

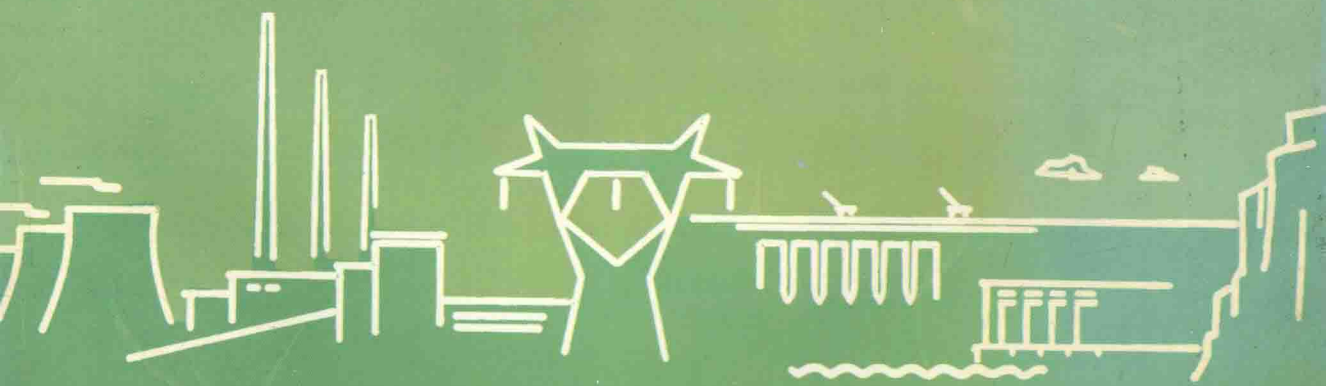


普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

模拟电子技术

武汉水利电力大学 杨国涛 主编



中国电力出版社

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

模拟电子技术

武汉水利电力大学 杨国涛 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国电力出版社

内 容 提 要

本书围绕模拟集成电路,系统地介绍了半导体器件(包括其他教材中少见的光电子器件、大功率器件 GTR 和 IGBT 等)、基本放大电路,集成运放及其应用,还介绍了正弦波振荡器、直流稳压电源和交流电路等内容。

本书主要是为高等学校水利水电动力工程专业编写的教材,亦可作为有关专业的教材或教学参考书,同时还可供从事电子技术工作及其他相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/杨国涛主编.-北京:中国电力出版社,1998

高等学校教材

ISBN 7-80125-472-4

I. 模… II. 杨… III. 模拟电路-高等学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 19194 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 332 千字

印数 0001—1320 册 定价 15.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

模拟电子技术是水利水电动力工程专业（简称水动专业）的基础课程之一。本教材是根据高等工业学校电子技术课程教学指导小组 1993 年颁发的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求（修订稿报国家教委审批）》等文件要求，同时听取高校水电工程类专业教学教材指导委员会对水动专业提出的要求意见，并结合电子技术的发展情况编写而成的。编写遵循先进性、科学性和实践性的原则，侧重于基本概念、基本电路和基本分析方法的阐述，力求文字简练、通俗易懂，力求适应水动专业的需要。

本教材编写的指导思想：以集成电路为主，半导体器件为基本电路服务，为实践服务，基本电路为集成电路服务，使读者达到熟练运用集成电路的目的。

教材第一章是本书的基础，除介绍集成电路中常用的器件外还介绍了一些过去教材中少见的新器件，如光电器件、GTR、IGBT 等。第二章的分析和计算内容为集成电路服务，是它的基础。同时也照顾到历史情况，即照顾到由分立元件构成的电路，它们目前在现场还有应用。第三章介绍的集成运放因其用途广泛，是本书的重点。这一章介绍了组成集成运放的单元电路、参数、计算、技术指标，介绍它的各种应用以及使用中的若干实际问题。第四章以 RC 振荡器为重点。第五章以集成稳压器为重点，介绍单元电路的目的在于合理使用它。第六章变流技术，对水动专业很有用，故教材把它单独列为一章，既介绍了大功率整流又介绍了逆变。

全书共六章，第一章到第四章由武汉水利电力大学杨国涛编写，第五、六章由华北水利水电学院魏德华编写。由杨国涛担任主编，负责全书的组织和定稿工作。

本书承蒙河海大学杨锦堂教授主审。对杨教授的精心审阅和耐心指正，以及高校水电工程类专业教学指导委员会徐枋同教授的关心和指导，编者在此一并表示衷心的感谢。

由于学识有限，书中难免存在不少缺点甚至错误，敬请读者批评、指正。

编者

1997.9

目 录

前 言

第一章 半导体器件	1
第一节 集成电路中的半导体管	1
第二节 光电子器件	9
第三节 大功率半导体器件	15
小结	20
习题	21
第二章 基本放大电路	23
第一节 三极管的共射放大电路及其图解分析	23
第二节 微变等效电路分析	29
第三节 共集电路和共基电路	35
第四节 场效应管放大电路	38
第五节 多级放大器	41
第六节 放大器的频率特性	43
第七节 放大电路中的负反馈	48
小结	56
习题	57
第三章 集成运算放大器及其应用	62
第一节 概述	62
第二节 集成运放中的基本单元电路	66
第三节 典型集成运放电路分析及运放的参数	83
第四节 集成运放的线性应用	89
第五节 集成运放的非线性运用	123
小结	129
习题	129
第四章 正弦波振荡器	138
第一节 RC 正弦波振荡器	138
第二节 LC 正弦波振荡器	142
第三节 石英振荡器	147
小结	149
习题	150
第五章 直流稳压电源	152
第一节 整流电路	152
第二节 滤波电路	155

第三节 稳压电路	158
第四节 不间断电源	182
小结	183
习题	184
第六章 变流电路	186
第一节 可控整流电路	186
第二节 逆变电路	200
第三节 控制电路	207
第四节 大功率器件的保护	219
第五节 应用举例	224
小结	225
习题	227
参考文献	229

第一章 半导体器件

提要 半导体器件是近代电子学的重要组成部分，是构成各种电子电路的基础。本章着重介绍集成电路中的半导体器件，包括二、三极管、稳压管和绝缘栅场效应管等。此外，光电子器件和大功率器件在电子技术中有重要的用途，本章也将作一些介绍。

第一节 集成电路中的半导体管

一、概述

1. 半导体

半导体是介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、某些氧化物等。半导体具有许多特殊性质，如受光或热的照射（或称激发），导电性能会发生较大的变化；在纯净的半导体材料中掺入微量杂质，半导体的导电性能将受到很大影响。这些特性说明半导体的导电机制不同于其他物质。

不含杂质而结构完整的半导体单晶称本征半导体。单晶中的原子核靠得很近，而且排列很整齐。以硅为例，每个核最外层有四个价电子，相邻两核各出一个电子绕两核旋转而组成了共价键，如图 1-1 所示。共价键中的价电子受两核吸引，不能自由移动，它们受到外界激发而获得足够的能量后，才有可能挣脱共价键的束缚成为自由电子，这个过程称本征激发。共价键中缺少一个电子时的空位置称空穴。可见本征激发所产生的自由电子和空穴是成对出现的。自由电子带负电荷，空穴显现正电荷。它们都是带电的粒子，在外加电压作用下这些带电粒子会作定向运动，形成电流。故它们又都称作载流子。电子运动方向和空穴运动方向相反。温度极低和无光照射时，本征半导体的载流子极少，因而极难导电，在常温或光照下，导电能力增强，但与一般导体相比仍相差甚远，所以称半导体。

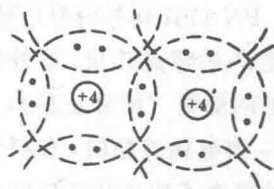


图 1-1 共价键结构示意图

在本征半导体中有目的地掺进某种微量化学元素，导电能力会大大增强。掺入的元素称杂质，掺入了杂质的半导体称杂质半导体。根据所掺杂质不同，可分成 N 型半导体和 P 型半导体。若掺入五价元素，如磷、砷等，便形成了 N 型半导体。五价元素与半导体材料一起构成单晶时，共价键只需四个外层电子，杂质元素将多出一个电子，这个电子受核的束缚远小于其他电子，只要受到一点激发就能轻易地挣脱核的束缚成为自由电子，这个自由电子不是从共价键中挣脱出来的，所以不会形成新的空穴。N 型半导体在常温下也有本征激发产生的电子、空穴对，它们是成对产生的，故 N 型半导体中自由电子多而空穴少，所以在 N 型半导体中的电子称多数载流子，空穴称少数载流子。

同理,在本征半导体中掺入三价元素,如硼、铝等,就形成了P型半导体,构成单晶并组成共价键时,三价元素缺少一个电子而多出一个空位置——空穴,这个空穴不是共价键中挣脱电子后形成的。同样在常温下也有本征激发产生的电子、空穴对,因为成对产生,所以P型半导体中空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

杂质半导体中多数载流子的数目决定于掺进杂质的浓度,少数载流子的数目主要决定于温度。

2. PN 结

无论是N型半导体还是P型半导体,它们虽都有一种载流子占多数,但整个晶体仍然是电中性的。当采用一定的掺杂工艺使半导体材料两边分别形成P型和N型半导体后,由于载流子浓度的差别,各自的多数载流子将向浓度低的方向扩散,见图1-2。扩散的结果P型半导体中的空穴被N型半导体中的电子所填充,失去电子的一边形成一层带正电荷的粒子区,得到电子的一边形成一层带负电荷的粒子区,这两个粒子区便是PN结。两区的电荷性质不同,于是构成了内电场 E 。内电场的方向由N区指向P区,PN结一旦形成,内电场便阻止多数载流子向对方扩散,而有利于少数载流子运动形成漂移电流,少数载流子漂移的结果又削弱了的内电场的强度而有利于扩散,扩散的结果又加强了内电场,最后扩散和漂移达到动平衡。

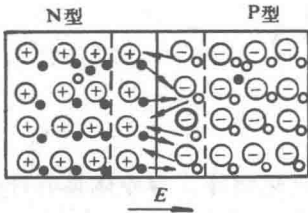


图 1-2 PN 结形成示意图

载流子浓度的差别,各自多数载流子将向浓度低的方向扩散,见图1-2。扩散的结果P型半导体中的空穴被N型半导体中的电子所填充,失去电子的一边形成一层带正电荷的粒子区,得到电子的一边形成一层带负电荷的粒子区,这两个粒子区便是PN结。两区的电荷性质不同,于是构成了内电场 E 。内电场的方向由N区指向P区,PN结一旦形成,内电场便阻止多数载流子向对方扩散,而有利于少数载流子运动形成漂移电流,少数载流子漂移的结果又削弱了的内电场的强度而有利于扩散,扩散的结果又加强了内电场,最后扩散和漂移达到动平衡。

PN结具有单向导电性。这是由于PN结的内电场使N区电位高,P区电位低,两者电位差 U_0 约零点几伏。当外加电压的正端接P区,负端接N区时,称PN结加正向电压 U_F 或称正向偏置(简称正偏),此时外加电压形成的外电场与PN结的内电场方向相反($U_0 - U_F$),内电场被削弱,有利于扩散作用的进行。N区电子向P区扩散,P区空穴向N区扩散,两种载流子到达结区后就会进行中和作用,损失了的电子和空穴由电源提供再扩散,从而在外电路就形成了较大的正向电流,这时PN结表现为很小的电阻。

当外加电压的正端接N区,负端接P区,则称PN结加反偏电压 U_R , U_R 加强了内电场($U_0 + U_R$),有利于漂移而不利于扩散。在 $U_0 + U_R$ 作用下少数载流子几乎全部形成漂移电流流过PN结以致达到饱和的程度,其方向与扩散电流相反,故称反向饱和电流 I_s 。因 I_s 极小可认为基本上不导电,这时PN结表现为极大的电阻。

PN结加正、反向偏压表现出正向电流大、正向电阻小和反向电流小、反向电阻大的特性就是PN结的单向导电性。

二、集成电路中的半导体管

随着半导体制造技术的发展,现在可以在一块很小面积(如 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$)的硅片上把成千上万只半导体管、电阻、电容等元件及电路的引线全部集成在一起,元件和电路合二为一,制成具有一定功能的器件,给使用带来极大方便。但在高集成度情况下,出现了新问题,那就是元件之间的隔离问题。

集成电路中的隔离方法大致有两种:PN结隔离和介质隔离。利用PN结在反偏情况下反向电阻很大的特点,将需隔离的元件周围全部用PN结包围起来,这就是PN结隔离。PN

结隔离的缺点是明显的,不能达到真正的电气绝缘,因为PN结反向电阻有限且受温度影响较大,另外这种隔离技术会产生寄生效应,如产生寄生电容、寄生晶体管等。现在多用介质隔离技术,其技术是采用硅材料,利用扩散法或外延法生成一层隐埋层。再用氧化(二氧化硅的绝缘强度极高)、光刻等工艺制成“隔离岛”,在“岛”上制造需要隔离的元器件,既达到了隔离的目的又消除了寄生效应。

1. 三极管

三极管是三层结构,三层杂质半导体构成两个PN结,根据夹在中间的杂质半导体的不同可分为PNP型和NPN型两种三极管。以NPN型三极管为例,中间夹层是P型半导体,称基区,见图1-3(a),两边是N型半导体,左侧称发射区,右侧为集电区,前者掺杂浓度远高于后者。两个PN结分别称发射结和集电结,当发射结加正向偏置,集电结加反向偏置时,三极管具有共射电流放大的作用,集电极电流是基极电流的 β 倍。这是因为此时发射结内电场被削弱,有利于扩散,见图1-3(b),发射区的电子大量扩散到基区,基区中的空穴也扩散到发射区,但空穴数目极少,可以忽略,到达基区的电子一部分与基区中的空穴复合形成复合电流 I'_B ,同时加在发射结上的电源不断给基区提供空穴,以保持基区中空穴的浓度,于是形成基极电流 I_B 。到达基区的电子的绝大多数作为基区的少数载流子继续向前运动,到达集电结附近,因集电结加反偏故结区的合成电场很强,有利于漂移运动,于是基区这部分未被复合的电子就成为基区的少数载流子,能轻易地漂移到集电区,形成集电极电流 I'_C 。这里要注意电子流的方向与规定电流方向相反。同时集电区内的少数载流子空穴,也漂移到基区形成集电结反向饱和电流 I_{CBO} ,因基区内空穴较少 I_{CBO} 对基区的空穴浓度影响较大,不可忽略。空穴流的方向与规定电流方向相同。可见NPN型三极管电流方向是由集电极流向发射极的,所以它的符号用发射极的箭头向外画表示。如图1-3(a)所示。同理PNP型管电流方向和NPN型的方向相反,符号为发射极箭头向里画。

当三极管制成后,基区的宽度、各层的杂质浓度都被确定,故基区中复合的机会也确定了,因此,集电极电流和基极电流之间的比例也就确定了。这个比例用共射电流放大系数 β 表示

$$\beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B} \approx I_C / I_B \quad (1-1)$$

为了提高三极管的性能,如要增大 β ,则基区要做得尽量薄,基区内杂质浓度也要尽量低,以减少载流子在基区中的复合机会。又如 I_{CBO} 对放大没有贡献,制造时总是设法尽量减少它。

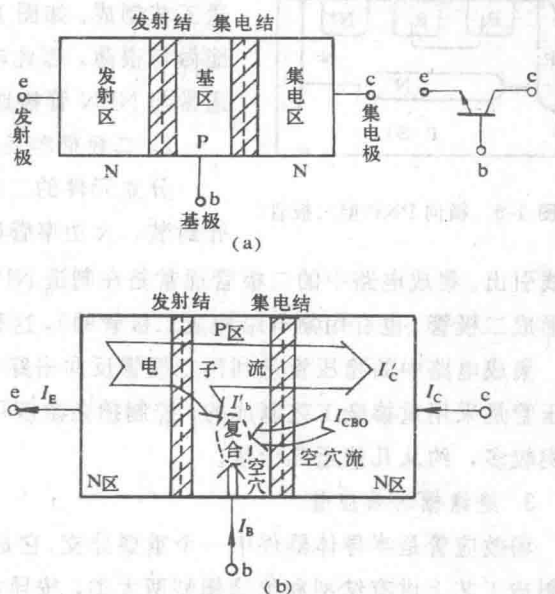


图 1-3 NPN 型三极管

(a) 结构示意图及符号; (b) 电流传输过程

三极管内各电流之间显然有如下关系

$$\left. \begin{aligned} I'_B &= I_B + I_{CBO} \\ I_E &= I'_C + I'_B \\ I_C &= I'_C + I_{CBO} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

根据式 (1-2) 可导出

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-3)$$

集成电路中的三极管与分立元件的三极管有许多不同的地方, 至少有三点: ①分立元件的三极管中电流的路径短, 集成电路中的三极管为了便于与其他元件连接, 三个电极都要从同一侧引出 (见图 1-4), 电流的路径相对地被加长, 增大了集电区等效串联电阻, 故饱和压降大, 集电区的损耗相应也较大 (因此常设置 N^+ 埋层加以改善, 这又增加了一道工序); ②同一芯片上所有三极管制造工艺相同, 所以参数误差很小, 很适于做差动放大器之类的对称电路; ③利用集成电路工艺很容易做成集成电路中常用的多集电极三极管 (共用一个基极和一个发射极) 或多发射极三极管 (共用一个基极和一个集电极)。

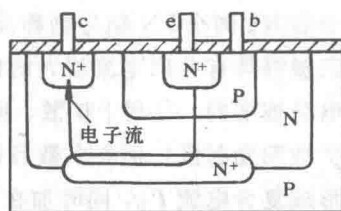


图 1-4 三极管中的电流路径

在同一芯片上采用生产 NPN 管工艺制作的 PNP 型管称横向 PNP 管, 它的基区与制造

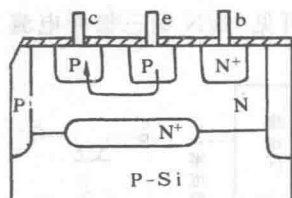


图 1-5 横向 PNP 型三极管

NPN 管的集电区同时形成, 从而 P 型发射区和集电区是同一道工艺制成。如图 1-5 所示, 由于制造技术的限制, 基区不可能做得很薄, 因此电流放大系数很小, 频率特性也差, 为此, 通常与 NPN 管构成复合管加以克服。

2. 二极管和稳压管

分立元件的二极管由一个 PN 结构成, 用玻璃或塑料外壳封装, 大功率管则用金属外壳封装, N 区和 P 区各用一条引线引出。集成电路中的二极管通常是在制造 NPN 管时, 把集电极和基极短接后再与发射极形成二极管 (也有用集电结构成二极管的), 这种二极管的反向击穿电压较低, 仅 5~7V。

集成电路中的稳压管是利用二极管反向击穿特性制成的, 稳压范围不大。分立元件的稳压管是采用重掺杂工艺制成的, 控制掺杂浓度可以控制反向击穿电压值, 稳压范围较宽, 种类较多, 约从几伏至几十伏。

3. 绝缘栅场效应管

场效应管是半导体器件中一个重要分支, 它是用电场来控制载流子的运动原理制成的。从制造工艺上讲有结型和绝缘栅型两大类, 按导电机构的不同可分为 N 沟道和 P 沟道。绝缘栅型场效应管从工作原理上讲还有增强型和耗尽型的区别。目前广泛运用的是绝缘栅场效应管, 下面以 N 沟道增强型绝缘栅场效应管为例, 说明其结构和工作原理, 见图 1-6。在 P 型半导体硅片上扩散两个高掺杂的 N^+ 区, 从两 N^+ 区引出两个电极作为源极 S 和漏极 D,

然后制造一层极薄的氧化层绝缘，再在绝缘层上的两个 N^+ 区之间制做一个金属极板，从该极上引出一个电极称栅极 G ，栅极 G 与漏极 D 、源极 S 是绝缘的，故称绝缘栅场效应管，或称金属—氧化物—半导体场效应管。简称 MOS 管 (Metal—Oxide—Semiconductor)。由于两个 N^+ 的漏极和源极中间夹着 P 区，形成两个反向连接的 PN 结，若栅—源之间不加电压，则无论漏、源之间所加电压的极性如何，漏、源间总有一个 PN 结是反向偏置的，故只有极小的反向饱和电流，可以认为漏极电流 $I_D \approx 0$ 。如果栅源之间加正向电 U_{GS} (栅极加正、源极加负、衬底与源极通常是短接的)，则 U_{GS} 在栅极与源极之间 (中间夹着极薄的绝缘层) 将产生一个垂直向下的强电场，把空穴推向下部，电子被吸引到栅极的金属极板下，这部分电子除填补衬底的空穴外还在靠近绝缘层附近形成一层 N 型层，这一层 N 型层便把漏极和源极的 N^+ 区沟通，产生了导电通道，又称沟道。正向的 U_{GS} 越大，导电沟道就越深，在漏极电压 E_D 作用下 (漏极接电源的正，源极加负) 形成的漏极电流 I_D 就越大。在一定的漏极电压 E_D 作用下使管子由不通变为导通的临界栅源电压称开启电压 U_T ，显然在 $0 < U_{GS} < U_T$ 的范围内导电沟道不存在， $I_D \approx 0$ ，在 $U_{GS} > U_T$ 后， U_{GS} 越大 I_D 也越大， I_D 受 U_{GS} 控制，这就是场效应管的基本工作原理。这种栅源电压为 0 时没有漏极电流，以及在正向栅源电压作用下才可产生漏极电流的 MOS 管称增强型 MOS 管。耗尽型 MOS 管则在栅源电压为 0 时，就有沟道且 I_D 达最大值，栅源电压越负，沟道越窄、 I_D 越小。这是由于在制造绝缘层工艺时在绝缘层中加入了一定数量正离子的缘故。

除了 N 沟道耗尽型和增强型 MOS 管外，还有 P 沟道增强型和耗尽型，它们供电电压极性和 N 沟道不一样，下面用表 1-1 加以说明。

表 1-1 MOS 管的符号特性曲线

类	型	符号和电压极性	转移特性	漏极特性
绝缘栅增强型	N 沟道			
	P 沟道			

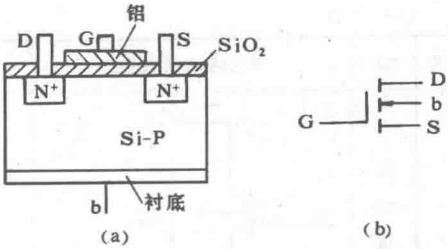
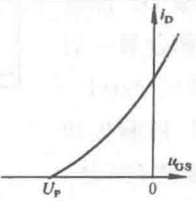
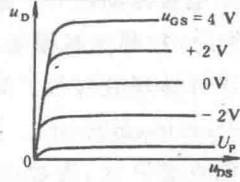
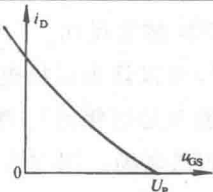
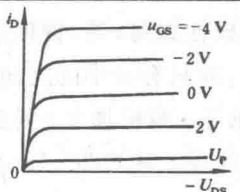


图 1-6 N 沟道增 MDS 管结构示意图
(a) 结构示意图；(b) 符号

类 型	符号和电压极性	转移特性	漏极特性
绝缘栅耗型	N 沟道		
	P 沟道		

注 U_T —开启电压; U_P —夹断电压。

三、半导体管的特性曲线

1. 二极管及稳压管的特性曲线

二极管的数学模型可用加在 PN 结上的偏压 u 与流过二极管电流 i 之间的关系来描述

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-4)$$

式中 U_T ——温度的电压当量, 在 300 时 $U_T \approx 26\text{mV}$;

I_s ——PN 结的反向饱和电流。

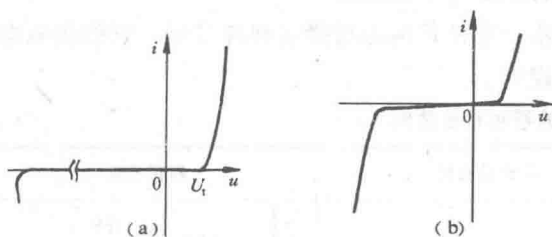


图 1-7 硅二极管和稳压管的伏安特性

(a) 二极管的伏安特性; (b) 稳压管的伏安特性

由式 (1-4) 可得到二极管的电压—电流特性, 即伏安特性, 见图 1-7。

(1) 正向特性: 二极管加正向电压 (正偏), 该电压较小时外加电压形成的外电场不足以削弱 PN 结内电场, 扩散作用不强, 二极管可近似认为截止。正向电压上升, 超过 U_i 后内电场被削弱, 扩散作用增强, 二极管导通, U_i 称二极管的阈值电压或称死区电压。 U_i 的大小与

制造 PN 结的材料、掺杂浓度、室温等有关。在 25°C , 硅管约 0.5V , 锗管约 0.1V 。

(2) 反向特性: 二极管加反向电压, 只有漂移作用形成反向饱和电流, 在击穿电压以内, 无论反向电压有多大, 当温度一定时, 反向电流基本恒定不变。这是由于在一定温度下, 本征激发产生的少数载流子数目一定, 反向电压再大也不会有更多的少数载流子形成漂移电流, 故这个电流又称反向饱和电流。硅管的反向饱和电流约在微安级, 所以往往将它忽略。锗管较大, 可达毫安级。

(3) 反向击穿特性: 反向电压增大到一定程度时 (如几百伏), 反向电流突然增大, 这

就是二极管的反向击穿。因为反向电压增高后 PN 结内的电场很强,少数载流子在此强电场作用下获得了很大的动能,在漂移运动过程中撞击共价键中的电子,使这些电子获得足够的能量而脱离共价键,产生新的电子空穴对,而新、老的载流子又在强电场作用下再次撞击、再次产生,从而使反向电流很快增大,这种现象称雪崩击穿。反向击穿时因反向电压高反向电流大,PN 结上的功率损耗大,超过允许值就会使 PN 结过热而损坏二极管。

稳压管工作于反向击穿状态,它的正、反向伏安特性与二极管相似。不过,反向击穿电压较低。这是由于稳压管制造时掺杂浓度较高,PN 结很薄,在反向电压作用下,结区内电场强度很高(约 10^6V/cm),该电场可直接把共价键中的价电子拉出来,形成电子空穴对,由于结区很薄,还未来得及形成雪崩击穿,载流子就通过了 PN 结,因此,反向击穿后,反向电流并不大,功率损耗也不大,不会过热,在允许的反向电流内击穿后不会造成 PN 结损坏。稳压管的特性曲线如图 1-7 (b) 所示。

2. 三极管的特性曲线

三极管内部载流子的运动规律在外部可用输入和输出两组特性曲线来描述。三极管在电路中有三种连接方式,共射、共基、共集。用得最多的是共射放大电路,下面以 NPN 管共射放大电路为例,介绍这两组特性曲线。

(1) 输入特性:在集电极和发射极之间加上一定电压 U_{CE} 的情况下,基极和射极间的电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线称输入特性曲线。它是一族曲线,随 U_{CE} 的改变而变化,如图 1-8 所示,当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 时,曲线挤在一起几乎成了一条曲线,它们在 $U_{CE}=0$ 的那条曲线的右边。这是由于不同的 U_{CE} 使集电结加的反向电压不同、所形成的电场不同而造成的。 $U_{CE}=0$ 时,只有集电结内电场作用,对基区中的多余电子吸引力不够大,电子滞留基区,在基区复合机会增大而使 I_B 增大。 $U_{CE}=1\text{V}$ 后,该电压所形成的电场与 PN 结内电场合成的电场可以把发射区扩散到基区的电子中的绝大多数拉入集电区,在基区复合机会减少的缘故。但 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 以后继续增大 U_{CE} ,合成电场虽然加强,只因 U_{BE} 一定,发射的电子数目一定,拉入集电区去的电子数目基本上保持不变,故 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 的一组曲线可看作是重合的。由于三极管工作时大多数情况是 $U_{CE} > 1\text{V}$,所以右边那条曲线更有用。输入特性曲线与二极管的正向特性相似,也有一个阈值电压,对硅管约 0.5V ,锗管约 0.1V 。正常工作情况下硅管 U_{BE} 的工作电压约 0.7V ,锗管约 0.2V 。

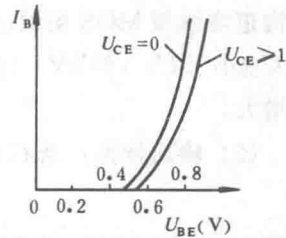


图 1-8 三极管的输入特性曲线

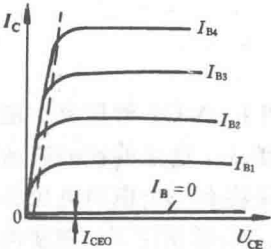


图 1-9 三极管的输出特性曲线

(2) 输出特性:输出特性是基极电流 I_B 为某一常数时,集电极电流 I_C 和集射极间电压 U_{CE} 之间的关系曲线,它也是一族非线性曲线,见图 1-9, I_B 为常数表示发射区扩散到基区的电子数大致一定,曲线的上升阶段在 $U_{CE} < 1\text{V}$ 时,集电结上的合成电场不太强,由发射区扩散到基区中的电子在集电结电场作用下,进入集电区不太多,所以 I_C 随 U_{CE} 上升而增加,当 $U_{CE} > 1\text{V}$ 后扩散到基区中的电子绝大部分被拉过集电结形成 I_C ,以致 U_{CE} 再增大 I_C 变化也不大,这就是曲线的平坦部

分, 表现出三极管的恒流特性。

通常为分析方便, 将输出特性分成三个区, 每个区对应于一种工作状态: ①截止区, 对应于 $I_B=0$ 的那条曲线至横轴间的区域。该区的特点是集电结和发射结都处于反向偏置, 三极管失去了放大作用。 $I_B=0, I_C=I_{CEO}$ ——穿透电流。好像电流直接从集电区穿过基区至发射区。②饱和区, 如图 1-9 中虚线与纵轴包围的区域, 饱和区内 U_{CE} 较小, 集电结和发射结都处于正向偏置, 集电结内合成电场弱, I_B 增大并不能使 I_C 随之增大, $I_C \neq \beta I_B$, 失去正常的电流放大作用。通常把此时的管压降称作三极管的饱和压降并用 U_{CES} 记之。小功率三极管 U_{CES} 在 1V 以下, 功率较大的管子可能超过 1V。③放大区, 除去截止区和饱和区以外的区域就是放大区, 又称线性区。本区的特点是发射结正向偏置, 集电结反向偏置, I_C 与 I_B 有固定的比例关系, 即 $I_C \approx \beta I_B$, 具有电流放大作用, 且 I_C 与 U_{CE} 几乎无关。

3. MOS 场效应管的特性曲线

MOS 场效应管也可用两组特性曲线来描述。

(1) 转移特性: 由于 MOS 管的栅极与源极、漏极绝缘, 所以无输入电流, 采用输入特性无意义。但当漏源电压 U_{DS} 为一定值时, 输入电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 有控制作用, 这个作用称转移特性, 其关系式为

$$I_D = f(U_{GS}) \mid U_{DS} = \text{常数} \quad (1-5)$$

N 沟道增强型 MOS 场效应管典型的转移特性如图 1-10(a) 所示。 U_{DS} 为某一常数如 10V 时, 当 U_{GS} 小于 U_T (约 2V) 之前无沟道, I_D 近似为 0, $U_{GS} > 2V$ 以后出现沟道, 漏极电流才明显增大。

(2) 输出特性: 当 U_{GS} 为某一定值时, I_D 与 U_{DS} 之间的关系被定义为输出特性, 即

$$I_D = f(U_{DS}) \mid U_{GS} = \text{常数} \quad (1-6)$$

如图 1-10 (b) 所示, 为 N 沟道增强型 MOS 管的输出特性曲线。其输出特性曲线形状和三

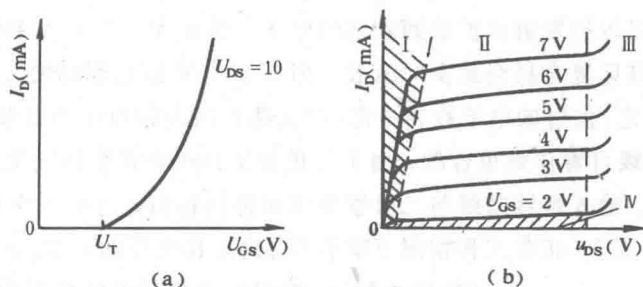


图 1-10 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线

(a) 转移特性; (b) 输出特性

极管相类似。下面分析其中一条曲线。如在栅源电压 $U_{GS}=5V$ 作用下, MOS 管形成一定深度的沟道, 当 U_{DS} 由零开始增大时, 会产生一个线性增大的漏极电流 I_D , 这是曲线的起始部分。由于 U_{DS} 的作用 (此时 U_{DS} 还较小) 沿着源极——沟道——漏极将有一个横向电位梯度存在, 源极电位为零, 沿途电位逐渐上升, 漏极电位最高。同时在 U_{GS} 的作用下, 将使沟道各处宽度不一, 越靠近漏极沟道越窄, 形成一个楔形, 如图 1-11 所示, U_{DS} 越增大漏极附近的沟道越窄, 于是 I_D 增长变缓, 出现了曲线的弯曲部分, 当 U_{DS} 增大至一定程度时, 漏极那

端的沟道消失——夹断, 电流 I_D 达到最大值, 以后 U_{DS} 再增大 I_D 也几乎不增加。这是由于夹断后, 电压 U_{DS} 的一部分加在源极与夹断处, 另一部分加在夹断区上, 前者的电压降基本上与夹断前相同, I_D 基本不变, 后者用来产生强电场将电子强行拉过夹断区形成漏极电流。当 U_{DS} 继续增大、大到一定值后, 夹断区上加的电压太高, 电场太强, 导致管子击穿, MOS 管进入击穿区, 这跟二极管的反向击穿类似, 漏极电流迅速上升, 这时极易损坏器件。MOS 管的工作电压不允许到达这么大。

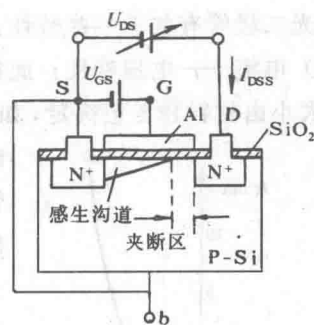


图 1-11 增强型 NMOS 管的工作原理

MOS 管的输出特性可分成四个区域：①可变电阻

区, 见图 1-10 (b) 中的 I 区, 此区中不同的 U_{GS} 会形成不同深度的沟道, U_{GS} 越大沟道就越深, 管子的内阻越小, 表现为曲线上升的斜率越大, 所以 MOS 管可看成一个受 U_{GS} 控制的可变电阻, 故称可变电阻区; ②线性区。图中的 II 区。此区内 I_D 受 U_{GS} 控制, 与 U_{DS} 几乎无关, 特性曲线趋于水平。 $\Delta U_{DS}/\Delta I_D$ 极大, 说明 MOS 管输出的动态电阻极大。这些特性与三极管的输出特性的线性区相似, 故也称线性区; ③击穿区。当 U_{DS} 超过某值时, 夹断区受过高电压形成的电场作用将产生雪崩击穿, I_D 迅速上升, 这就是击穿区 III 区的特性。MOS 管不允许工作于击穿区, 因为该区很容易造成管子的永久损坏; ④截止区, 图中的 IV 区, 此区内 $U_{GS} < U_T$ 管子无沟道, 不导通。如图 1-10 (b) 所示。

第二节 光 电 子 器 件

光电子器件是一类把光能转换成电能和把电能转换成光能的电子器件。在电子技术中, 光电子器件是一类很有发展前途的器件。它们在光通讯、检测技术、计算机技术和工业控制系统中有着重要的用途。

一、发光二极管

把电能转换成光能的器件可分为非相干光器件 (如发光二极管)、相干光器件 (如半导体激光器) 等。

发光二极管又称作注入式或电致发光器件, 简称 LED (Light Emitting Diode 的缩写)。它们的发光是利用半导体 PN 结中少数载流子流入而产生的。发光的光谱为可见光、红外光和紫外光, 光谱很窄、颜色纯正。其发光的光谱由所用材料和加工工艺决定。发光二极管的内部结构与普通二极管相似, 由一个 PN 结构成。PN 结在正偏压作用下, 使靠近结区附近的少数载流子浓度升高, 过量的少数载流子因浓度梯度的变化向纵深扩散, 并与那里的多数载流子复合, 由复合而产生光辐射。正偏压的作用在于降低 PN 结的内电场强度, 促进电子与空穴分别向 P 区和 N 区扩散, 以增加复合的机会。所以复合发出的光在结区附近。应当指出: 不是所有的 PN 结加正向电压都可以发光的。因为复合时既可能产生辐射复合, 也可能产生非辐射复合, 某些化合物如砷化镓等构成的二极管就可以产生辐射复合而发光, 普通的硅、锗材料做成的二极管属于非辐射复合而不可能发光。

发光二极管有如下一些特性:

(1) 电流——电压特性: 此特性与普通二极管的伏安特性相似, 正向有一个阈值电压 U_t , 其大小由材料和工艺决定, 如砷化镓发光二极管 U_t 约为 1V, 磷化镓(红色)则为 1.8V,

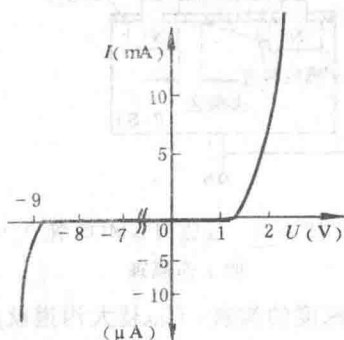


图 1-12 发光二极管的
电流——电压特性

磷化镓(绿色)约 2V。外加正向电压低于 U_t 之前, 发光二极管流过的电流极小, 可认为电流为零, 也不发光。外加电压超过 U_t 则电流急骤上升, 特性曲线很陡, 并且发出单色光。由图 1-12 所示的特性曲线可见, 发光二极管是一种电流控制元件。它的反向击穿电压较低, 约 10~25V, 因器件通常工作在正向状态, 故对反向击穿电压要求不严。

(2) 发光亮度与电流的关系特性: 发光亮度 B 正比于输入功率 P 和发光的流明效率 η , 即 $B \propto P\eta$ 。由于功率 P 等于电流乘电压, 而 $U=U_t$ 几乎为一常数, 当材料及工艺确定后 η 也是一个常数, 故亮度正比于电流。

(3) 响应时间: 在要求快速显示时, 这个参数很重要, 它是 LED 启亮和熄灭时间之和。启亮时间相对较长, 而启亮时间决定于 PN 结电容充电时间, 充电时间又与导通时的电流大小有关, 电流越大则启亮时间越短。熄灭时间与电流几乎无关, 而且时间极短(约 10ns 级)。所以要缩短响应时间就应加大导通电流。

(4) 寿命: LED 的寿命一般较长, 电流密度在 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 以下, 寿命可达 10^6h 以上。但应注意发光亮度随工作时间加长而减弱, 这种亮度减弱就是发光二极管的老化现象。电流密度越大, 老化也越快。

发光二极管的优点很多:

- 1) 工作电压低, 工作电流小, 功耗小。在室内亮度适中。
- 2) 能通过电流对亮度进行快速调节, 因而可对信息进行传输。
- 3) 容易与集成电路配合组成各种显示器件。
- 4) 与普通光源比, 光谱窄, 即颜色纯正。
- 5) 发光效率高、体积小、重量轻、寿命长。

但是发光二极管也有不足之处:

- 1) 用发光二极管阵列作大面积显示比较困难, 如作图形显示时需多块拼装, 每一发光二极管单元所占面积较大, 使得图形分辨率较低。
- 2) 发光的余辉短, 故在大面积扫描显示时显得亮度不够。在室外阳光下更差。
- 3) 发光的光谱段少, 或者说发光的颜色种类少。尤其以发蓝、紫光的元件制造困难。

发光二极管主要用来进行信息的显示及传输。如用作各种仪器、仪表的显示, 与光电管结合组成光电耦合器, 用作集成光学器件中的光源以及自动控制系统中的光源等。

二、光电器件

根据光—电变换原理, 把光能变换成电能的器件可分为三类, 它们是以光电子发射效应、光导效应和光生伏特效应(简称光伏效应)为依据制成的。

1. 光敏电阻

光敏电阻是利用光导效应制成的。某些半导体物质，如硫化物、卤化物等在黑暗环境中电阻值很高，光照时，光量子激发这些晶体物质中的电子，使它们挣脱共价键的束缚变成自由电子，从而使电阻值下降。其阻值的大小在一定程度上与光的强度（以下简称光强）成反比例。光敏电阻属于体型结构，因此制造简单，使用也很方便。

光敏电阻有如下一些基本特性：

(1) 光电流：不受光照时的电阻称“暗电阻”，加上规定的测试电压 U 后，流过的电流称“暗电流”。受一定量的光照后电阻值变小，此时电阻称“亮电阻”。若仍加原测试电压 U 和等量的光照，流过的电流称“亮电流”。亮电流与暗电流之差称“光电流”。我们希望光电流越大越好。

(2) 伏安特性：伏安特性基本上是线性的。伏安特性曲线还与光强有关，光强越大伏安特性的斜率越大。

(3) 光照特性：光敏电阻在外加电压保持不变的条件下，光电流 I 与光通量 F 之间的关系称光照特性。该特性用电光灵敏度 γ 表示， $\gamma = dI/dF$ 。光照特性是一条非线性曲线，故光敏电阻不宜作线性检测。

(4) 光谱特性：光谱特性表征光敏电阻对不同波长的光，其光电灵敏度不一样。光谱特性决定于光敏电阻制造的材料和工艺。如图 1-13 所示，图中有三条光谱特性曲线，如对

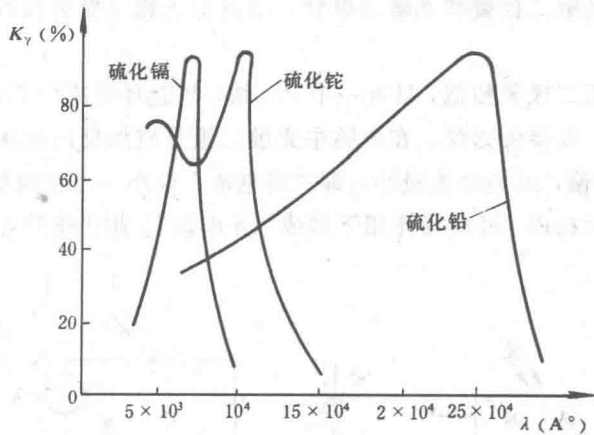


图 1-13 光敏电阻的光谱特性

硫化镉，光谱特性的敏感峰值波长在可见光区，而硫化铅的敏感峰值波长在红外区。因此选用不同材料制造的光敏电阻时，应考虑被检测光源的波长。

(5) 频率特性：它表征光电流随光强变化而变化的特性。由图 1-14 可见，硫化铅比硫化铊的频率特性好。

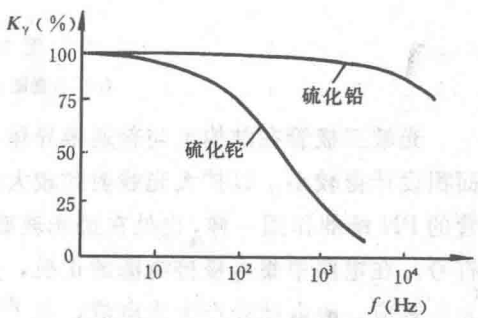


图 1-14 光敏电阻的频率特性

光敏电阻的部分型号及基本参数如表 1-2。