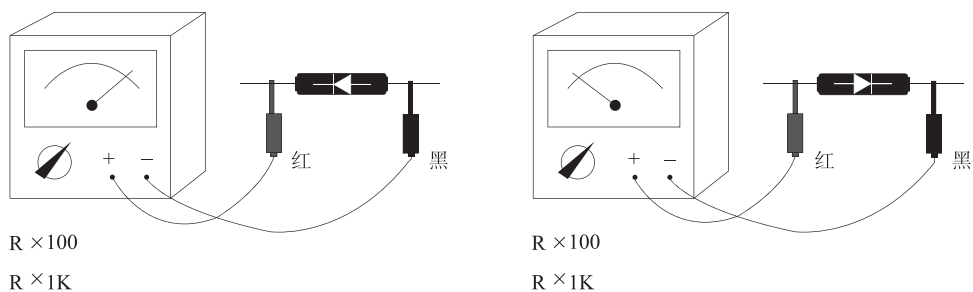


图1-2-11 判断二极管极性

(2) 判别二极管质量的好坏

一个二极管的正、反向电阻差别越大，其性能就越好。如果双向阻值都较小，说明二极管质量差，不能使用；如果双向阻值都为无穷大，则说明该二极管已经断路；如果双向阻值均为零，说明二极管已被击穿。

利用数字万用表的二极管档也可判别正、负极，此时红表笔（插在“ $V \cdot \Omega$ ”插孔）带正电，黑表笔（插在“COM”插孔）带负电。用两支表笔分别接触二极管两个电极，若显示值在1V以下，说明管子处于正向导通状态，红表笔接的是正极，黑表笔接的是负极。若显示溢出符号“1”，表明管子处于反向截止状态，黑表笔接的是正极，红表笔接的是负极。



练一练

填空选择题

1. 电路如图1-2-12所示, 已知 $U_{on} = 0.7V$, 参照【例1-3】完成下表。

U_A/V	U_B/V	D_1	D_2	U_o/V
0	0			
0	5			
5	0			
5	5			

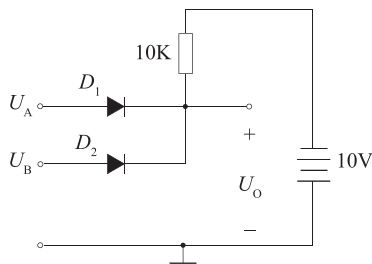


图1-2-12

2. 如图1-2-13所示的电路中, 已知二极管的反向击穿电压为20V, 当 $U = 5V$ 、温度为 $20^\circ C$ 时, $I = 2\mu A$ 。若电源电压增大到10V, 则电流 I 约为 ()。

- A. $10\mu A$ B. $4\mu A$ C. $2\mu A$ D. $1\mu A$

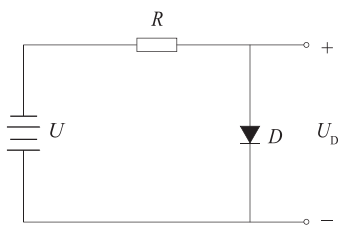


图1-2-13

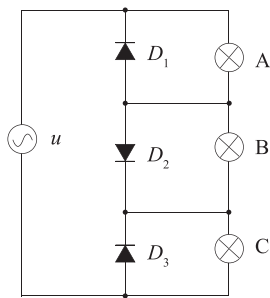


图1-2-14

3. 上题中, 若电源电压保持5V不变, 温度由 $20^\circ C$ 下降到 $10^\circ C$ 时, 则电流 I 约为 ()。

- A. $10\mu A$ B. $4\mu A$ C. $2\mu A$ D. $1\mu A$

4. 如图1-2-14所示电路中, $D_1 \sim D_3$ 为理想二极管, A、B、C白炽灯泡功率相同, 其中最亮的灯是 ()。

- A. 灯泡B B. 灯泡C C. 灯泡A D. 一样亮

1.3 特殊二极管

导入

除了前面所讨论的普通二极管外，在电子器件的发展过程中还研制了若干种特殊二极管，如用于稳压电源稳压输出的稳压二极管、广场和马路边LED点阵广告屏上的发光二极管、电视机和空调机接受红外遥控信号的光电二极管、制作DVD、CD光驱激光头的激光二极管以及调频发射机上使用的变容二极管等，它们都是电子制作的常用器件，现在分别介绍它们的基本结构、工作原理和典型应用。

学习目标

- (1) 掌握稳压二极管的原理参数和使用。
- (2) 熟悉发光二极管的特性和应用。
- (3) 熟悉光电二极管的特性和应用。

单元知识

1.3.1 稳压管

稳压二极管简称稳压管，是由一种硅材料经特殊工艺制造的面接触型半导体二极管。稳压管的电路符号和伏安特性如图1-3-1所示。稳压管工作在反向击穿状态，当PN结被电击穿后，电流在一定的范围内（或者说在一定的功率损耗范围内）变化时，端电压几乎不变，这就是稳压管的稳压特性。如图1-3-1(b)特性中反向击穿区所示。由图可见，对于稳压管来说，其反向击穿特性曲线愈陡，稳压性能就愈好。要保证稳压管正常工作，反向电流必须限定在一定的范围内，否则，电流过大稳压管会因热击穿而损坏。所以，稳压管必须串联阻值合适的限流电阻。

稳压管在使用中须加反向电压，且反向电压的绝对值大于稳压值时，稳压管才能正常稳压；若稳压管加正向电压，它实际上就是一个普通二极管，它的正向压降约为0.7V（硅）；若稳压管加反向电压，电

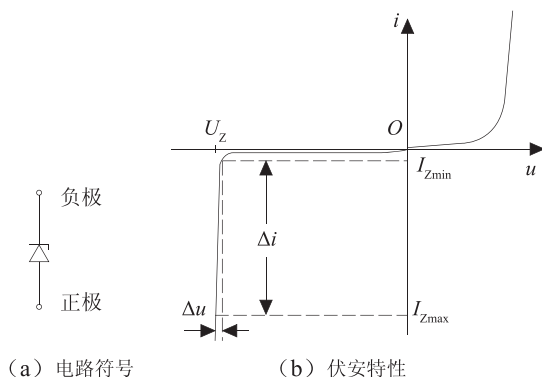


图 1-3-1 稳压管的电路符号与伏安特性



压值小于稳压值，则其工作状态为反向截止。稳压管的主要参数用于定量描述稳压管性能的技术指标和安全工作的使用条件。其主要参数有：

1) 稳定电压 U_Z

稳压管中的电流为规定电流值时，稳压管两端的电压 U_Z ，粗略地看，近似等于反向击穿电压。由于制造工艺的原因，即使是同一型号的稳压管， U_Z 的分散性也较大，但对某个特定稳压管来说，在正常工作电流时的稳定电压是一个确定值。

2) 稳定电流 I_Z

稳压管两端电压等于稳定电压时的电流值。实际电流低于此值时，因工作点接近截止区稳压效果变差；高于此值时，只要不超过最大稳定电流 I_{Zmax} 都可以正常工作，且电流越大，稳压效果越好，但管子的功耗将增加。

3) 动态电阻 r_z

在反向击穿状态下，稳压管两端的电压变化量和相应地通过管子的电流变化量之比。 r_z 就是稳压管的交流电阻。显然，反向击穿特性越陡， r_z 就越小，稳压管两端的电压变化也越小，稳压效果就越好。 r_z 的大小反映了稳压管性能的优劣，越小越好。

4) 最大稳定电流 I_{Zmax}

指稳压管具有正常稳压作用时允许通过的最大工作电流。

5) 额定功耗 P_M

稳压管不产生热击穿的最大功率损耗，它是由管子的温升所决定的参数， $P_M = U_Z I_{Zmax}$ 。 I_{Zmax} 和 P_M 均是极限参数，若超过则可能使稳压管被热击穿而损坏。

6) 电压温度系数

它反映稳定电压受温度影响的参数，它表示温度每升高 1°C 时稳定电压值的相对变化量。温度系数越小，稳压管的温度性能越好。硅稳压管 U_Z 低于 4V 时只有负温度系数，高于 7V 时只有正温度系数， U_Z 在 $4\sim 7\text{V}$ 时温度系数很小。因此，稳定性要求高的场合，一般采用 $4\sim 7\text{V}$ 的稳压管；在要求更高的场合，可采用具有温度补偿的稳压管，即将正温度系数和负温度系数的两个管子串联使用，如2DW7系列的稳压管。

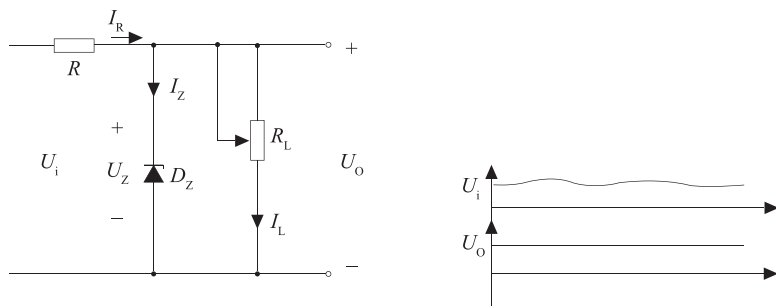


图1-3-2 简单的稳压管稳压电路

稳压管主要应用于直流稳压电源和限幅电路中。如图1-3-2表示的是由稳压管构成的稳压电路，其中 U_i 为待稳定的直流电源电压，一般是由整流滤波电路提供（见第六章）。 D_Z 为稳压管， R 为限流电阻，它的作用是使电路有一个合适的工作电流，保证稳压管工作在反向击穿状态， R 太大可能使 I_Z 太小，无法使稳压管反向击穿，无法稳压； R 太小可能使 I_Z 太大，烧毁稳压管，所以一定要选择合理的 R 值。从输出波形可以看出，经稳压管稳压后的输出电压 U_o 波形相比 U_i 波形平直很多。

【例1-4】在如图1-3-2所示的稳压电路中，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 $R_L = 600\Omega$ 。求限流电阻 R 的取值范围。

解：从电路可知

$$I_R = I_Z + I_L$$

其中 $I_Z = (5\sim 25)\text{mA}$

$$I_L = U_Z / R_L = (6 / 600)\text{A} = 0.01\text{A} = 10\text{mA}$$

所以 $I_R = (15\sim 35)\text{mA}$

R 上的电压 $U_R = U_1 - U_Z = (10 - 6)\text{V} = 4\text{V}$ ，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114~227 Ω 。

稳压二极管常用于各种电子电路的电源、甚至于放大电路中，应用范围非常广泛。

1.3.2 发光二极管LED

发光二极管是一种将电能直接转化为光能的器件，简称LED（Light Emitting Diode）。发光二极管的结构与普通二极管相似，由一个半导体PN结组成，也具有单向导电性，即只有极性连接正确，正向导通时才能发光。这种管子的门坎电压 U_{th} 比普通二极管大，其正向工作电压一般为1.5~3V，工作电流一般为几个毫安至十几毫安，反向击穿电压一般小于10V。如图1-3-3所示为紫色发光二极管的伏安特性曲线及电路符号。

发光二极管的材料多由元素周期表中III、V族元素化合物（如砷化镓、磷化镓等）所制成；发光二极管的发光颜色由所用材料决定，目前有红、绿、黄、橙等色。如图1-3-4所示是普通发光二极管和用发光二极管制作的LED显示屏、LED点阵模块和LED数码管。

发光二极管常用作显示器件，如家用电器的指示灯等。除单个使用外，也常做成七段、八段式数码

管、点阵式数字电路显示器件或LED显示屏幕，如图1-3-4所示。点阵式数字电路显示器件或LED显示屏幕作为新的媒体显示器，运动的发光图文，更容易吸引人的注意力，信息量大，可随时更新，有着非常

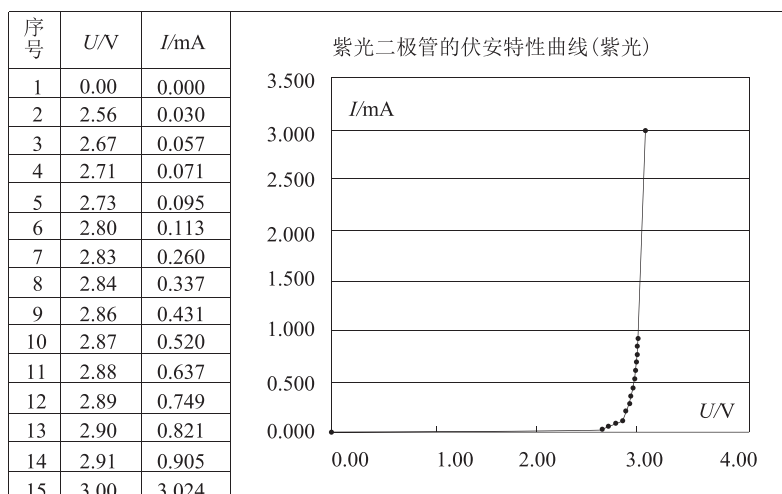


图1-3-3 发光二极管的伏安特性曲线及电路符号



好的广告和告示效果。LED屏比霓虹灯更加简单，容易安装和控制，效果变化更多，可以随时更新内容，是很好的户内外视觉媒体。LED屏幕属于高科技电子产品，配套较复杂，价格比较高，然而随着技术不断进步，价格不断降低，组装和维护更加简单，逐步开始普及，应用范围越来越广。

发光二极管的另一种重要用途是在光电传输系统中将电信号变为光信号。

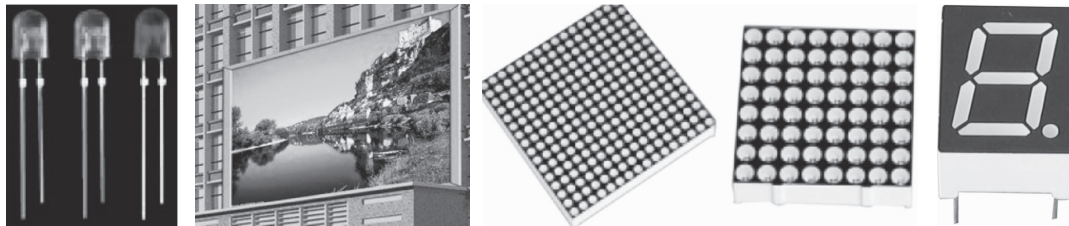


图1-3-4 普通发光二极管、用发光二极管制作的LED显示屏、点阵模块和数码管

几种常见发光二极管的主要参数如表1-3-1所示。

表 1-3-1 发光二极管的主要参数（光强单位：mcd）

颜色	波长/mm	基本材料	正向电压 (10mA时) /V	光强 (10mA时, 张角 $\pm 45^\circ$)	光功率/ μ W
红外	900	砷化镓	1.3~1.5		100~500
红	655	磷砷化镓	1.6~1.8	0.4~1	1~2
鲜红	635	磷砷化镓	2.0~2.2	2~4	5~10
黄	583	磷砷化镓	2.0~2.2	1~3	3~8
绿	565	磷化镓	2.2~2.4	0.5~3	1.5~8

发光二极管是一种电流型器件，虽然在它的两端直接接上3V的电压后能够发光，但容易损坏，在实际使用中一定要串接限流电阻，使工作电流限定在正常范围。

由于发光二极管的响应时间（光信号对电信号的延迟时间）一般小于100ns，故直流信号、交流信号或脉冲信号均可作为它的驱动信号。用交流信号驱动时，为防止LED被反向击穿，可在两端反极性并连整流二极管。

近年来，随着LED发光效能逐步提升，发光二极管逐渐成为最受重视的环保节能照明光源之一。LED具有小巧量轻、驱动电压低、全彩色、寿命长、效率高、耐振动、易于控光等特性，为设计用于不同场所和目的的照明系统提供了优越条件。但发光二极管用于照明也遇到许多困难，如如何进一步提高发光效能、如何解决LED灯散热困难的问题、如何降低封装成本等问题，这些问题目前已成为各国照明厂家研制和攻克的目标。

1.3.3 光电二极管

光电二极管是把光信号转换成电信号的半导体器件，英文通常称Photo-Diode，又称光敏二极管，它的结构与普通二极管类似，核心部分也是一个PN结，但PN结面积较大，在管壳上有一个透明聚光窗口以接收外部的光照。图1-3-5是光电二极管实物图。

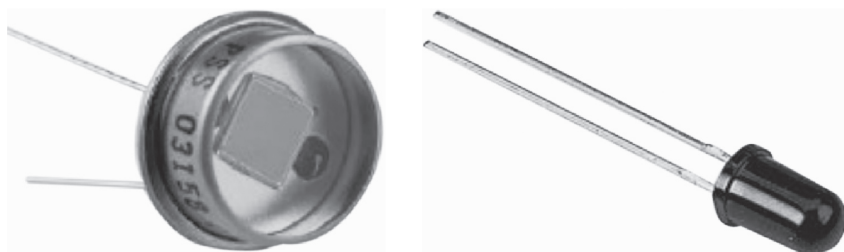


图1-3-5 光电二极管实物图

如图1-3-6所示是光电二极管的电路符号和它的特性曲线。显然，光电二极管工作在反向偏置状态，正常工作区域应在反向截止区，即如图1-3-6所示的第III象限。其主要特点是，反向电流与光照度成正比。光电二极管在反向电压作用下没有光照时，反向电流极其微弱，称为暗电流；有光照时，反向电流迅速增大到几十微安，称为光电流。光的强度越大，反向电流也越大。光的变化引起光电二极管电流变化，这样就把光信号转换成了电信号，成为光电传感器件。

若光电二极管正偏，PN结正向导通，工作于如图1-3-6所示的第I象限。当制成大面积的光电二极管时，可当作一种能源，称为光电池，工作于如图1-3-6所示的第II象限。对负载来讲，光电池的正极是光电二极管的阳极，负极为光电二极管的阴极，短路电流与照度基本上成正比。

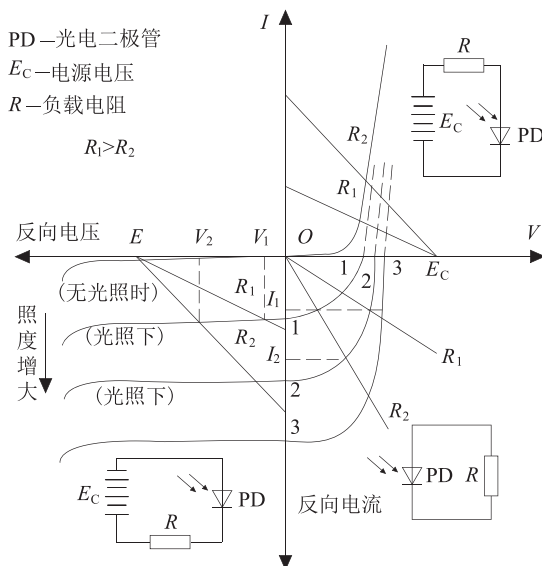


图1-3-6 光电二极管电路符号和特性曲线

光电二极管的用途很广，可用于光量测定和视觉信息、位置信息的测定；可用于红外线遥控之类的光纤通信领域；可用于各种光学仪器，如分光光度计、比色度计、亮度计、光功率计、火焰探测器、色彩放大机等半导体光接收器领域；还可将光电二极管制作成阵列，用于光电编码，或用于光电输入机作光电读出器件。

除上述几种特殊二极管以外，还有其它常用特殊二极管，如：能发出各种波长激光的激光二极管，在计算机光驱、激光打印机中的打印头、条形码扫描仪、激光测距、激光医疗、光通讯、舞台灯光、激光焊接甚至激光武器等光电设备中得到了广泛的应用；利用



PN结势垒电容制成的变容二极管，在电子电路中当作可变电容器使用，广泛应用于电子调谐、频率的自动控制、调频调幅和调相等电路中；还有隧道二极管、肖特基二极管同样广泛应用于电子电路中。

练一练

一、选择题

1. 稳压二极管工作状态为（ ）。
A. 正偏 B. 反偏 C. 反向击穿 D. 截止
2. 发光二极管工作状态为（ ）。
A. 正偏 B. 反偏 C. 反向击穿 D. 截止
3. 光电二极管工作状态为（ ）。
A. 正偏 B. 反偏截止 C. 反向击穿 D. 三者都不是
4. 电脑光驱中用于读写光盘信息的是（ ）。
A. 发光二极管 B. 光电二极管 C. 激光二极管 D. 稳压二极管

二、简答题

如图1-3-7所示，是用发光二极管LED监视电池电压的应用电路。电路中稳压管DW的稳压值应选电池额定电压的70%左右。请说明稳压管DW和发光二极管LED的工作情况。

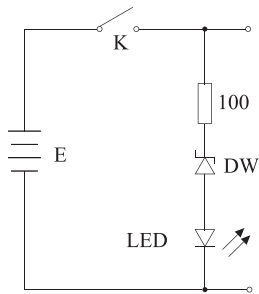


图1-3-7 LED应用电路

1.4 双极型三极管 (BJT)

导 入

音箱能发出洪亮的声音，电视能显示清晰的图像，这都是借助于放大电路将线路传送来的微弱信号放大后才能实现。三极管就具有对信号的放大作用，是实现信号放大的基本器件。那么三极管为什么能放大信号呢？它是怎样放大信号的呢？



功率三极管

大功率三极管

塑封小功率三极管

学习目标

- (1) 熟悉双极型三极管的基本结构和类型。
- (2) 掌握双极型三极管各极电流分配关系和电流放大作用。
- (3) 理解三极管的伏安特性曲线的意义。
- (4) 熟悉三极管的主要参数。

单元知识

三极管是组成各种电子电路的核心器件，是最重要的放大元件。三极管可以用来放大信号和控制电流的通断，在电源、信号处理等各种电子电路中都可以看到三极管，现在的大规模集成电路的基本单元也是半导体三极管，三极管就像电子设备的细胞一样，离开了它，电子技术就无从谈起。本节先讨论晶体三极管的结构和电流分配关系，然后介绍其工作特性及主要参数。

1.4.1 基本结构和类型

晶体三极管又称双极型半导体三极管（简称三极管或BJT），因为它是由两种带不同极性电荷的载流子传输进行工作的。

晶体三极管由三个区、三个极和两个PN结组成，根据结构的不同，可分为NPN型和PNP型两种，其结构示意图和电路符号如图1-4-1所示。

如图1-4-1（a）所示是晶体三极管NPN管的结构示意图，NPN管有两个N型区和一个P型区，其中一个N型区掺杂浓度高[图（c）中用 n^+ 表示]，称为发射区，另一个掺杂浓度低的N型区称为集电区，夹在它们中间的P型区称为基区，基区做得很薄（其厚度以微米计，其余两个区厚度为毫米数量级），而且掺杂浓度极低。由这三个区各引出一个电极，分别称为发射极E、集电极C和基极B，发射区与基区间的PN结称为发射结，集电区与基区间的PN结称为集电结。这种NPN型三极管的电路符号如图1-4-1（c）所示，其发射极箭头表示发射结加正向电压（即正向偏置）时发射极电流的方向（由P指向N）。与NPN三极管对应的PNP三极管的结构示意图和电路符号分别如图1-4-1（b）和（d）所示。

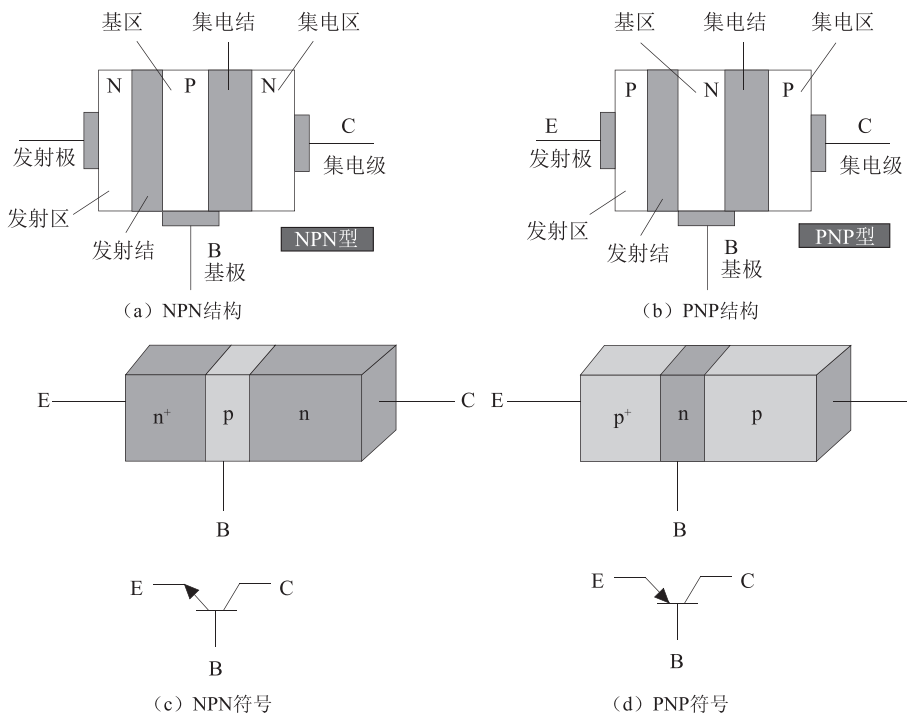


图1-4-1 晶体三极管的结构和符号

三极管种类很多。按照构成的半导体材料分为硅管、锗管等；按照应用的频率分为高频管、低频管；按照功率分为大、中、小功率管等。

综上所述，三极管结构上的特点是：有两个背靠背的PN结；发射区掺杂浓度远高于集电区，而基区做得很薄且掺杂浓度很低；集电区面积大。这些都是使三极管具有信号（电流）放大作用的内部条件。

1.4.2 电流分配和电流放大作用

当三极管处在发射结正向偏置、集电结反向偏置的状态下时，三极管具有电流放大作用，管内载流子的运动情况如图1-4-2所示（以NPN三极管为例），其中 I_{EN} 为发射区发射并扩散到基区的电子形成的电流， I_{EP} 为基区空穴扩散到发射区形成的电流，由于基区掺杂浓度很低，所以 I_{EP} 很小，可以忽略， I_{CN1} 为被集电区收集的电子形成的电流， I_{CBO} 为集电结反向饱和电流，由基区和集电区的少子漂移产生（ I_{CN2} 和 I_{CP} ），其载流子传输过程为：发射区向基区注入（发射）电子并在基区内边扩散、边复合，最后由集电区收集电子。由于载流子的运动，从而在各电极产生相应的电流 I_{EN} 、 I_B 和 I_C ，它们之间的关系如下：

$$\begin{aligned} I_E &= I_{EN} + I_{EP} \approx I_{EN} \\ I_C &= I_{CN} + I_{CBO} \\ I_E &= I_C + I_B \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$I_C \gg I_E \quad (1-3)$$

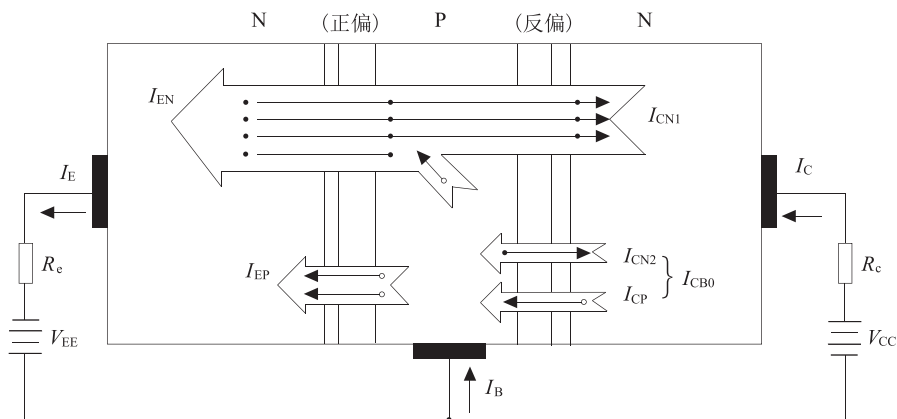


图1-4-2 三极管内部载流子的输运过程

当调节基极电流 I_B 增大时，集电极电流 I_C 成比例增大， I_C 和 I_B 的比值基本为常数， I_C 和 I_E 的比值也基本为常数，故把它们分别定义为：

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \quad (1-4)$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-5)$$

α 称为共基极电流放大系数，小于接近于1； β 称为共发射极电流放大系数或电流放大倍数，它反映晶体管的电流放大能力，一般比较大，在100倍左右。

定义参数： I_{CBO} 是发射极开路时，集电极与基极之间由少数载流子形成的反向饱和电流， I_{CBO} 是基极开路时，集电极和发射极之间的穿透电流。

根据载流子的传输过程，各电流之间存在如下关系：

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1-6)$$

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \quad (1-7)$$

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (1-8)$$

从外部来观察，三极管的各极电流之间有一定的规律。下面我们通过一个三极管电路实验来说明这种规律。电路如图1-4-3所示。我们看到，三极管发射结加的是正向电压，集



电结加的是反向电压，这是三极管能放大电信号的外部条件，只有这样才能保证三极管工作在放大状态。改变可变电阻 R 的大小，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都随之发生变化。测量结果如表1-4-1所示。

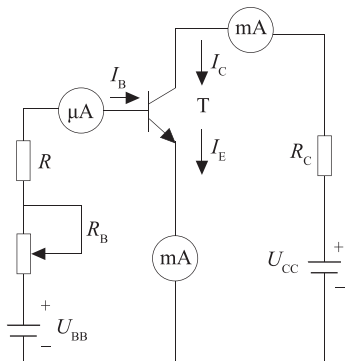


图1-4-3 三极管电流放大的实验电路

表1-4-1 三极管各极电流测量数据 (单位: mA)

I_B	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

通过观察表中的数据，我们可以发现以下规律：

- (1) 每一列的数据都满足基尔霍夫电流定律（节点电流定律），即：

$$I_E = I_C + I_B$$

- (2) 每一列中的集电极电流都比基极电流大得多，且基本上满足一定的比例关系，从第三列和第四列的数据可以得出 I_C 与 I_B 的比值分别为：

$$\frac{I_C}{I_B} = 1.50 / 0.04 = 37.5$$

$$\frac{I_C}{I_B} = 2.30 / 0.06 = 38.3$$

基本上接近38。这个关系可写成如下表达式：

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

式中： $\bar{\beta}$ 称作直流电流放大系数。

- (3) 对两列中的数据求得 I_C 和 I_B 的变化量，再加以比较，如选第三列和第四列中的数据，可得

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = (2.3 - 1.5) / (0.06 - 0.04) = 0.8 / 0.02 = 40.0$$

再选第四列和第五列中的数据，可得：

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = (3.1 - 2.3) / (0.08 - 0.06) = 0.8 / 0.02 = 40.0$$

这说明当基极电流有一个小的变化（0.02mA）时，集电极电流相应有一个大的变化（0.8mA），这种关系可用下式表示：

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-9)$$

式中： β 称作交流电流放大系数。

从上述数据可见 $\bar{\beta} \approx \beta$ ，为分析方便起见，以后不再加以区分。 β 的大小体现了三极管的电流放大能力，即如果在基极上有一个小的变化的电流信号，则在集电极上就可以得到一个大的且与基极信号成比例的电流信号。正因为如此，三极管被称作电流控制型器件。在放大区， β 基本为常数。

(4) 在第一列中，当基极开路时 ($I_B = 0$)，集电极电流 I_C 为 I_{CEO} ，称为穿透电流，这个值越小越好。利用硅材料制造的三极管的穿透电流要比利用锗材料制造的三极管的穿透电流小得多，所以硅管的温度稳定性比锗管好很多，这一优点对电子线路的性能影响重大，这也正是硅三极管比较普遍应用的原因之一。

需要强调的是，三极管电流的比例关系和控制关系是在发射结上加正向电压、集电结上加反向电压的条件下才能满足的，如图1-4-4所示，这个条件称作三极管工作在放大区的电压（或外部）条件。故NPN型三极管工作在放大区时，其三个电极的电位关系必须满足 $U_C > U_B > U_E$ ，而PNP型三极管工作在放大区时，其三个电极的电位关系必须满足 $U_E > U_B > U_C$ 。这两种电位关系在测量实际电路时，对于判断三极管的工作状态非常有用。

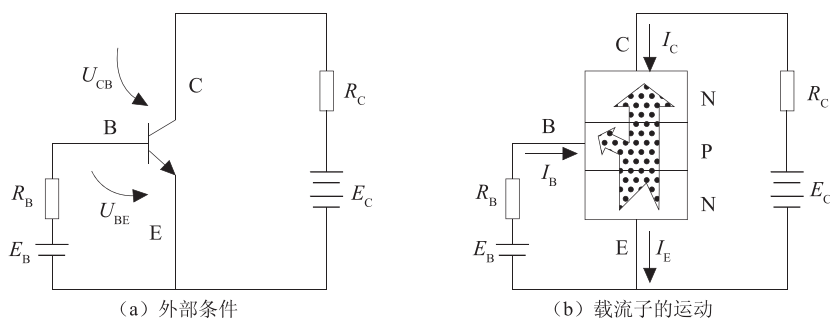


图1-4-4 三极管电流分配和放大条件

通过上述从外部观察三极管所得出的结论，可以看出：分析三极管内部载流子的传输过程时，若忽略载流子运动的细节，抓住主线，重点掌握三个电极的电流关系，就更简单直观，更便于掌握三极管的电流放大原理。内部简化模型如图1-4-4 (b) 所示。

- (1) 发射区发射电子形成 I_E ；
- (2) 基区复合电子形成 I_B ；
- (3) 集电区收集电子形成 I_C ；

三个电流满足如下关系：

$$I_C = \beta I_B \quad (1-10)$$

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = (1 + \beta) I_B \quad (1-11)$$

在满足三极管放大的内部条件和外部条件的情况下，三极管的电流放大作用的实质是以较小的 I_B 控制较大的 I_C ，即：若 I_B 小，则 I_C 也较小；若 I_B 变大， I_C 也随之成比例的变大；若在基极端产生一个小的电流变化量 ΔI_B ，则在集电极端会成比例地产生一个较大的电流变化量 ΔI_C 。这就是三极管的电流放大作用和电流控制作用。

1.4.3 三极管的伏安特性曲线

三极管的电流放大作用和其它性能可用伏安特性曲线来直观表达。三极管的伏安特性曲线与它的接法有关，在讨论伏安特性曲线之前，我们先来认识一下它的三种不同组态接法。如图1-4-5 (a)、(b)、(c)所示，分别是共基极、共发射极、共集电极放大组态。

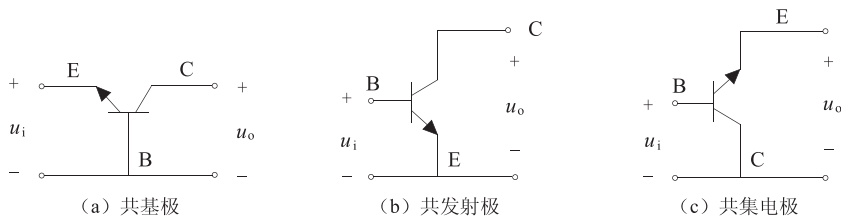


图1-4-5 三极管放大电路的三种组态

共基极组态：输入信号加于输入端EB之间，输出信号从CB之间输出，基极B为输入输出的公共端，简称CB组态。

共发射极组态：输入BE，输出CE，发射极E为输入输出的公共端，简称CE组态。

共集电极组态：输入BC，输出EC，集电极C为输入输出的公共端，简称CC组态。

下面我们以NPN管共发射极组态为例讨论三极管的伏安特性曲线。

由于三极管有两个PN结，三个电极，所以伏安特性较二极管复杂，分输入伏安特性和输出伏安特性，分别表示输入回路电压与电流之间的关系和输出回路电压与电流之间的关系。

1. 输入特性

在如图1-4-5 (b)所示的电路中，三极管为共发射极接法，输入电压 u_i 相当于B、E之间所加的总电压 u_{BE} ，输出电压 u_o 相当于C、E之间所加的总电压 u_{CE} 。当集电极和发射极之间的电压 u_{CE} 保持不变，改变基极和发射极之间的电压 u_{BE} 时，基极中的电流 i_B 就随之发生变化。这个函数关系用曲线表示出来，就叫做三极管的输入伏安特性（共发射极接法），如图1-4-6 (a)所示。

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (1-12)$$

当 $u_{CE} = 0$ 时，相当于集电极和发射极短路，此时的三极管相当于发射结和集电结两个二极管正向并联， i_B 和 u_{BE} 的关系就和二极管的正向伏安特性相似， i_B 和 u_{BE} 成正比。

当 u_{CE} 增大时，输入特性曲线向右移动，表现出 u_{CE} 对输入特性有影响，但是当 u_{CE} 大于一定值（一般当 $u_{CE} > 1V$ 后），曲线将趋于重合，所以用一条曲线表示即可。由图可见，三极管的输入伏安特性和二极管一样，也存在死区电压，其值与三极管的材料有关，硅管的死区电压约为0.5V，锗管的死区电压约为0.1V。三极管正常工作于放大区时，发射结的电压变化不大，硅管约为0.7V左右，锗管约为0.3V左右。

2. 输出特性

在如图1-4-6 (b)中，当基极电流 i_B 保持不变，改变集电极和发射极之间的电压 u_{CE} ，集电极电流 i_C 将随之变化，两者之间的函数关系是一条曲线。当基极电流 i_B 取不同的值时，可以得到不同的曲线，所以三极管的输出伏安特性是一组曲线，如图1-4-6 (b)所示。

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B=\text{常数}} \quad (1-13)$$

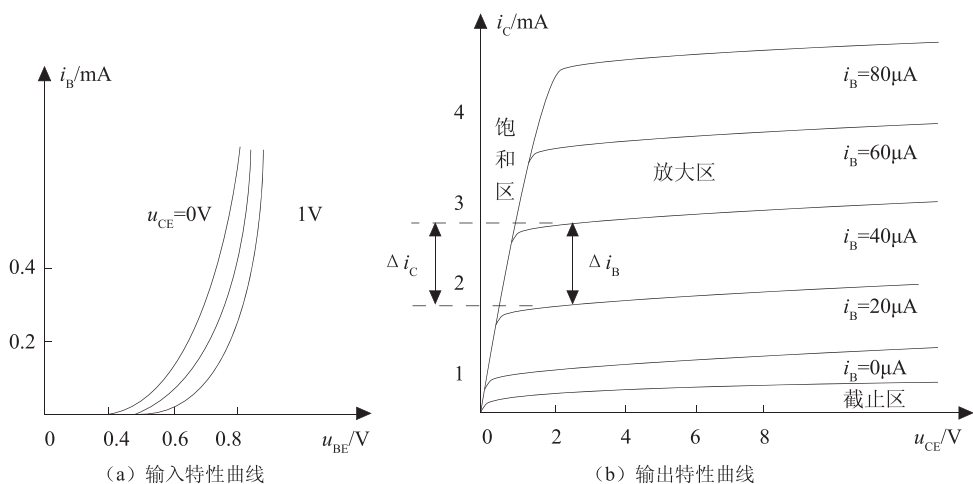


图1-4-6 三极管输入输出特性曲线

三极管的输出特性可分为三个区域：

(1) 截止区：基极电流 $i_B = 0$ 所对应的曲线下方的区域是截止区。三极管工作于截止区的电压条件是：发射结反偏或零偏或正向电压小于死区电压 u_{th} ，集电结也反偏。所以对硅管而言，当发射结电压 $u_{BE} < 0.5V$ 时，三极管已开始截止；对锗管而言，当发射结电压 $u_{BE} < 0.1V$ 时，三极管也进入截止状态。在这个区域里， $i_B = 0$ ， $i_C = i_{CEO}$ （穿透电流），约为0，C、E之间等效电阻非常大，可近似看作断路。

(2) 饱和区：当 $u_{CE} < u_{BE}$ 时，两个结均处于正向偏置，三极管工作在饱和区，即图1-4-6 (b) 中靠近纵轴的部分。在这个区域里，有 i_B ，也有 i_C ，但 i_C 与 i_B 已不成比例关系， $i_C < \beta i_B$ ，三极管失去了电流放大作用，因 $u_{CE} < u_{BE} \approx 0$ ，C、E之间等效电阻非常小，可近似看作短路。

(3) 放大区：输出特性曲线近似于水平的部分，在这个区域里，基极电流不为零，集电极电流也不为零，此时 $i_C = \beta i_B$ ， i_C 基本不随 u_{CE} 变化而变化，此时发射结正偏，集电结反偏。在一条曲线上（此时 i_B 保持不变），当 u_{CE} 较小时（饱和区）， i_C 随着 u_{CE} 的增加而增加，在 u_{CE} 超过一定数值（约1V）后（放大区）， u_{CE} 再增加， i_C 也不再有明显的增加，即电压增大，电流几乎稳定不变，这表示三极管在放大区具有恒流的特性。当 u_{CE} 大于1V且保持不变时，随着 i_B 的增大， i_C 的值明显增大，满足 $i_C = \beta i_B$ 的关系，这表示三极管具有电流放大的特性，图1-4-7是利用Multisim软件仿真测得的三极管的输出特性曲线。

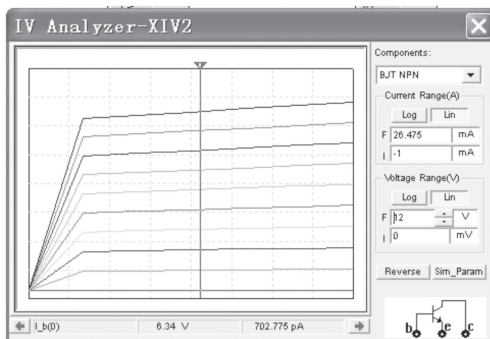


图1-4-7 利用Multisim软件仿真测试的三极管的输出特性曲线



综上所述,三极管工作在放大区时,具有电流放大的特性,经过适当的电路连接,可实现电压放大、电流放大和功率放大,是性能优良的信号放大器。在模拟电路中,三极管几乎都工作于放大状态。三极管工作在饱和区和截止区时,可当成无触点的开关使用,利用电信号使三极管在饱和区与截止区之间切换,对应开关的通和断,这称为三极管的开关特性。

1) 截止 (cut off) 状态

当三极管B、E极间不加偏压或加上反向偏压使发射结截止时(发射结的特性和二极管相同,须加上大于0.7V的正向偏压时才能导通),基极电流 $I_B = 0$, $I_C = I_E = 0$,此时C、E之间相当于开路,负载无电流,等效于一个断开的开关,如图1-4-8所示。

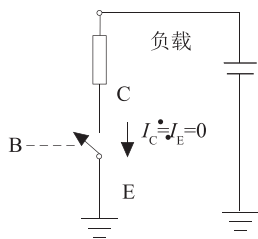


图1-4-8 三极管截止状态(开关断开)

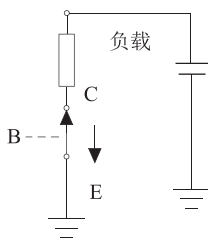


图1-4-9 三极管饱和状态(开关闭合)

2) 饱和 (saturation) 状态

当三极管BE极间加足够大正向偏压使 I_B 足够大时,因为 $I_C \approx I_E \leq \beta I_B$,发射极和集电极的电流亦非常大,此时,集电极与发射极之间的电压降非常低($U_{CE} \leq 0.3V$ 以下),其意义相当于集电极与发射极之间完全导通,此状态称为三极管饱和状态,CE间等效于一个导通的开关,如图1-4-9所示。在数字电路中,三极管几乎都工作于开关状态。

1.4.4 主要参数

三极管的参数表明管子性能的优劣和使用外加条件的大小,是合理选择和正确使用管子的依据。下面介绍其常用主要参数。

1. 电流放大系数

它主要是表征管子放大能力的参数。它有共基极的电流放大系数 α 和共发射极的电流放大系数 β 。两者的关系是:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \text{ 或 } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

2. 极间的反向电流(它们是少数载流子形成的)

I_{CBO} : 发射极开路时集电极—基极的反向饱和电流。

I_{CEO} : 穿透电流,它与 I_{CBO} 关系为:

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

其值越小,温度稳定性越好。

3. 极限参数

I_{CM} : 集电极最大允许电流。

U_{CEO} 、 U_{CBO} : 反向击穿电压。

P_{CM} : 集电极最大允许功耗。

极限参数示意图参见图1-4-10。三极管工作于图中两个坐标轴与阴影线围成的区域内是安全的。

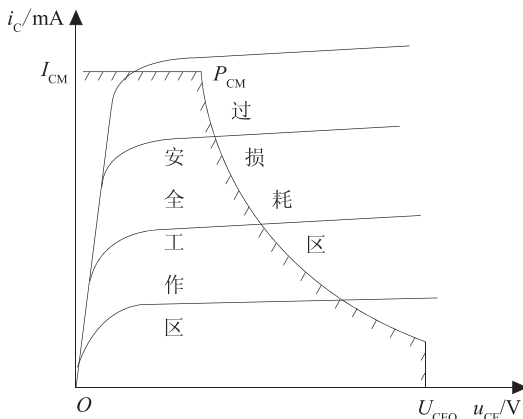


图1-4-10 三极管极限参数图

【例1-5】某放大电路中三极管的三个电极A、B、C的电流正方向如图1-4-11所示，用万用表直流电流挡测得 $I_A = -2\text{mA}$ ， $I_B = -0.04\text{mA}$ ， $I_C = 2.04\text{mA}$ ，试分析A、B、C中哪个是基极B、发射极E、集电极C，并说明此管是NPN型还是PNP型，它的 $\bar{\beta} = ?$

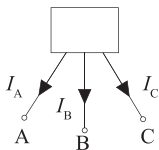


图1-4-11

解：已知是放大电路，三极管应工作在放大状态，电路满足放大状态的条件，三极管具有放大状态的特点。

用万用表直流电流挡测得 $I_A = -2\text{mA}$ ， $I_B = -0.04\text{mA}$ ，为负电流，说明电流的实际方向与图中正方向相反，是流进三极管的，且满足 $I_A + I_B = I_C$ 。

所以C是发射极E，此管是NPN型管。又因为 $I_A \gg I_B$ ，

所以A是集电极C，B是基极B。

$$\bar{\beta} = \frac{I_A}{I_B} = \frac{2}{0.04} = 50$$

【例1-6】测得某放大电路中BJT的三个电极A、B、C的对地电位分别为 $V_A = -9\text{V}$ ， $V_B = -6\text{V}$ ， $V_C = -6.2\text{V}$ ，试分析A、B、C中哪个是基极B、发射极E、集电极C，说明此三极管是NPN型还是PNP型，是Si管还是Ge管？

解：三极管处于放大状态，发射结正向导通，此时 $U_{BE} \leq 0.7\text{V}$ ，所以A极一定是集电极C；

又因为 $V_A = -9\text{V}$ 电位最低，根据放大条件发射结正偏，集电结反偏，所以判断管子为PNP型管，电位最高者B极为发射极E，电位中等的C极为基极B；又 $U_{BE} = V_C - V_B = -6.2 - (-6) = -0.2\text{V}$ ，此三极管是Ge管。

【例1-7】测得某硅BJT的三个电极E、B、C的对地电位分别如下，试判别管子工作在什么状态？



(1) $V_C = 6V, V_B = 2V, V_E = 1.3V$

(2) $V_C = 6V, V_B = 4V, V_E = 3.6V$

(3) $V_C = 3.6V, V_B = 4V, V_E = 3.3V$

解: (1) $V_C = 6V, V_B = 2V, V_E = 1.3V$ 发射结电压 $U_{BE} = 2 - 1.3 = 0.7V$, 正偏导通, 集电结电压 $U_{BC} = 2 - 6 = -4V$, 反偏, 满足三极管放大的条件, 所以, 管子工作在放大状态。

(2) $V_C = 6V, V_B = 4V, V_E = 3.6V$ 发射结电压 $U_{BE} = 4 - 3.6 = 0.4V < 0.7V$, 硅管无法导通, 管子工作在截止状态。

(3) $V_C = 3.6V, V_B = 4V, V_E = 3.3V$ 发射结电压 $U_{BE} = 4 - 3.3 = 0.7V$, 正偏导通, 集电结电压 $U_{BC} = 4 - 3.6 = 0.4V$, 正偏, 管子工作在饱和状态, $U_{CE} = 0.3V \approx 0$, 很小。

1.4.5 晶体三极管管脚、质量判别

可以把晶体三极管的结构看作是两个背靠背的PN结, 对NPN型来说基极是两个PN结的公共阳极, 对PNP型管来说基极是两个PN结的公共阴极, 分别如图1-4-12所示。

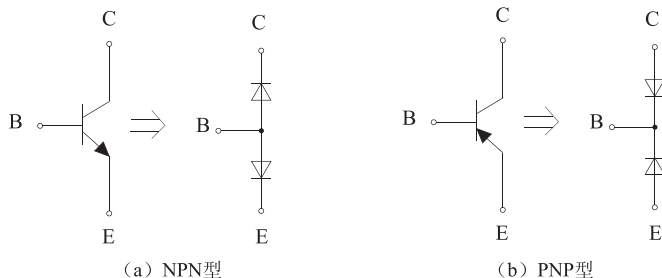


图1-4-12 晶体三极管结构示意图

1) 管型与基极的判别

模拟万用表置电阻档, 量程选1K档(或 $R \times 100$), 将万用表任一表笔先接触某一个电极——假定的公共极, 另一表笔分别接触其他两个电极, 当两次测得的电阻均很小(或均很大), 则前者所接电极就是基极, 若两次测得的阻值一大一小, 相差很多, 则前者假定的基极有错, 应更换其他电极重测。

根据上述方法, 可以找出公共极, 该公共极就是基极B, 若公共极是阳极对应万用表的黑表笔, 该管属NPN型管, 反之则是PNP型管。

2) 发射极与集电极的判别

为使三极管具有电流放大作用, 发射结需加正偏置, 集电结加反偏置。如图1-4-13所示。

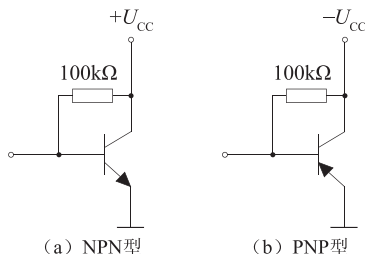


图1-4-13 晶体三极管的偏置情况

当三极管基极B确定后, 便可判别集电极C和发射极E, 同时还可以大致了解穿透电流

I_{CEO} 和电流放大系数 β 的大小。

以PNP型管为例，若用红表笔（对应表内电池的负极）接集电极C，黑表笔接E极，（相当C、E极间电源正确接法），如图1-4-14所示，这时万用表指针摆动很小，它所指示的电阻值反映管子穿透电流 I_{CEO} 的大小（电阻值大，表示 I_{CEO} 小）。如果在C、B间跨接一只 $R_{\text{B}}=100\text{K}\Omega$ 电阻，此时万用表指针将有较大摆动，它指示的电阻值较小，反映了集电极电流 $I_{\text{C}}=I_{\text{CEO}}+\beta I_{\text{B}}$ 的大小。且电阻值减小愈多表示 β 愈大。如果C、E极接反（相当于C-E间电源极性反接）则三极管处于倒置工作状态，此时电流放大系数很小（一般 <1 ），于是万用表指针摆动很小。因此，比较C-E极两种不同电源极性接法，便可判断C极和E极了。同时还可大致了解穿透电流 I_{CEO} 和电流放大系数 β 的大小，如万用表上有 h_{FE} 插孔，可利用 h_{FE} 来测量电流放大系数 β 。

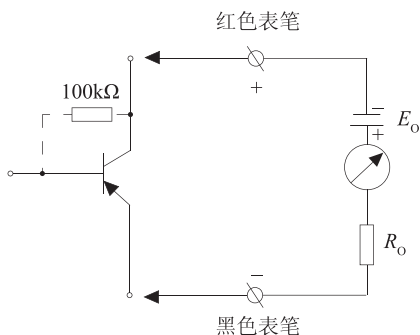
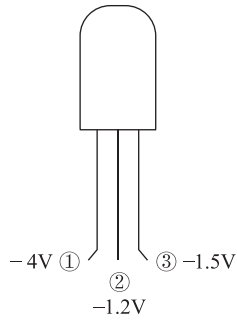


图1-4-14 晶体三极管集电极C、发射极E的判别

练一练

选择题

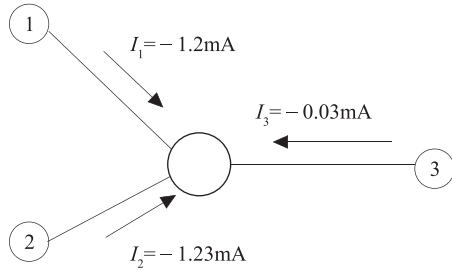
- 三极管的三个区中掺杂浓度最高的是（ ）。
 - 基区
 - 集电区
 - 发射区
 - 集电区和发射区
- 一个NPN型管在电路中正常工作，现测得 $U_{\text{BE}} > 0$ ， $U_{\text{BC}} > 0$ ， $U_{\text{CE}} > 0$ ，则此三极管工作区为（ ）。
 - 截止区
 - 饱和区
 - 放大区
 - 不确定
- 下列不属于三极管特性的是（ ）。
 - 发射结正偏，集电结反偏，三极管处于放大状态
 - 发射结反偏，集电结反偏，三极管处于截止状态
 - 发射结正偏，集电结正偏，三极管处于饱和状态
 - 发射结反偏，集电结正偏，三极管处于倒置状态
- 对于PNP型晶体管来说，当其工作于放大状态时，（ ）极电位最低。
 - 基极
 - 集电极
 - 发射极
 - 不确定
- 在晶体管放大电路中，测得晶体管的三个电极的电位如图所示。试判断：管子的类型为（ ）型，三个电极：①为（ ），②为（ ），③为（ ）。



- A. NPN, C, E, B B. PNP, C, E, B
 C. NPN, B, E, C D. PNP, B, E, C

6. 在某放大电路中，晶体管三个电极的电流如图所示。由此可知：

- (1) 电极①、②、③分别为 ()。
 (2) β 约为 ()。
 (3) 管子类型为 ()型。



- A. C, E, B, 40, PNP B. C, E, B, 40, NPN
 C. B, E, C, 50, PNP D. B, E, C, 50, NPN

7. 双极型三极管能起放大作用的内部条件通常是：

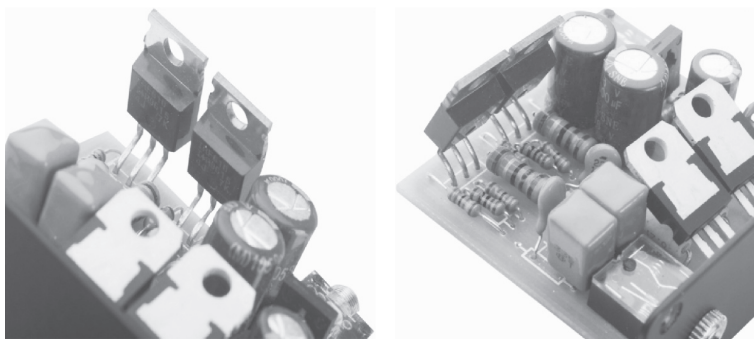
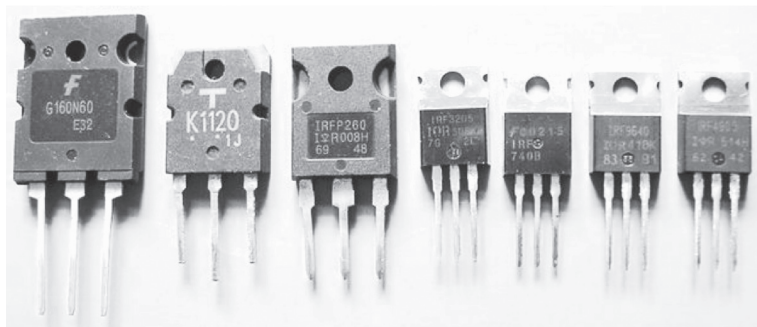
- (1) 发射区掺杂浓度 ()。
 A. 高 B. 低 C. 一般 D. 与本征半导体相同
- (2) 基区宽度 ()。
 A. 较宽 B. 窄 C. 一般 D. 为零
- (3) 集电结面积 ()。
 A. 比发射结面积大 B. 比发射结面积小
 C. 与发射结面积相等 D. 为零

1.5 MOS场效应管

导 入

场效应管是20世纪60年代出现的一种较新型的半导体器件，其外形与双极型三极管相似，但控制特性却不同，它是利用电场效应来控制输出电流的，所以是电压控制型器件，并以此命名。而且场效应管中只有一种载流子参与导电，故又称为单极型半导体三极管。场效应管最突出的优点是：输入电阻非常高，一般可达 $10^7 \sim 10^{15} \Omega$ ，因此输入端基本上不取电流（耗电省），此外它还具有噪声低，受温度、辐射影响小，制造工艺简单，便于大规模集成等优点，已被广泛应用于集成电路中。主要用途如下：

- (1) 场效应晶体管可应用于放大。由于场效应晶体管放大器的输入阻抗很高，因此可以用容量较小的电容当耦合电容，不必使用电解电容器。
- (2) 场效应晶体管很高的输入阻抗非常适合作阻抗变换。常用于多级放大器的输入级或缓冲级。
- (3) 场效应晶体管可以用作可变电阻。
- (4) 场效应晶体管可以方便地用作恒流源。
- (5) 场效应晶体管可以用作电子开关。



场效应管及其放大电路实物图



学习目标

- (1) 了解绝缘栅型场效应管的分类。
- (2) 熟悉绝缘栅型场效应管的工作原理。
- (3) 熟悉绝缘栅型场效应管的特性曲线。

单元知识

根据结构的不同，场效应管可分为结型场效应管（JFET）和绝缘栅型场效应管（IGFET）两种类型，每类又按导电沟道的不同，有N沟道和P沟道之分。绝缘栅型场效应管按其工作方式的不同，又分增强型和耗尽型两种。下面就以N沟道增强型绝缘栅型场效应管为例，介绍一下其结构、符号及工作特性。

1.5.1 基本结构

MOS场效应管有多种类型，应用最广泛的是以二氧化硅（ SiO_2 ）作为栅极与半导体材料之间的绝缘层的FET，简称MOSFET（Metal Oxide Semiconductor），或MOS管。MOS场效应管有N沟道型（NMOS管）和P沟道型（PMOS管）两种形式，无论是哪种沟道，它们又分为增强型和耗尽型两种。NMOS管和PMOS的结构和电路符号如图1-5-1和图1-5-2所示。

图1-5-1（a）是增强型NMOS管的结构图，它以一块掺杂浓度较低的P型硅作衬底，采用扩散工艺在上面形成两个高浓度的 N^+ 区，然后在上面覆盖一层很薄的二氧化硅保护层。再从两个 N^+ 区引出两个电极，源极S和漏极D。最后在二氧化硅的表面制作栅极G。1-5-1（b）是增强型NMOS管的电路符号，衬底箭头的方向表示由衬底的P区指向沟道N区，如图1-5-1（c）所示是耗尽型NMOS管的电路符号。

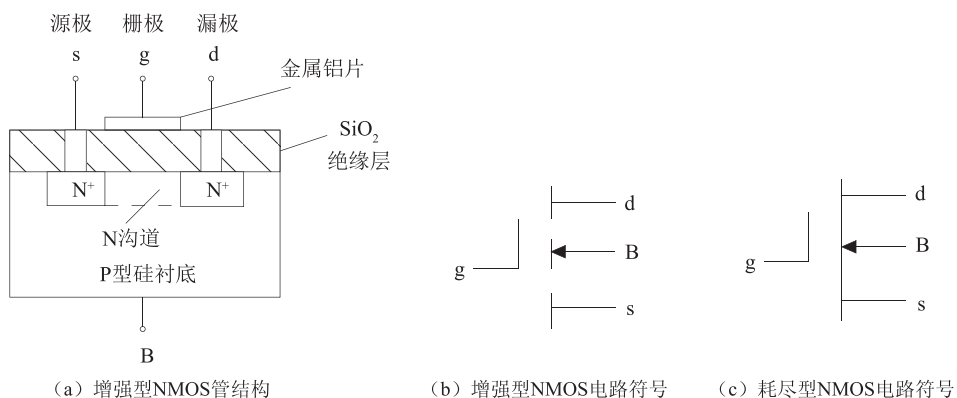


图1-5-1 NMOS管的结构和电路符号

图1-5-2（a）是增强型PMOS管的结构图，内部结构与NMOS管的结构相反。如图1-5-2（b）所示是增强型PMOS管的电路符号，衬底箭头的方向表示由沟道P区指向衬底的N区，如图1-5-2（c）所示是耗尽型PMOS管的电路符号。

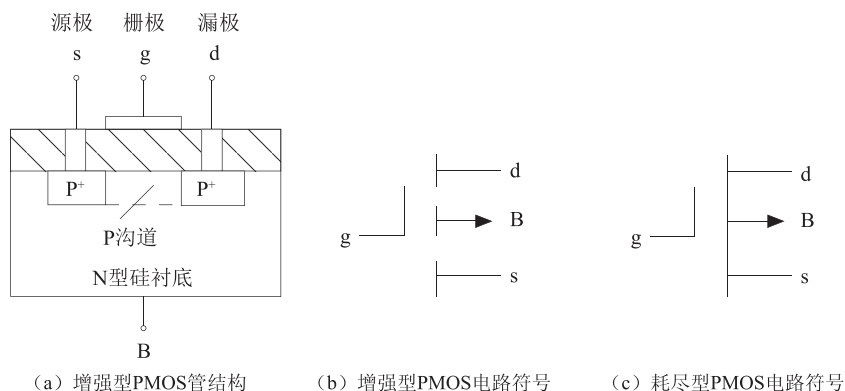


图1-5-2 PMOS管的结构和电路符号

1.5.2 工作原理

N沟道增强型MOS场效应管的工作原理如图1-5-3所示，当NMOS管的栅极和源极短接时，栅源电压 $u_{GS} = 0$ ，这时，源极与衬底以及漏极与衬底之间形成了两个背靠背的PN结。不管在漏极、源极之间所加的电压极性如何，总有一个PN结处于反向截止状态，不会出现漏极电流 I_D 。因此，管子是不导通的。

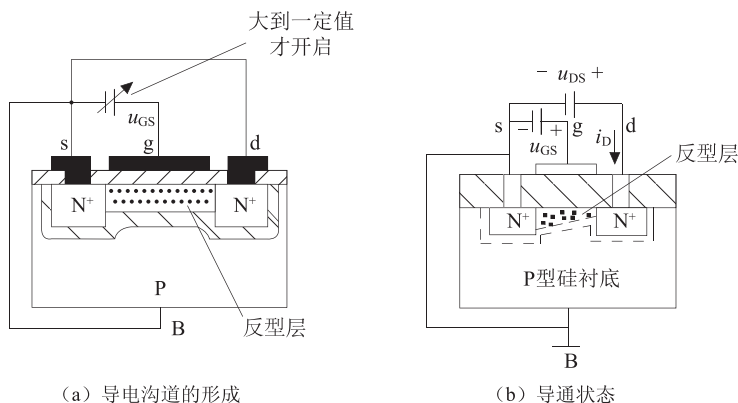


图1-5-3 增强型NMOS管工作原理示意图

在MOS管工作时，源极和衬底通常是连接在一起的。如果这时使漏极和源极之间的电压 $u_{GS} = 0$ ，并在栅极和源极之间加上一个正电压 u_{GS} ，这样将在二氧化硅保护层中产生一个垂直于半导体表面，由栅极指向P型衬底的电场，由于绝缘层很薄，即使电压只有几伏，仍可使栅源电压 u_{GS} 产生的电场达到 $10^5 \sim 10^6 \text{V/cm}$ 。当 u_{GS} 增加至一定值时，电场可将P型衬底中的少数载流子（电子）吸引上来，在P型衬底的表面形成一个N型的薄层，称为反型层。反型层沟通了漏源两个N⁺区域，成为这两个区域之间的导电沟道，如图1-5-3（a）所示。通常，我们将导电沟道开始形成时的电压 u_{GS} 称为开启电压 U_{th} ，显然，栅源电压 u_{GS} 的值越大，吸引的电子越多，形成的导电沟道越厚，沟道电阻越小。这种在 $u_{GS} = U_{th}$ 以后才能形成N型导电沟道的MOS管，称为增强型NMOS管。

当 $u_{GS} > U_{th}$ 时，如果在漏源之间加上一个电压 u_{DS} ，将形成漏极电流 i_D （ i_D 由D流向S）。



电压 u_{GS} 较小时,电压稍有上升,漏极电流 i_D 就会迅速增大。漏极电流 i_D 流过导电沟道时,将会产生压降,使栅极与沟道中各点的压降不再相等,形成一个电位梯度。栅源之间的压降最大,就是 u_{GS} ,此处导电沟道最厚。栅漏之间的压降最小, $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$,导电沟道最薄。整个导电沟道中的电子呈楔形分布,如图1-5-3(b)和图1-5-4所示。

如果 u_{DS} 增大到 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} = U_{th}$ 时,靠近漏端的沟道开始消失,这种情况称为预夹断,如图1-5-4所示。如果 u_{DS} 在此基础上继续增大,将使 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{th}$,则夹断点就会从漏极向源极方向延伸,在漏区附近出现夹断区,如图1-5-4所示。这时, u_{DS} 增大的部分全部落到了夹断区上,形成较强的电场,使电子仍能经过夹断区漂移到漏极,使得漏极电流 i_D 保持连续。由于漏极 i_D 的大小主要由沟道上的压降决定,而沟道上的压降并不随 u_{DS} 的增大而增大。因此,出现预夹断后,漏极电流 i_D 基本上保持一个恒定值,或略有增加。通过上述分析,可以看出,NMOS管是利用 u_{GS} 来控制导电沟道的状况,然后达到控制漏极电流的目的,所以称为电压控制型器件。

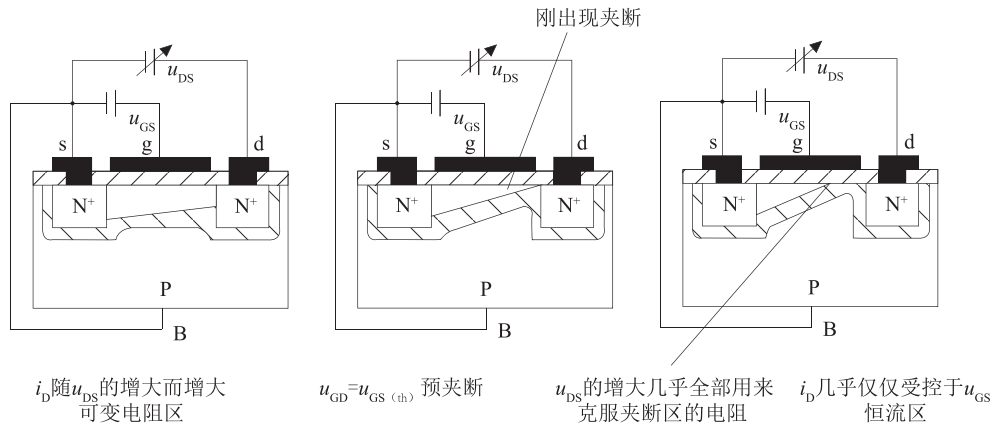


图1-5-4 增强型NMOS管工作原理说明图

1.5.3 增强型NMOS场效应管的特性曲线

1. 输出特性曲线

N沟道增强型MOS管的输出特性曲线如图1-5-5(a)所示,分为可变电阻区、恒流区(饱和区)、夹断区和击穿区四部分。

当 u_{DS} 较小时,源漏极两端沟道的宽度不相等,如图1-5-4(左图)所示, i_D 随 u_{DS} 的增大而增大,为曲线上升部分,即可变电阻区(R_{ON} :几百欧),如图1-5-5(a)所示。当 u_{DS} 增大到使 $u_{DS} = U_{th}$ 时,产生临界状态(图1-5-4中图),临界状态称为预夹断,此时 $u_{DS} = u_{GS} - U_{th}$ 。当 u_{DS} 继续增大,耗尽区向源极扩展(图1-5-4右图), u_{DS} 增加值主要降落在耗尽区上, i_D 增加很少,即为恒流区。在恒流区内,电流 i_D 只受 u_{GS} 控制, u_{GS} 越大,饱和电流越大,输出特性为一组受 u_{GS} 控制的近似平行线,如图1-5-5(a)中间部分所示。夹断区即截止区。 $i_D \approx 0$,ds间相当于断路。当 u_{DS} 太大时,MOS管处于击穿区, i_D 迅速增大,管子可能烧毁。正常工作时,管子不允许处于这个区域。

2. 转移特性曲线

转移特性曲线如图1-5-5(b)所示。曲线与横轴交点的电压值 U_{th} 称为开启电压。

当 $u_{GS} < U_{th}$ 时, $i_D = 0$, 场效应管截止; 当 $u_{GS} > U_{th}$ 时, $i_D > 0$, 场效应管导通, 外加正栅压越大, 沟道越宽, 沟道电阻越小, i_D 越大。NMOS管的 U_{th} 为正值, 一般在2~5V。

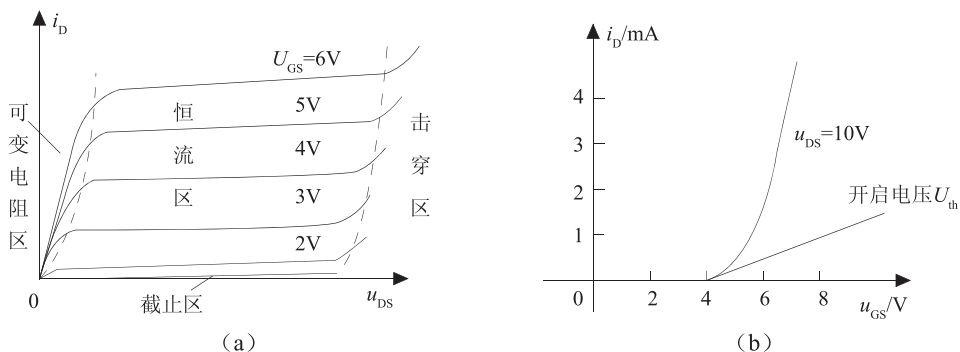


图1-5-5 增强型NMOS管的特性曲线

在恒流区时,

$$i_D = I_{D0} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad (1-14)$$

式中: I_{D0} 为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 I_D 。

图1-5-6是NMOS管的仿真输出特性图。

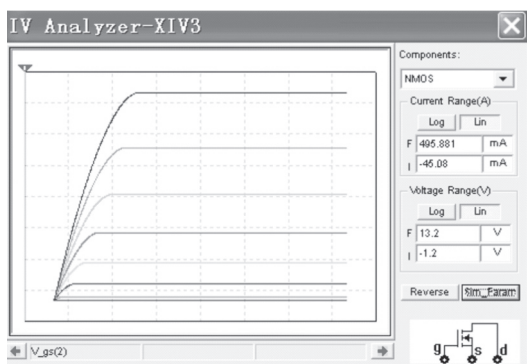


图1-5-6 NMOS管的仿真输出特性图

N沟道耗尽型MOS管的结构和增强型基本相同。主要区别是: 耗尽型MOS管在制造时已在 SiO_2 绝缘层中掺入大量正离子, 所以在 $u_{GS} = 0$ 时, 已存在反型层(即N型导电沟道), 只要加上正 u_{DS} 电压, 就有 i_D 电流产生; 当 u_{GS} 由零减小到某一负电压 $U_{GS(off)}$ 时, 导电沟道被夹断, i_D 变为0, 故称为耗尽型。

耗尽型NMOS管在 $u_{GS} < 0$ 、 $u_{GS} = 0$ 和 $u_{GS} > 0$ 的情况下都可以工作, 这是它的重要特点。

1.5.4 主要参数

1. 开启电压 U_{th}

对于增强型MOS管来说, 在漏源电压 u_{DS} 为某一固定值时, 能够使漏极电流 i_D 从零增大到某一微小电流(例如 $5\mu\text{A}$)时对应的栅源电压 u_{GS} 的值称为开启电压 U_{th} 。

2. 夹断电压 $U_{GS(off)}$

对于耗尽型的FET, 包括MOS管和JFET, 在漏源电压 u_{DS} 为某一固定值时, 能够使漏极



电流 i_D 从大减小到某一微小电流（如 $50\mu A$ ）时对应的 u_{GS} 的值称为夹断电压 $U_{GS(off)}$ 。

3. 饱和漏极电流 I_{DSS}

对于耗尽型的FET，在栅源电压 $u_{GS} = 0$ 的条件下，管子发生预夹断时的漏极电流，称为饱和漏极电流 I_{DSS} 。

4. 直流输入电阻 R_G

这是FET栅源之间的等效电阻。MOSFET的栅源之间有 SiO_2 绝缘层，输入电阻可达 $10^9 \sim 10^{15} \Omega$ 。

5. 低频跨导 g_m

在 u_{DS} 为某一固定值时，漏极电流 i_D 的变化量与栅源电压 u_{GS} 的变化量之比。即

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} (u_{DS} = \text{常数}) \quad (1-15)$$

这个参数反映了栅源电压对于漏极电流的控制能力，是FET的一个重要参数。其值通常为十分之几到几ms，特殊的可达100ms或更高。低频跨导一般可以通过仪器测试得到。

6. 最大耗散功率 P_{DM}

FET的最大耗散功率 $P_{DM} = u_{DS} i_D$ 。其值的大小决定了管子的温升。可以根据这个表达式在输出特性曲线上画出管子的临界功耗线。

PMOS管的工作电压极性及其电流方向与NMOS管完全相反，工作原理、特性曲线基本相似。

表1-5-1和表1-5-2给出了NMOS管和PMOS管的特性。

表1-5-1 NMOS管的特性

类型	符号	在放大状态下		转移特性	输出特性
		u_{GS}	u_{DS}		
N 沟道 耗尽型		+	+		
N 沟道 增强型		+	+		

表1-5-2 PMOS管的特性

类型	符号	在放大状态下		转移特性	输出特性
		u_{GS}	u_{DS}		
P 沟道 耗尽 型		+	-		
P 沟道 增强 型		-	-		

1.5.5 场效应管的特点及使用注意事项

场效应管具有放大作用，可以组成放大电路（恒流区），也可以作为开关元件使用（可变电阻区和截止区），它与双极性三极管相比具有以下特点：

- (1) 通过 u_{GS} 来控制 i_D ，是电压控制型的器件；
- (2) 输入电阻很高，电流小，功耗低；
- (3) 利用多数载流子导电，因此它的温度稳定性较好；
- (4) 放大电路的电压放大倍数要小于双极型三极管组成放大电路的电压放大倍数；
- (5) 抗辐射能力强；
- (6) MOS管体积小，制造工艺简单，便于大规模集成。

MOS器件是一种很有发展潜力的器件，分立元件MOS管出现了大功率的VMOS管，它的某些性能超过了相应的大功率BJT。在模拟集成电路中，出现了双极性器件与MOS器件结合的BiMOS器件。在数字集成电路中，MOS器件更是在大规模和超大规模集成电路中发挥了极其重要的作用。

在使用过程中要注意以下几点：

- (1) 结型场效应管的栅源电压不能接反，因为它工作在反偏状态。

(2) MOS管因栅极与其它部分绝缘，栅极易感应而产生高电压致使管子击穿损坏，所以栅极不能悬空。保存场效应管时应将三个电极短路，取用时不要拿它的管脚，要拿它的管壳。焊接时，电烙铁必须良好接地，最好在焊接时断掉电烙铁电源，焊好后再取下各极间的短路金属环。



练一练

选择题

1. 场效应管的主要优点是（ ）。
A. 输出电阻小
B. 输入电阻大、功耗小
C. 是电流控制器件
D. 组成放大电路时电压放大系数大
2. 下面不属于场效应管特点的是（ ）。
A. 电流是由多数载流子形成
B. 输入端的电阻很小
C. 是通过输入电压来控制输出电流的
D. 抗干扰和辐射能力强
3. 普通晶体管的特性曲线有（ ），场效应晶体管的特性曲线有（ ）。
A. 输入和输出
B. 输入和转移
C. 输出和转移
D. 不确定
4. N沟道增强型MOS场效应晶体管处于放大状态（恒流区）时要求（ ），P沟道结型场效应晶体管处于放大状态（恒流区）时要求（ ）。
A. $U_{GS} > 0, U_{DS} > 0$
B. $U_{GS} < 0, U_{DS} < 0$
C. $U_{GS} > 0, U_{DS} < 0$
D. $U_{GS} < 0, U_{DS} > 0$
5. MOS场效应晶体管发生预夹断后，管子（ ）。
A. 关断
B. 进入恒流区
C. 进入可变电阻区
D. 不确定

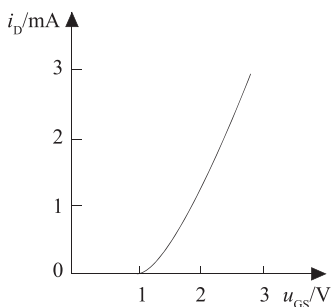
本章小结

1. 半导体中存在两种载流子，即电子和空穴。纯净的半导体称为本征半导体，它的导电性很差，并且有光敏、热敏和掺杂特性。
2. 掺入微量其他元素的半导体称为杂质半导体，它的导电能力比本征半导体显著加强。杂质半导体分两种，即N型和P型半导体。N型半导体：电子为多数载流子，主要由掺杂形成，空穴为少数载流子，由热激发产生；P型半导体：空穴为多数载流子，主要由掺杂形成，电子为少数载流子，由热激发产生。
3. PN结具有单向导电性，P+N—导通，P-N+截止。
4. 二极管的内部就是一个PN结，正向偏置导通，反向偏置截止。
5. 在电子技术中，利用二极管的单向导电性可以构成整流、限幅等应用电路。
6. 稳压二极管的反向击穿特性曲线较陡，它通常工作在反向击穿区，使用时要注意限流电阻值的选取。
7. 变容二极管、光电二极管、发光二极管和激光二极管是具有不同功能的二极管，在使用时变容二极管和光电二极管必须反向偏置，发光二极管和激光二极管必须正向偏置。发光二极管还要串联限流电阻。
8. 三极管内部有两个PN结，三极管放大的实质是以很小的基极电流控制较大的集电极电流。发射结正偏，集电结反偏，三极管工作在放大状态，在放大状态时 $I_C = \beta I_B$ ， $I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = (1 + \beta) I_B$ 。三极管是电流控制元件。
9. 场效应管是以很小的栅源电压控制较大的漏极电流。场效应管是电压控制元件。

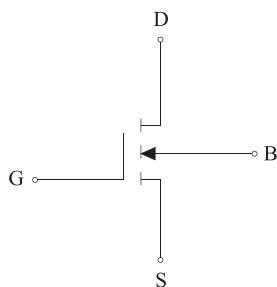
思考练习

一、填空选择题

- 1.1 半导体是一种导电能力介于_____和_____之间的物质。
- 1.2 杂质半导体分_____型和_____型半导体两大类。
- 1.3 N型半导体是在四价本征半导体中掺入_____价元素而形成，其多数载流子是_____，少数载流子是_____，P型半导体是在四价本征半导体中掺入_____价元素而形成，其多数载流子是_____，少数载流子是_____。
- 1.4 在判别硅、锗晶体二极管时，当测出正向压降为_____时就认为此二极管为锗二极管；当测出正向电压为_____时，就认为此二极管为硅二极管。
- 1.5 PN结具有_____性能，即加正向电压时PN结_____，加反向电压时PN结_____。
- 1.6 当温度升高时，PN结的反向电流会_____。
- 1.7 用万用表欧姆档测量二极管好坏时，测量的正反向阻值相差越_____越好。
- 1.8 场效应管具有输入电阻很_____、抗干扰能力_____等特点。
- 1.9 场效应管从结构上分成_____和_____两大类型，它属于_____控制型器件。
- 1.10 已知场效应管的转移特性曲线如题1.10图所示，则此场效应管的类型是（ ）。
- A. 增强型PMOS B. 增强型NMOS C. 耗尽型PMOS D. 耗尽型NMOS



题 1.10 图

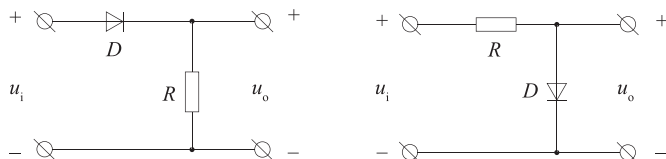


题 1.11 图

- 1.11 如题1.11图所示，电路符号代表_____管。

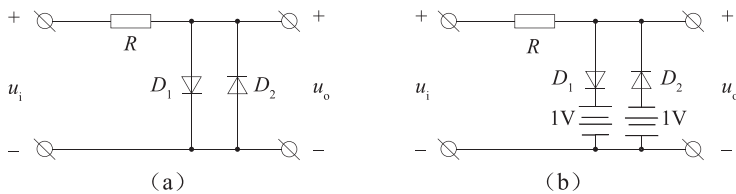
二、分析计算题

- 1.12 理想二极管电路如题1.12图所示。已知 $u_i = 10\sin\omega t(\text{V})$ ，分别画出 u_o 相应的波形。



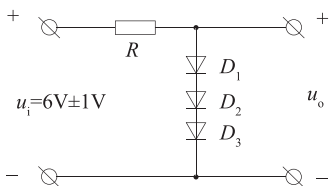
题 1.12 图

- 1.13 在题1.13图所示电路中，已知 $u_i = 5\sin\omega t(\text{V})$ ，若二极管的正向导通压降为 0.7V ，请分别画出 u_o 相应的波形。

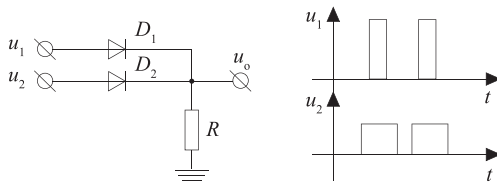


题 1.13 图

1.14 二极管电路如题1.14图所示，电阻 $R=1\text{k}\Omega$ 。（1）利用硅二极管的理想二极管串联电压源模型求流过二极管的电流 I 和输出电压 u_o 。（2）利用二极管的交流模型求输出电压 u_o 的变化范围。



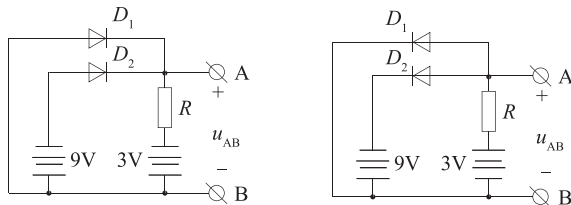
题 1.14 图



题 1.15 图

1.15 理想二极管电路如题1.15图所示，输入信号 u_1 和 u_2 的波形如题1.15图所示。画出输出电压 u_o 的波形。

1.16 试分析题1.16图电路中的理想二极管是导通还是截止？并求出A、B两端的电压 U_{AB} 。



题 1.16 图

1.17 用数字万用表的电阻档测量二极管的正反向电阻。万用表内的电池为1.5V，红色表笔接电池正端，黑色表笔接电池负端。（1）当用黑色表笔接二极管的A端，红色表笔接二极管的B端时，测得二极管的等效电阻为 200Ω ；用黑色表笔接二极管的B端，红色表笔接二极管的A端时，测得二极管的等效电阻为 $20\text{k}\Omega$ 。试问A、B两端哪一端是阳极，哪一端是阴极？测得的电阻是直流电阻还是交流电阻？（2）若万用表的 $R \times 10\Omega$ 档的内阻为 240Ω ， $R \times 100\Omega$ 档的内阻为 $2.4\text{k}\Omega$ 。分别用这两档去测二极管的正向电阻，测得的值是否同样大？为什么？

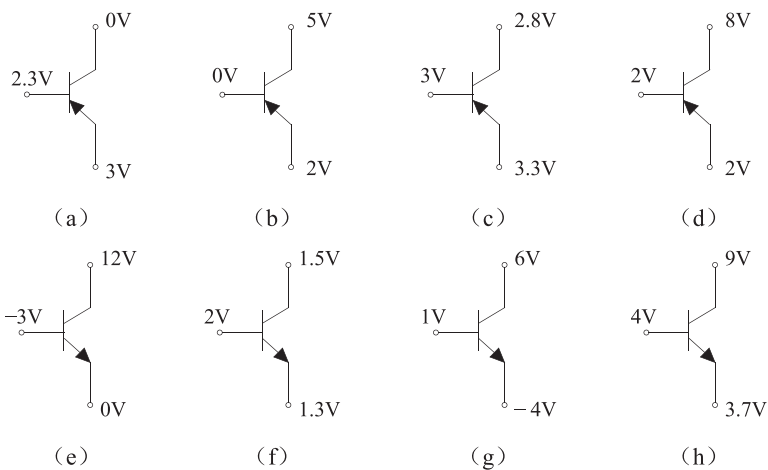
1.18 有两个稳压管，其稳压值 $U_{z1}=6\text{V}$ ， $U_{z2}=7.5\text{V}$ ，正向导通压降 $U_D=0.7\text{V}$ 。若两个稳压管串联时，可以得到哪几种稳压值？若两个稳压管并联时，又可以得到哪几种稳压值？

1.19 如何用万用表的欧姆档判定一个BJT是NPN型还是PNP型？如何确定BJT的B、C、E三个极？

1.20 有甲、乙两个三极管，均工作在放大区，从电路中可以测得它们各个管脚的对地电压为：甲管 $U_{x1}=12\text{V}$ ， $U_{x2}=6\text{V}$ ， $U_{x3}=6.7\text{V}$ ；乙管 $U_{y1}=-15\text{V}$ ， $U_{y2}=-15\text{V}$ ， $U_{y3}=-7.5\text{V}$ 。试判断它们是锗管还是硅管？是PNP型还是NPN型？哪个极是基极、发

射极和集电极？

- 1.21 测得某三极管的3个电极的电位为 $U_1 = 5V$, $U_2 = 1.2V$, $U_3 = 1V$, 假设工作在放大区, 试判定该管为何种类型, 是硅管还是锗管, 并确定B、C、E极。
- 1.22 题1.22图中给出了8个BJT各个电极的电位, 其中(c)和(h)为锗管, 其余为硅管, 试判定这些BJT是否处于正常工作状态? 如果不正常, 是短路还是烧断? 如果正常, 是工作于放大状态、截止状态还是饱和状态?



题 1.22 图