

普通高等教育“十二五”规划教材

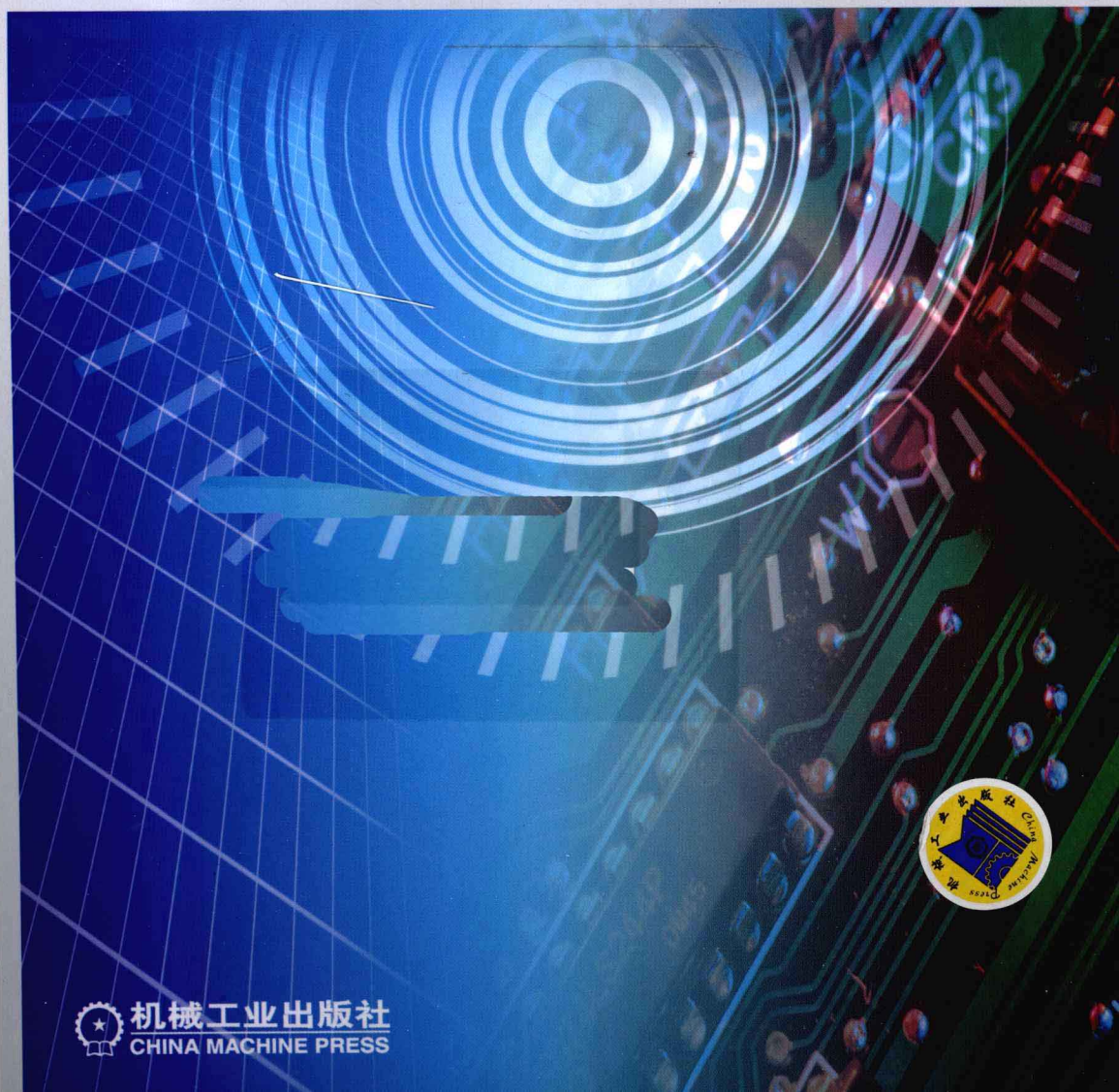
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI

电工电子技术

DIANGONG DIANZI JISHU

下册

韩华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子技术

下册

主 编 韩 华
副主编 王树臣 宋国义
参 编 张 良 姜德晶
主 审 张玉峰



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是作者参照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制订的“电工技术”、“电子技术”课程的教学基本要求,结合了教学型综合性大学实际情况和多年教学经验及教学改革成果编写而成的。本套教材特色是删去了部分陈旧内容,重新编排了章节顺序和精选了例题、习题,并降低了难度,加强了理论和实际应用的结合,还对电路仿真和单片机硬件电路做了抛砖引玉的介绍,扩大了学生视野及与后续课程的联系。全书分上、下两册,本册为下册,主要内容有:常用半导体器件、放大电路的组成与分析方法、放大电路的应用、集成运算放大器及应用、电子电路中的反馈、直流稳压电源、数字电路基础、组合逻辑电路与时序逻辑电路、存储器与可编程逻辑器件、单片机硬件系统。本书可作为普通高等院校工科非电类本科专业学生电子技术课程的教材,亦可供相关专业和领域的工程技术人员学习参考。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术.下册/韩华主编. —北京:机械工业出版社,
2011.8

ISBN 978 - 7 - 111 - 34142 - 0

I. ①电… II. ①韩… III. ①电工技术 - 高等学校 - 教材
②电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. ① TM② TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 088446 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王小东

版式设计:霍永明 责任校对:陈秀丽

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·10 印张·245 千字

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 34142 - 0

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

目 录

前言

第 11 章 常用半导体器件	1
11.1 半导体的导电特性	1
11.1.1 本征半导体	1
11.1.2 P 型半导体和 N 型半导体	2
11.2 二极管与稳压管	3
11.2.1 PN 结	3
11.2.2 二极管	3
11.2.3 稳压二极管	6
11.3 晶体管	8
11.3.1 晶体管的结构	8
11.3.2 晶体管电流放大原理	8
11.3.3 特性曲线及主要参数	9
11.4 场效应晶体管	11
11.4.1 绝缘栅场效应晶体管	11
11.4.2 场效应晶体管主要参数	13
11.5 光电器件	14
11.5.1 发光二极管	14
11.5.2 光敏二极管	14
11.5.3 光敏晶体管	15
11.5.4 光耦合器	15
本章小结	16
习题 11	17
第 12 章 放大电路的组成与分析	
方法	19
12.1 共发射极放大电路	19
12.1.1 共发射极放大电路的组成	19
12.1.2 共发射极放大电路的工作	
原理	19
12.2 放大电路的静态分析	20
12.2.1 估算法	20
12.2.2 图解法	20
12.3 放大电路的动态分析	21
12.3.1 微变等效电路法	21
12.3.2 图解法	24
12.4 多级放大电路	26
12.4.1 多级放大电路的耦合方式	26

12.4.2 阻容耦合多级放大电路的	
分析	27
本章小结	28
习题 12	29
第 13 章 放大电路的应用	30
13.1 分压式放大电路	30
13.1.1 静态工作点稳定的必要性	30
13.1.2 分压式放大电路原理及应用	30
13.2 射极输出器	33
13.2.1 电路的组成	33
13.2.2 静态分析	34
13.2.3 动态分析	34
13.3 差分放大电路	36
13.3.1 基本差分放大电路	36
13.3.2 典型差分放大电路	38
13.4 功率放大电路	40
13.4.1 功率放大电路的基本要求及	
分类	40
13.4.2 互补对称功率放大电路	41
13.4.3 集成功率放大电路	42
13.5 场效应晶体管放大电路	43
本章小结	44
习题 13	45
第 14 章 集成运算放大器及应用	47
14.1 集成运算放大器概述	47
14.1.1 集成运算放大器的结构特点	47
14.1.2 理想运算放大器	49
14.2 集成运算放大器的应用	50
14.2.1 信号运算电路	50
14.2.2 信号处理电路	53
14.3 集成运算放大器的选择和使用	57
14.3.1 集成运放的选择	57
14.3.2 消除自激振荡	57
14.3.3 调零电路调试	57
14.3.4 运算放大器的保护	57
本章小结	58
习题 14	58

第 15 章 电子电路中的反馈	62	17.4.1 RS 触发器	97
15.1 放大电路中的反馈	62	17.4.2 JK 触发器	98
15.1.1 反馈的基本概念	62	17.4.3 维持阻塞结构 D 触发器	99
15.1.2 反馈的 4 种基本组态	63	17.4.4 触发器逻辑功能转换	100
15.1.3 负反馈对放大电路性能的影响	65	17.5 脉冲单元电路	101
15.2 振荡电路中的正反馈	68	17.5.1 555 定时器	101
15.2.1 自激振荡	68	17.5.2 单稳态触发器	102
15.2.2 正弦波振荡器	69	17.5.3 多谐振荡器	103
本章小结	70	本章小结	103
习题 15	70	习题 17	104
第 16 章 直流稳压电源	72	第 18 章 组合逻辑电路与时序逻辑电路	106
16.1 直流稳压电源概述	72	18.1 组合逻辑电路	106
16.2 整流电路	73	18.1.1 组合逻辑电路的分析与综合方法	106
16.2.1 单相半波整流电路	73	18.1.2 加法器	108
16.2.2 单相桥式整流电路	74	18.1.3 编码器	110
16.3 滤波电路	76	18.1.4 译码器和数字显示	112
16.3.1 电容滤波电路	76	18.2 时序逻辑电路	114
16.3.2 电感滤波电路	77	18.2.1 寄存器	115
16.3.3 复式滤波电路	78	18.2.2 计数器	116
16.4 直流稳压电路	78	18.2.3 时序逻辑电路的分析	120
16.4.1 稳压二极管稳压电路	78	本章小结	121
16.4.2 串联型稳压电路	79	习题 18	122
16.4.3 集成稳压电路	80	第 19 章 存储器与可编程逻辑器件	124
本章小结	81	19.1 存储器	124
习题 16	82	19.1.1 随机存储器	124
第 17 章 数字电路基础	84	19.1.2 只读存储器	125
17.1 数制与编码	84	19.2 可编程逻辑器件	129
17.1.1 数制	84	19.2.1 PLD 的结构框图	129
17.1.2 编码	85	19.2.2 可编程阵列逻辑	130
17.2 逻辑函数	86	19.2.3 通用阵列逻辑	130
17.2.1 逻辑代数及运算法则	86	19.2.4 PLD 的分类与特点	131
17.2.2 逻辑函数的表示方法	87	19.2.5 可编程逻辑器件开发简介	132
17.2.3 逻辑函数化简	89	本章小结	135
17.3 门电路	91	习题 19	135
17.3.1 门电路的基本概念	91	第 20 章 单片机硬件系统简介	137
17.3.2 分立元件的门电路及组合	91	20.1 单片机概述	137
17.3.3 TTL 门电路	93	20.2 单片机及硬件系统组成	137
17.3.4 TTL 三态输出及集电极开路与非门	94	20.2.1 80C51 内部结构	137
17.3.5 MOS 门电路	95	20.2.2 80C51 外部引脚及功能	138
17.4 触发器	97	20.2.3 单片机外围电路	139

20.3 单片机接口电路简介	140	本章小结	144
20.3.1 MCS-51 的程序存储器的扩展	140	习题 20	145
20.3.2 MCS-51 数据存储器扩展	140	附录	146
20.3.3 MCS-51 的 I/O 接口扩展	142	附录 A 部分习题参考答案	146
20.3.4 MCS-51 与 ADC 器件接口	143	附录 B 常用半导体器件及集成运放 参数	150
20.4 单片机应用系统硬件电路组成	143	附录 C 常用数字集成芯片名称和外 引线排列	152
20.4.1 单片机实现数字钟硬件系统	143	参考文献	153
20.4.2 单片机实现温度测量与控制 硬件系统	144		

第 11 章 常用半导体器件

内容提要：介绍半导体的基本知识和 PN 结的形成及其特性；讨论二极管、晶体管、场效应晶体管的物理结构、工作原理、伏安特性、主要参数及其等效电路；对稳压二极管、发光二极管、光敏二极管、光敏晶体管的特性及应用作了一般介绍。

11.1 半导体的导电特性

11.1.1 本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质称为半导体，例如硅、锗、硒以及某些金属氧化物和硫化物都是半导体。半导体导电有许多特性，比如受环境温度影响，称为热敏性；受光照影响，称为光敏性；此外还有压力敏感性、磁场敏感性等。常用的半导体是硅或锗材料，通过一定的工艺过程将半导体提纯，得到完全纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。只有了解半导体的微观组成结构，才能理解半导体的导电机理和特性。以硅或锗为例，它们的原子结构示意图如图 11-1 所示，其中，最外层电子都有 4 个。

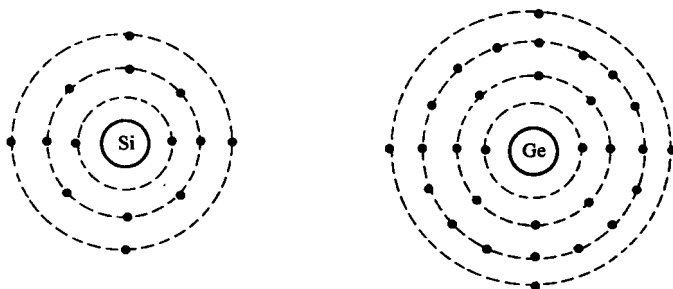


图 11-1 硅和锗的原子结构示意图

形成晶体后（本征半导体），每个原子与其相邻的 4 个原子形成共价键结构，共有一对价电子，如图 11-2 所示。形成共价键后，每个原子的最外层电子都是 8 个，成为稳定结构。共价键中的两个价电子被束缚在共价键中，常温下很少脱离共价键成为自由电子，因此本征半导体中的自由电子很少，本征半导体的导电能力很弱。

当温度升高时，共价键中的电子也可以挣脱共价键的束缚，成为自由电子。在共价键中的电子成为自由电子后，共价键中就产生一个空位，称为空穴，如图 11-3 所示。自由电子的移出，也可以认为是空穴的移入。因此，在半导体理论中，空穴被看成是带正电粒子，与自由电子一样也可以移动，自由电子和空穴都称为载流子。因此，半导体存在两种导电方式即电子导电和空穴导电。半导体的导电方式与金属不同，金属只有自由电子导电。

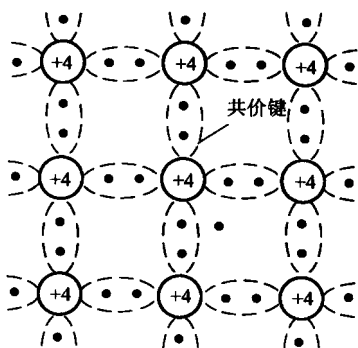


图 11-2 本征半导体的共价键结构

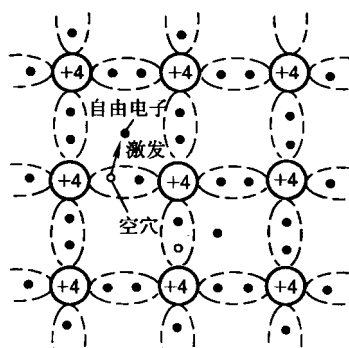


图 11-3 自由电子与空穴的形成

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，而且温度愈高，形成的载流子数目愈多，导电能力就愈强，即半导体导电具有热敏性。同理可以理解半导体的光敏等特性，详细研究请参阅有关资料。

11.1.2 P 型半导体和 N 型半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素（如磷、锑、硼、铟等），会使半导体中的载流子数量大大增加，使半导体的导电能力明显增强，该类半导体称为杂质半导体。

掺入五价元素的杂质半导体称为 N 型半导体。如在硅或锗的晶体中掺入少量磷元素，硅或锗的某些原子被磷的原子取代，由于磷原子最外层有 5 个价电子，其中的 4 个与相邻的硅或锗原子的 4 个价电子形成共价键，磷原子多余的一个价电子比较容易脱离原子核的束缚，而成为自由电子，这种半导体导电主要靠自由电子进行，即多数载流子为自由电子。硅晶体中掺入磷元素形成的 N 型半导体结构如图 11-4 所示。

掺入三价元素的杂质半导体称为 P 型半导体。可在硅或锗的晶体中掺入硼元素，与 N 型半导体形成相反，晶体在形成共价键时，硼原子周围会缺少一个电子，电子容易跑出而产生空穴，多数载流子为空穴，导电主要靠空穴进行，P 型半导体结构形成如图 11-5 所示。

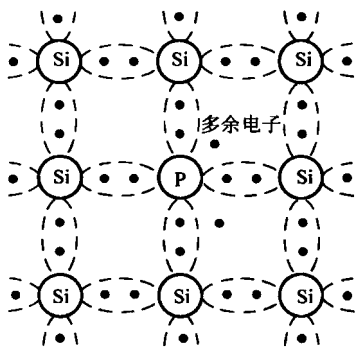


图 11-4 硅晶体中掺入磷元素

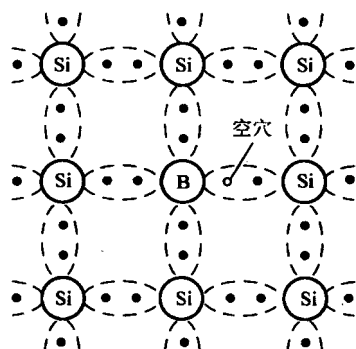


图 11-5 硅晶体中掺入硼元素

11.2 二极管与稳压管

11.2.1 PN 结

1. PN 结的形成

采用不同的掺杂工艺，将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅晶片上，在它们的交界面上就形成 PN 结。形成过程如图 11-6a 所示，由于 P 区空穴的浓度大而 N 区自由电子的浓度大，故 P 区的空穴向 N 区扩散，而 N 区的自由电子向 P 区扩散，称为多数载流子的扩散运动（用实线箭头表示扩散方向），扩散的结果使两端的多数载流子进行复合，而剩余的离子在交界面附近形成空间电荷区，称为内电场，内电场的方向由 N 指向 P，如图 11-6b 所示。扩散运动的同时还存在着漂移运动，由于内电场的作用，P 区的少量电子会运动到 N 区，而 N 区的少量空穴也会运动到 P 区，称为漂移运动（用虚线箭头表示漂移方向）。内电场形成后会阻碍多数载流子的扩散运动，使少数载流子的漂移运动增强，扩散和漂移最终达到动态平衡。

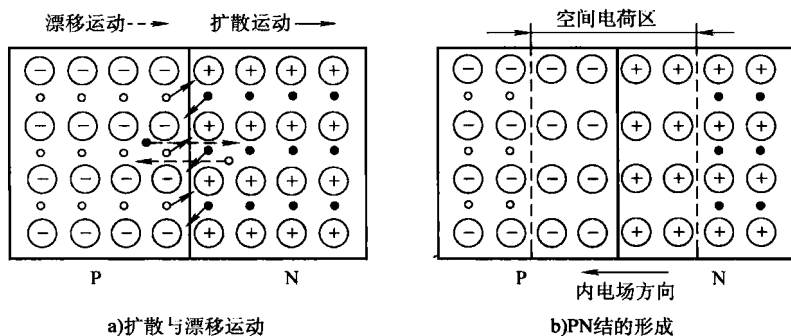


图 11-6 PN 结的形成示意图

2. PN 结的单向导电性

如图 11-7 所示，PN 结的 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称 PN 结为正向偏置。由于外电场与内电场方向相反，内电场被削弱，因此多数载流子的扩散运动增强，形成较大的正向电流，这称为 PN 结正向导通。如图 11-8 所示，PN 结的 N 区接电源正极，P 区接电源负极，称 PN 结为反向偏置。由于外电场与内电场方向相同，内电场被增强，只有漂移运动形成的反向电流，这称为 PN 结反向截止。

PN 结正向偏置导通电流较大，电阻很小；反向偏置截止电流很小、电阻很大的性质称为 PN 结的单向导电性。

11.2.2 二极管

1. 二极管的基本结构

二极管的几种封装外形图如图 11-9 所示，二极管内部是一个 PN 结，其 P 端引线为阳极

(正极), N 端引线为阴极 (负极)。二极管的电路结构及符号如图 11-10 所示。二极管的结构有三种类型: 点接触型, 用于小功率检波; 面接触型, 用于低频中功率整流; 平面型, 用于低频大功率整流。

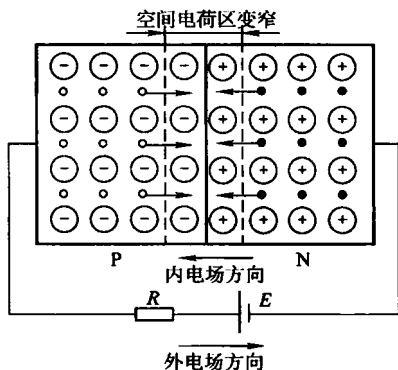


图 11-7 PN 结加正向电压

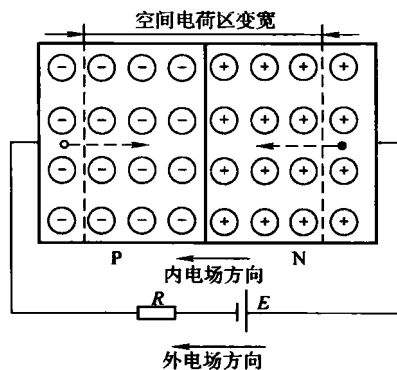


图 11-8 PN 结加反向电压

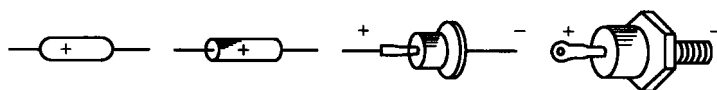


图 11-9 二极管的几种封装外形图

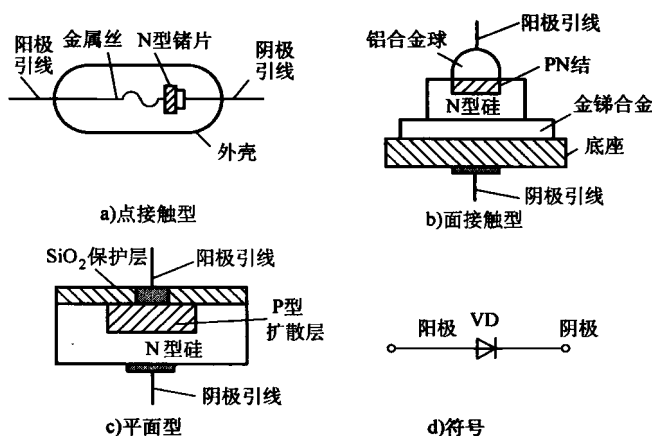


图 11-10 二极管的电路结构及符号

2. 二极管的伏-安特性曲线

二极管的正向伏-安特性测试电路如图 11-11 所示, 设电源电动势 E 足够大, 电阻 R_p 较大, 逐渐减小电阻 R_p , 调节电流大小测出二极管两端电压和电流, 可得二极管正向特性曲线。二极管的伏-安特性曲线如图 11-12 所示, $U_D > 0$ 时为正向特性, U_{on} 称为开启电压或死区电压, 当 $U_D < U_{on}$ 时, 这时外电场较小, 还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 故正向电流很小。当 $U_D > U_{on}$ 时, 内电场被削弱, 正向电流增长很快。死区电压 U_{on} 的大小与半导体结构、材料和温度有关, 一般硅二极管约为 $0.5V$, 锗二极管约为 $0.1V$ 。

在图 11-11 所示电路中, 将电源 E 反向, 使二极管反向偏置, 调节 R_p 测出二极管两端电压和电流, 得到二极管反向特性曲线。在图 11-12 中, $U_D < 0$ 为反向特性, U_{BR} 称为反向击穿电压。当反向电压不超过 U_{BR} 时, 反向电流 I_R 很小, 而且基本不随反向电压变化, 又称为反向饱和电流。当反向电压超过 U_{BR} 时, 反向电流突然增大很多, 进入击穿区, 二极管被反向击穿。

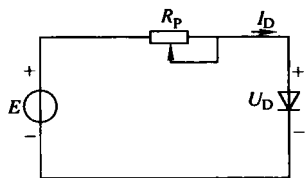


图 11-11 二极管正向伏-安特性测试电路

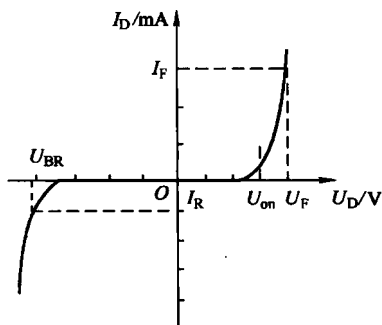


图 11-12 二极管伏-安特性曲线

3. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F 指在规定的散热条件下和电阻负载时, 二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。

(2) 反向工作峰值电压 U_{RM} 指二极管长期工作时允许外加的最大反向电压, 一般取 $(1/2 \sim 2/3)U_{BR}$ 。

(3) 反向峰值电流 I_{RM} 指二极管未被击穿时的反向电流值。反向电流大, 说明二极管的单向导电性能差。另外, 此电流受温度影响大。

(4) 正向压降 U_F 指在规定的正向电流条件下, 二极管的正向电压降。硅二极管的正向压降 U_F 约为 $0.6 \sim 0.8V$ (大功率二极管为 $1 \sim 1.2V$), 锗二极管约为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

二极管的应用非常广泛, 利用其单向导电性可实现整流、限幅、钳位、隔离、检波和保护等功能。

例 11-1 如图 11-13a 所示电路中, 设 $u_i = \sin\omega tV$, VD_1 和 VD_2 为硅管, 其正向压降 $U_F = 0.7V$ 。试画出 u_o 的波形。

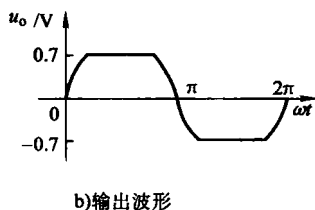
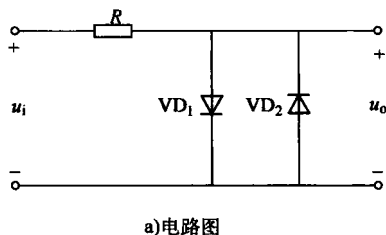


图 11-13 例 11-1 的电路图

解 在 u_i 的正半周内, VD_2 截止, 当 $u_i < 0.7V$ 时, VD_1 截止, $u_o = u_i$; 当 $u_i > 0.7V$ 时, VD_1 导通, $u_o = u_D = 0.7V$ 。

在 u_i 的负半周内, VD_1 截止, 当 $u_i > -0.7V$ 时, VD_2 截止, $u_o = u_i$; 当 $u_i < -0.7V$

时, VD_2 导通, $u_o = u_D = -0.7V$ 。

u_o 的波形如图 11-13b 所示。二极管起到了限幅作用, 将输出电压的大小限制在 $\pm 0.7V$ 的范围内。

例 11-2 在图 11-14 中, 输入端 A 点的电位 $V_A = +5V$, B 点的电位 $V_B = 0V$, 电阻 R 端电位 $V_R = -12V$ 。求输出端 C 点的电位 V_C 。

解 因为 A 端电位比 B 端电位高, 所以 VD_A 先导通。如果二极管的正向压降是 $0.7V$, 则 $V_C = +4.3V$ 。当 VD_A 导通后, VD_B 上加的是反向电压, 因而截止。 VD_A 在电路中起钳位作用, 把 C 端的点钳位在 $+4.3V$; VD_B 在电路中起隔离作用, 把输入端 B 和输出端 C 隔离。

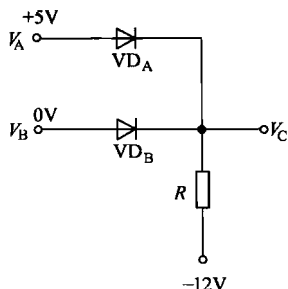


图 11-14 例 11-2 的电路图

11.2.3 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的二极管, 工作在反向击穿区有稳压作用。其符号如图 11-15a 所示, 伏安特性如图 11-15b 所示。

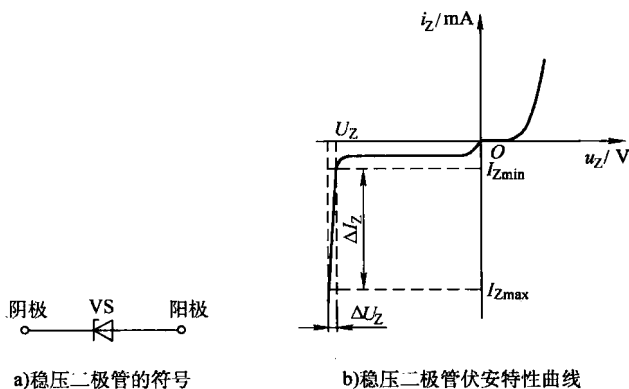


图 11-15 稳压二极管的符号及伏-安特性曲线

稳压二极管的伏-安特性曲线, 其正向特性与普通二极管相同, 但反向特性不同于普通二极管。在反向击穿后, 反向电流在一个较大的范围内变化时, 稳压二极管两端的端电压变化很小, 稳压二极管即利用这一特性在电路中起稳压作用。另外, 稳压二极管的反向击穿是可逆的 (二极管的反向击穿是不可逆的), 即当所加反向电压小于击穿电压时, 稳压二极管又恢复到截止状态。

稳压二极管的主要参数有

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压是指稳压二极管反向击穿后, 通过稳压二极管的电流为规定范围内, 稳压二极管两端的电压值。对于硅稳压二极管, U_Z 一般在几伏至几十伏。

2. 稳定电流 I_Z

稳定电流是指稳压二极管反向击穿后, 能正常起稳压作用时通过稳压二极管的规定电流值。 I_Z 的合适范围在最小值 I_{Zmin} 和最大值 I_{Zmax} 之间, I_Z 小于 I_{Zmin} 时稳压二极管不起稳压作

用, 大于 $I_{Z\max}$ 时可能由于发热而损坏。对于硅稳压二极管, $I_{Z\min}$ 一般为几毫安, $I_{Z\max}$ 一般为几毫安至几十毫安。

3. 动态电阻 r_z

在稳压二极管的稳压范围内, 稳压二极管电压变化量与相应的电流变化量之比称为动态电阻 r_z , 即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (11-1)$$

动态电阻 r_z 越小, 说明反向击穿特性越陡, 稳压特性越好。理想情况下 $r_z = 0$ 。

4. 最大耗散功率 P_{ZM} 和最大工作电流 I_{ZM}

稳压管的最大耗散功率为

$$P_{ZM} = U_Z I_{ZM} \quad (11-2)$$

稳压管的实际功耗大于 P_{ZM} 时, 管子将因结温升高而损坏。使用时, 因稳压值一定, 所以应限制管子的工作电流不超过最大工作电流 I_{ZM} (或记作 $I_{Z\max}$)。

由稳压二极管构成的稳压电路如图 11-16 所示, 由稳压二极管 VS 和限流电阻 R 组成。当输入直流电压 U_i 波动或负载电阻 R_L 值变化时, 只要稳压二极管的工作电流 I_z 在 $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$ 范围内, 稳压二极管两端的电压 U_z 不变 (理想情况下), 因此负载两端的电压 $U_L = U_z$ 不变。限流电阻 R_z 的数值要适当, 其作用是使稳压二极管的电流不超过上限值 $I_{Z\max}$ 。因为这种稳压电路是负载电阻与稳压二极管并联, 所以又称为并联稳压电路。

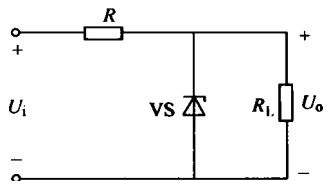


图 11-16 稳压二极管稳压电路

例 11-3 在图 11-16 所示电路中, 已知稳压管的稳定电压 $U_z = 6V$, $R = 1k\Omega$, $R_L = 0.5k\Omega$, 稳定电流 $I_{Z\min} = 5mA$, 最大耗散功率 $P_{ZM} = 150mW$ 。(1) 计算 U_i 为 10V、25V 两种情况下输出电压 U_o ; (2) 若负载开路, U_i 为增加到 35V 会出现什么现象?

解 (1) 最大工作电流

$$I_{Z\max} = \frac{P_{ZM}}{U_z} = \frac{150mW}{6V} = 25mA$$

当 $U_i = 10V$ 时, 若稳压管能够稳压, 则 $U_o = U_z = 6V$, R 中的电流为 $\frac{U_i - U_z}{R} = \frac{(10 - 6)V}{1k\Omega} = 4mA$, 小于稳压管的稳定电流 $I_{Z\min}$, 因此稳压管未被击穿不能稳压, 处于反向截止状态, 则输出电压

$$U_o = \frac{R_L}{R + R_L} U_i = \frac{0.5}{1 + 0.5} \times 10V \approx 3.33V$$

当 $U_i = 25V$ 时, R 中的电流为 19mA, 而 R_L 中的电流为 $\frac{U_z}{R_L} = \frac{6V}{0.5k\Omega} = 12mA$, 流过稳压管的电流为 $(19 - 12)mA = 7mA$, 大于 $I_{Z\min}$ 而小于 $I_{Z\max}$, 稳压管工作在稳压状态, 则输出电压

$$U_o = U_z = 6V$$

(2) 若负载开路 当输入电压 U_i 为 35V, 稳压管被击穿, 此时稳压管的电流为

$$I_z = \frac{U_i - U_z}{R} = \frac{(35 - 6) \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 29 \text{ mA} > I_{z\text{max}}$$

稳压管会因长时间功耗过大而损坏。

11.3 晶体管

晶体管其外部有三个电极，内部有两个 PN 结。晶体管的几种常见封装外形图如图 11-17 所示。

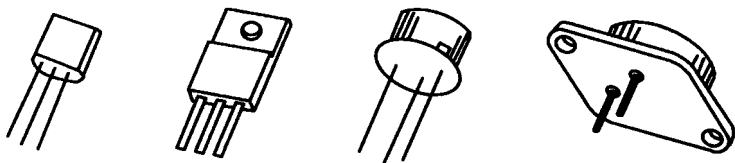


图 11-17 晶体管的几种常见封装外形图

11.3.1 晶体管的结构

晶体管是通过一定的工艺，在同一块本征半导体上掺杂，形成三个区，分别引出电极并封装而制成的电子元件，可制成 NPN 型和 PNP 型晶体两类三极管。三个区分别叫发射区、基区和集电区。位于中间的区称为基区，它做得很薄，一般只有几微米，掺杂浓度最低；发射区掺杂浓度最高；集电区掺杂浓度较高，但面积较大。相邻两区会形成一个 PN 结，靠近发射区的叫发射结，靠近集电区的叫集电结。三个区引出的电极分别叫发射极（e）、基极（b）和集电极（c），如图 11-18a 所示为 NPN 型管的结构，11-18b 所示为 PNP 型管的结构，图 11-18c 所示为 NPN 型管和 PNP 型管的图形符号。

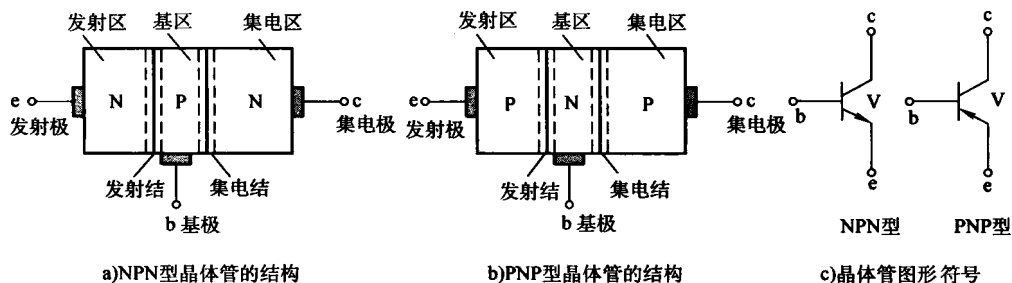


图 11-18 晶体管的结构及符号

11.3.2 晶体管电流放大原理

晶体管在特定电路中具有电流放大作用，即集电极电流是基极电流很多倍，其原理可用图 11-19 解释。

如图 11-19 所示, 将基极电源 V_{BB} 、基极电阻 R_B 和晶体管发射结 (B、E 极之间) 组成的回路称为输入回路, 将集电极电源 V_{CC} 、集电极电阻 R_C 和晶体管集电极—发射极 (C、E 极之间) 组成的回路称为输出回路。发射结是正向偏置, 即基极电位高于发射极电位; 集电结是反向偏置, 即集电极电位高于基极电位。因为发射结是正向偏置, 使发射区的大量电子越过发射结扩散到基区, 形成发射极电流 I_E 。由于基区在制造时就做得很薄, 而且掺杂浓度低, 空穴数目少, 从发射区扩散到基区的电子只有一小部分与基区的空穴复合, 形成基极电流 I_B , 而大部分电子继续扩散, 进入集电结。因为集电结是反向偏置, 所以进入集电结的电子在集电结内电场的作用下将产生漂移运动, 越过集电结进入集电区, 形成集电极电流 I_C 。根据基尔霍夫电流定律, 晶体管三个电极的电流之间的关系是

$$I_B + I_C = I_E \quad (11-3)$$

通过实验可以测试各个电流的大小, 发现 I_C 比 I_B 大得多。调节电阻 R_B 使晶体管 B、E 之间的正向偏置电压 U_{BE} 发生改变, 将使发射区向基区扩散的电子数目发生改变。当 I_B 增大或减小时, I_C 也随之成比例地增大或减小。 I_C 与 I_B 之比称为晶体管的静态电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (11-4)$$

I_C 的变化量 ΔI_C 与 I_B 的变化量 ΔI_B 之比称为晶体管的动态电流放大系数

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (11-5)$$

β 与 $\bar{\beta}$ 都近似为常数, 而且 β 与 $\bar{\beta}$ 相差不大。在以后的分析与计算中不加区分, 只用一种符号, 称为晶体管的电流放大系数。

11.3.3 特性曲线及主要参数

1. 特性曲线

输入特性曲线描述了在输出回路的集电极与发射极电压 u_{CE} 一定的情况下, 基极电流 i_B 与发射结压降 u_{BE} 之间的函数关系, 输出特性曲线描述在输入回路的变量 i_B 一定的情况下, 集电极电流 i_C 与 u_{CE} 之间的函数关系。用图 11-20 所示电路可以通过实验的办法测量晶体管的特性曲线。在实验室中, 通常用一种专用仪器——晶体管图示仪来测量。

如图 11-20 所示, 在输入回路, 当集电结处于反向偏置状态 ($U_{CE} \geq 1V$) 时, 改变电阻 R_B 并测量 i_B 和 u_{BE} , 可获得输入特性曲线, 如图 11-21a 所示。可以看出, 它与二极管的正向特性曲线相似, 它也有一个死区电压 (硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管的死区电压约为

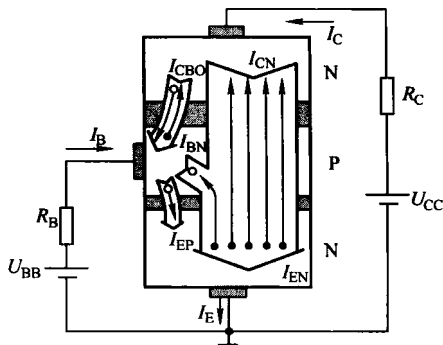


图 11-19 晶体管的电流放大作用示意图

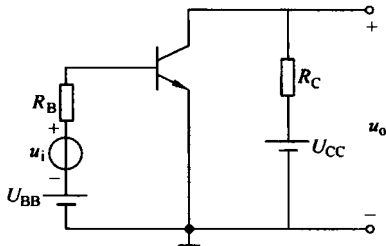


图 11-20 晶体管特性曲线测量电路

0.1V), 而且导通后 i_B 的变化范围较大, 而 u_{BE} 的变化范围较小 (硅管 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.7V$, 锗管 $U_{BE} = 0.2 \sim 0.3V$)。

若固定一个 I_B (例 $I_{B1} = 20\mu A$) 不变, 在输出回路中改变电源电压 V_{CC} , 从而改变集电极电流 i_C 和晶体管 C、E 之间的电压 u_{CE} , 测量 i_C 和 u_{CE} , 可获得一条输出特性曲线 (见图 11-21b 中对应于 $I_{B1} = 20\mu A$ 的曲线)。不同的 I_B 可得出不同的输出曲线, 所以晶体管输出特性曲线是一族曲线, 如图 11-21b 所示。同一型号的晶体管输入、输出特性曲线都不一样, 分散性很大。

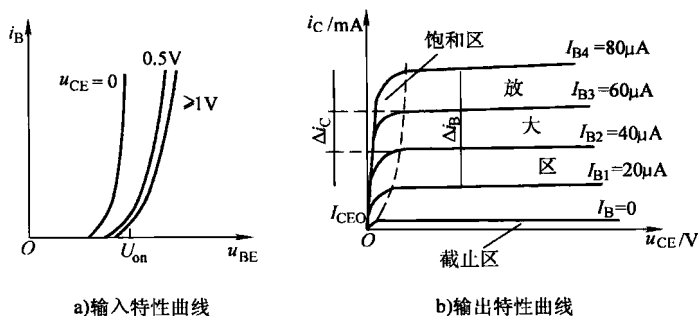


图 11-21 晶体管的输入、输出特性曲线

晶体管的工作状态有截止状态、放大状态和饱和状态三种, 分别对应于输出特性上的三个区域。

(1) 截止区 位于 $I_B = 0$ 的曲线下方, 此时 u_{BE} 小于开启电压 U_{on} 且集电结反偏, 对于共射电路 $u_{BE} \leq U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$ 。在截止区, $i_C \approx I_{CEO}$ 。 I_{CEO} 称为穿透电流, 小功率硅管的 I_{CEO} 在 $1\mu A$ 以下, 锗管的 I_{CEO} 小于几十微安。近似分析时常认为晶体管截止时的 $i_C \approx 0$ 。

(2) 饱和区 输出特性曲线水平部分以左的上升部分和弯曲部分的区域是饱和区。此时 U_{CE} 较小, 只有 0.3V 左右, 因此 $U_{CE} < U_{BE}$, 集电结也处于正向偏置状态。这时晶体管工作在饱和状态, 这时 I_C 与 I_B 不成比例, 此时的 I_C 称为集电极饱和电流 I_{CS} , 即

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} \approx \frac{U_{CC} - 0.3}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C} \quad (11-6)$$

(3) 放大区 晶体管输出特性曲线的饱和区和截止区之间的部分为放大区。在该区域发射结正向偏置且集电结反向偏置。对于共射电路 $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$ 。在放大区, i_C 几乎仅仅决定于 i_B , 而与 u_{CE} 无关, 表现出 i_B 对 i_C 的控制作用: $I_C = \beta I_B$, $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 。

用晶体管构成的放大电路, 晶体管需要工作在放大区; 用晶体管构成的开关电路中, 晶体管需要工作在截止区和饱和区。

2. 晶体管的主要参数

晶体管主要参数有

(1) 电流放大系数 β 一般指共发射极放大电路中晶体管的动态电流放大系数。同型号、同批量的晶体管 β 值都不相同, 分散性很大, 一般在 20 ~ 200 之间。 β 值并不是越大越好, 因为 β 值越大性能往往越不稳定, 一般选用 $\beta = 50 \sim 100$ 。

(2) 集电极—发射极反向漏电流 I_{CEO} 指共发射极放大电路中晶体管基极开路时的集电

极电流, 又称穿透电流。一般 I_{CEO} 越小越好。硅管的 I_{CEO} 为几微安。穿透电流受温度影响较大, 随温度升高而增大。锗材料晶体管的 I_{CEO} 比硅材料晶体管大很多, 且容易受温度变化的影响。

(3) 集电极最大允许电流 I_{CM} 集电极电流过大 β 会降低, 通常将 β 值下降到正常值的 $2/3$ 时的 I_{C} 称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。设计电路时不要使实际的 I_{C} 超过 I_{CM} 。

(4) 集电极—发射极击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ 当基极开路时, 加在集电极和发射极之间的最大电压称为集电极—发射极击穿电压 $U_{(\text{BR})}$ 。设计电路时要使集电极电源 $U_{\text{CC}} < U_{(\text{BR})\text{CEO}}$ 。

(5) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} P_{CM} 表示集电结上允许损耗功率的最大值, 一般 $P_{\text{CM}} \approx I_{\text{C}} U_{\text{CE}}$ 。 P_{CM} 受晶体管 PN 结温升的限制, 当硅管的结温大于 150°C 时, 锗管的结温大于 70°C 时, 管子性能均明显变坏甚至烧毁。

(6) 特征频率 f_{T} 晶体管的 PN 结存在结电容, 晶体管的电流放大系数 β 是信号频率的函数。 f_{T} 是指信号频率变化使电路中晶体管电流放大系数下降到 1 时的频率。

11.4 场效应晶体管

场效应晶体管 (Field-Effect Transistor, FET) 与上述双极型晶体管工作原理不同, 双极型晶体管是电流控制元件, 而场效应晶体管是电压控制元件, 利用输入回路的电场效应来控制输出回路的电流, 而且仅靠多数载流子导电, 因此又称为单极型晶体管。场效应晶体管的输入电阻极高、噪声低、热稳定性好, 广泛应用于各种电子电路中, 是大规模集成电路的基本组成元件。场效应晶体管可根据结构不同分为结型场效应晶体管和绝缘栅型场效应晶体管两大类。这里仅介绍应用更为广泛的绝缘栅型场效应晶体管 (Insulated Gate FET, IGFET)。

11.4.1 绝缘栅场效应晶体管

绝缘栅场效应晶体管也称金属—氧化物—半导体场效应晶体管, 即 MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 晶体管。它的栅极与源极、栅极与漏极之间均采用 SiO_2 绝缘层隔离, 输入电阻可达 $10^{10} \Omega$ 以上。MOS 晶体管分为增强型和耗尽型两种, 每种又有 N 沟道和 P 沟道之分。栅—源电压 u_{GS} 为零时漏极电流也为零的管子属于增强型管; 栅—源电压 u_{GS} 为零时漏极电流不为零的管子属于耗尽型管。因此 MOS 管有 4 种类型: N 沟道增强型、N 沟道耗尽型、P 沟道增强型和 P 沟道耗尽型。下面主要介绍 N 沟道增强型和耗尽型 MOS 晶体管。

1. N 沟道增强型 MOS 管

N 沟道增强型 MOS 管结构示意图如图 11-22a 所示。它以一块低掺杂 P 型硅片为衬底 B, 利用扩散工艺左右对称制作两个高掺杂的 N 型区, 并分别引出源极 s 和漏极 d, 在 P 型半导体之上制作一层 SiO_2 绝缘层, 再在 SiO_2 层镀上金属引出栅极 g。

P 沟道增强型 MOS 管则以 N 型硅片为衬底, 构成与 N 沟道的类似, 需要对称制作两个高掺杂的 P 型区引出源极和漏极, 栅极则在 N 衬底上加 SiO_2 绝缘层镀上金属引出, 两种增强型 MOS 管的符号如图 11-22b 所示。因为 N 沟道增强型 MOS 管两个 N 型区被 P 型衬底隔开, 当 $U_{\text{GS}} = 0$ 时, 若只在 D-S 极间加电压 U_{DS} , 其中有一个 PN 结必定处于反向偏置状态, 所以 D-S 极间并不能导通; 当 G-S 极间加正向电压, 且 $U_{\text{GS}} > U_{\text{GS(th)}}$ (开启电压) 时, P 型衬底中的较多电子被吸引到栅极下, 形成一条电子导电沟道 (也称反型层), 如果加上 U_{DS} ,