

线性电子电路

吴运昌 编

華南理工大學出版社



内 容 简 介

本书是参照《高等学校工程专科电子技术基础课程教学基本要求》，并根据高等教育自学考试电子类及电气类专业（专科）的《线性电子电路》、《电子技术基础（模拟部分）》课程的考试大纲，结合编者多年教学实践及编写同类型教材的经验编写的。

全书分为7章：半导体器件，基本放大电路及其分析方法，模拟集成电路，负反馈放大电路，模拟集成电路的应用，直流电源电路，波形发生电路。各章均有适量的例题，章末有小结，有较多的思考题与习题，其中计算题附有参考答案。本书内容简明扼要，物理概念清楚，语言简洁流畅，分析严谨，系统性强，便于自学。此外，另编配套的学习指导书。

本书既可作为高等教育自学考试的配套教材，亦可作为电子、通信、自动控制、计算机和电力等专业（专科）教材，还可以作为相应专业本科生及从事电子技术的工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

线性电子电路/吴运昌编. —广州：华南理工大学出版社，1999.3
ISBN 7-5623-1405-5

I. 线…

II. 吴…

III. 模拟电路

IV. TN01

华南理工大学出版社出版发行

（广州五山 邮编 510640）

责任编辑：傅穗文 詹志青

各地新华书店经销

广州市新光明印刷厂印装

*

1999年3月第1版 1999年3月第1次印刷

开本：787×1092 1/16 印张：17.25 字数：414千

印数：1—5000册

定价：25.50元

前 言

本书是参照《高等学校工程专科电子技术基础课程教学基本要求》和根据高等教育自学考试电子类及电气类专业（专科）的《线性电子电路》、《电子技术基础（模拟部分）》课程的考试大纲，结合编者多年教学实践及编写同类型教材的经验编写的。

考虑到高等学校工程专科的培养目标是重点造就面向基层、应用型的高等专门人才，本书编写力求贯彻“理论以必要够用为度，避免繁琐的公式推导；理论分析与工程实践相结合，重在工程应用”的原则。为此，在编写过程中采取了以下一些做法：

（1）加强线性电子电路的基本概念、基本电路、基本原理、基本分析方法、分立器件及集成组件的基本特性、基本应用方法和基本计算方法等重要基础知识及技能。

（2）从分立元件电路出发，着眼于集成化电路。适度压缩分立元件电路，加重集成组件及其应用电路。在讲述集成组件时，重点阐述其外部特性、使用方法及应用电路的分析方法和调试方法；对组件内电路仅作简单的定性分析。

（3）在压缩较陈旧内容的同时，增加了新电路、新集成组件及其应用方面的内容。

（4）在内容编排方面，由浅入深，循序渐进，从实际应用状况出发、从物理概念入手提出问题，引申到一定的理论分析，分析方法严谨，系统性强，便于自学。

（5）书中编入了较多的例题、思考题与习题，每一节内容均有从易到难的思考题和习题与之对应，其中计算题附有参考答案；同时，另编配套的学习指导书，有利于学生巩固和加深对基本知识的掌握。

本书既可作为高等教育自学考试的配套教材，亦可作为电子、通信、自动控制、计算机和电力等专业（专科）教材，还可以作为相应专业本科生的教学参考书。

在本书编写过程中，吴敏协助整理了部分书稿和描绘了部分图表。本书主审秦允阁副教授认真、仔细审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的建议和意见，在此表示衷心的感谢。

在拟定本书编写大纲及编写过程中，得到全国高等教育自学考试电工电子与信息类委员会委员、广东省自学考试委员会委员、广东省自学考试教材编写委员会委员陈振强副教授、华南理工大学电子与通信工程系副主任王定中副教授的悉心指导，得到模拟电子线路教研室主任陈相副教授及教研室其他同志的支持和帮助。在此谨向他们表示衷心的感谢。

书中不妥之处，尚盼读者指正。

编 者

1998年11月

本书常用符号

1. 电流和电压符号的规定〔以基极(B、b)电流为例〕

I_B 大写字母、大写下标,表示直流(或平均)量;

i_b 小写字母、小写下标,表示交流瞬时值;

i_B 小写字母、大写下标,表示含直流量的瞬时总值;

$I_b(I_b, I_{bm})$ 大写字母、小写下标,表示交流的有效值〔复数量、最大(幅度)值〕;

$\Delta i_B(\Delta I_B)$ 表示瞬时值(直流分量)的变化量。

2. 基本符号

(1) $A(\dot{A})$ 表示增益(复数增益)或放大倍数通用符号,带不同符号的下标代表不同物理意义的增益: A_v, A_i, A_r, A_g 分别为电压、电流、互阻、互导增益; $A_{vs}, A_{is}, A_{rs}, A_{gs}$ 分别为计及信号源内阻的源电压、源电流、源互阻、源互导增益; $A_{vso}, A_{iso}, A_{rso}, A_{gso}$ 分别为负载开路(下标“o”)和短路(下标“s”)时相应源增益; $A_{vf}(A_{vfs}), A_{if}(A_{ifs}), A_{rf}(A_{rfs}), A_{gf}(A_{gfs})$ 分别为负反馈大电路闭环增益(闭环源增益); A_{vm}, A_{vh}, A_{vl} 分别为中、高、低频区电压增益; A_{vo} 是运放开环增益; A_{vd}, A_{vc} 分别为差放差模、共模电压增益; A_{vds}, A_{vcs} 分别为差放单边差模、共模电压增益; A_{vdl}, A_{vel} 分别为差放单端输出差模、共模电压增益; $A(s)[H(s)]$ 是复频域增益。

A 表示截面积, PN 结面积; A 表示(基本)放大电路及集成运放。

(2) $B(b)$ 表示 BJT 的基极; $BW[BW_{(-3dB)}], BW_G, BW_P$ 分别为 -3dB 带宽、单位增益带宽、全功率带宽。

(3) $C(c)$ 表示 BJT 的集电极; C 表示电容,带不同符号的下标代表不同的电容: C_T, C_D, C_J 分别为势垒、扩散、结电容; $C_{b'e}, C_{b'c}$ 为 BJT 的结电容; C_{dg}, C_{gs}, C_{ds} 为 FET 的分布电容; C_i, C_o, C_L 分别为输入、输出、负载电容; C_b, C_e, C_s 分别为基极、射极、源极交流旁路电容; C_φ 为相位补偿电容; C_w 为分布电容。

(4) D 表示二极管, FET 漏极; D 表示非线性失真系数; D_z 表示稳压管; d 为脉冲占空系数(占空比)。

(5) $E(e)$ 表示发射极; E 表示能量, 电场强度。

(6) F 表示反馈网络; $\dot{F}(F)$ 为反馈系数通用符号,带不同符号的下标代表不同物理意义的反馈系数: $\dot{F}_v, \dot{F}_i, \dot{F}_r, \dot{F}_g$ 分别为电压、电流、互阻、互导反馈系数; f 为频率; f_L, f_H 分别为低频、高频截止(-3dB)频率(又称下限、上限频率); f_α 为共基 BJT 截止频率; f_β, f_T 分别为共射 BJT 截止频率、特征频率; f_{max} 为 BJT 的最高振荡频率; f_o 为滤波器中心频率, 振荡电路振荡频率; f_p 为极点频率。

(7) $G(g)$ 表示 FET 栅极; G 为增益; G_m 为增益裕度; g 为微变电导(跨导)通用符号; $g_{b'e}, g_{ce}, g_{b'c}$ 为 BJT 的微变电导; g_m 为低频跨导。

(8) I, i 表示电流; $I_B(I_{BQ}), I_C(I_{CQ}), I_E(I_{EQ}), I_D(I_{DQ})$ 分别为相应电极的直流(静态)电

流; i_B, i_C, i_E, i_D 分别为相应电极总瞬时值电流; i_b, i_c, i_e, i_d 分别为相应电极交流电流分量; I_b, I_c, I_e, I_d 分别为相应电极交流分量有效值; $i_s(I_s)$ 为信号源电流; I_S 为 PN 结反向饱和电流; $i_D(I_D)$ 为二极管电流; I_F 为正向电流; I_R 为反向电流, 电流源电路参考电流; I_{DSS} 为耗尽型 FET 在 $V_{GS} = 0$ 时的漏极电流; I_{DO} 为增强型 FET 在 $V_{GS} = 2V_{GS(th)}$ 时的漏极电流; $i_{id}(i_{id})$ 、 $i_{od}(i_{od})$ 为差模输入、输出瞬时(交流)电流; I_{dc} 为平均电流; I_{CBO} 为发射极开路时集电结反向饱和电流; I_{CEO} 为基极开路时 C-E 极间的穿透电流; I_{CM} 为集电极最大允许电流; I_{IB} 为输入偏置电流; I_{IO} 为输入失调电流。

(9) J_e, J_c 分别为发射结、集电结。

(10) K 为热力学(绝对)温度单位; K_M, K_d 分别为乘法器、除法器的增益系数; K_{CMR} 为共模抑制比; k 为玻尔兹曼常数, 耦合系数; K_γ 为纹波系数; $K_{r0.1}, K_{r0.01}$ 为矩形系数。

(11) L 为电感, FET 沟道长度; L_s 为漏感。

(12) N 表示电子型半导体, 运放反相输入端; N 为取样电路取样系数(取样比); n 为变压器变比, 电子浓度; N_F 为噪声系数。

(13) P 表示空穴型半导体, 运放同相输入端; P 为功率通用符号; $P_i(P_I), P_o(P_O), P_c$ 分别为输入、输出、集电极耗散功率; P_{dc} 为直流电源供给功率; P_{CM}, P_{ZM} 分别为集电极、稳压管最大允许功耗。

(14) Q 表示静态工作点; Q 为品质因数, 电荷量。

(15) R 表示电阻; $R_b, R_c, R_e, R_g, R_s, R_d$ 分别为基、射、集、栅、源、漏极直流偏置电阻; $R_i(R'_i), R_o(R'_o)$ 分别为电路的输入、输出电阻; $R_{if}(R'_{if}), R_{of}(R'_{of})$ 分别为反馈电路闭环输入、输出电阻; R_{id}, R_{od} 分别为差模输入、输出电阻; R_s 为信号源内阻; $R_L(R'_L)$ 为负载(等效负载)电阻; R_f 为反馈电阻; $R_{em}(R_{cm})$ 为公共射(集)极电阻; R_ϕ 为相位补偿电阻; R_T 为热敏电阻; r 为动态(微变)电阻, 等效电阻; $r_{bb'}, r_{b'e}, r_{b'c}, r_{ce}$ 表示 BJT 的体电阻和结电阻; r_d 为二极管微变电阻; r_{be} 为 BJT 共射输入电阻; r_{gs}, r_{ds} 表示 FET 的动态电阻。

(16) S 表示 FET 源极, 西门子; SW 表示开关; S_R 为运放转换速率; s 为复频率; s 为秒; S_v 为稳压电路输入调整因数; S/N 为信噪比。

(17) T 表示半导体器件; T 表示温度, 周期; T_r 表示变压器; t 为时间。

(18) V, v 表示电压, 电位通用符号; $V_B, V_C, V_E, V_G, V_D, V_S$ 分别为相应电极直流电位(电压); $V_{BE}(V_{BEQ}), V_{CE}(V_{CEQ}), V_{DS}(V_{DSQ}), V_{GS}(V_{GSQ})$ 分别为相应电极间直流(静态)电压; $v_{BE}, v_{CE}, v_{DS}, v_{GS}$ 分别为相应电极间总瞬时值电压; $v_s(V_s, \dot{V}_s), v_i(V_i, \dot{V}_i), v_o(V_o, \dot{V}_o), v_{be}(V_{be}, \dot{V}_{be}), v_{ce}(V_{ce}, \dot{V}_{ce}), v_{ds}(V_{ds}, \dot{V}_{ds}), v_{gs}(V_{gs}, \dot{V}_{gs})$ 分别为信号源、输入、输出及相应电极间交流电压(有效值、复数值); $V_{CC}, V_{EE}, V_{DD}, V_{SS}$ 为电源电压; $v_{id}(V_{id}, \dot{V}_{id}), v_{od}(V_{od}, \dot{V}_{od})$ 为差模输入、输出电压; $v_{ic}(V_{ic}, \dot{V}_{ic}), v_{oc}(V_{oc}, \dot{V}_{oc})$ 为共模输入、输出电压; V_T 为热力学电压(温度电压当量); $V_{GS(th)}$ 为增强型 MOSFET 开启(阈值)电压; $V_{GS(off)}$ 表示耗尽型 FET 夹断(阈值)电压; $V_{D(th)}$ 为二极管阈电压; V_Z 为稳压管稳定(稳压)值; V_ϕ 为接触电位差; $V_{th}(V_{REF})$ 为基准(参考)电压; $V_{CE(sat)}$ 为 BJT 饱和压降; $V_{(BR)}$ 为半导体管击穿电压; V_A 为厄尔利电压; V_{IO} 为输入失调电压。 V_{OH}, V_{OL} 分别为运放输出高、低电平。

(19) X, x 为电抗。

(20) Y, y 为导纳。

(21) Z, z 为阻抗。

3. 其他符号

$\alpha(\bar{\alpha})$ 为共基 BJT 电流增益(放大倍数); $\alpha_{VIO}, \alpha_{II0}$ 分别为输入失调电压、电流温漂。 $\beta(\bar{\beta})$ 为共射 BJT 电流增益(放大倍数)。 η 为效率, 耦合因数; η_T 为变压器效率。 τ 为时间常数。 φ 为相位差; ϕ_m 为相位裕度。 δ 为斜降率, 误差。 ξ 为阻尼系数, 电源电压利用系数, 广义失谐量。 ω 为角频率; Ω 为欧姆。 σ 为电导率, 复频率 $s = \sigma + j\omega$ 的实部。 rad 为弧度。 ρ 为电阻率。

目 录

1 半导体器件.....	1	2.4.2 共集放大电路	51
1.1 半导体导电特性.....	1	2.4.3 共基放大电路	53
1.1.1 本征半导体.....	1	2.5 场效应管放大电路	56
1.1.2 杂质半导体.....	2	2.5.1 共源放大电路	56
1.2 PN 结与半导体二极管	3	2.5.2 共漏放大电路	58
1.2.1 PN 结的形成	3	2.5.3 共栅放大电路	59
1.2.2 PN 结及半导体二极管的特性	4	2.6 多级小信号放大电路	61
1.2.3 二极管主要参数及小信号模型.....	9	2.6.1 多级放大电路级间耦合方式	61
1.3 半导体三极管(BJT)	10	2.6.2 多级放大电路的分析	64
1.3.1 三极管工作原理	11	2.7 放大电路的频率响应	67
1.3.2 三极管伏安特性曲线	13	2.7.1 频率响应的一般概念	67
1.3.3 三极管的主要参数及低频小信号等效模型	15	2.7.2 三极管的小信号混合 π 型等效电路及频率参数	72
1.4 场效应管(FET)	17	2.7.3 单级放大电路的频率响应	74
1.4.1 增强型 MOS FET	17	2.7.4 多级放大电路的频率响应	80
1.4.2 耗尽型 MOS FET	21	2.8 小信号谐振放大电路	81
1.4.3 结型 FET	22	2.8.1 概述	81
1.4.4 场效应管主要参数及小信号等效模型	23	2.8.2 三极管的小信号 y 参数等效电路	82
1.4.5 场效应管与双极型三极管的比较及使用注意事项	26	2.8.3 单调谐放大电路	83
本章小结.....	26	2.8.4 双调谐放大电路	87
思考题与习题.....	27	2.8.5 调谐放大电路的稳定性问题	88
2 基本放大电路及其分析方法	30	本章小结.....	90
2.1 放大电路基本工作原理	30	思考题与习题.....	91
2.1.1 放大电路的基本组成	30	附录 1 密勒定理	97
2.1.2 放大电路的基本工作原理	31	附录 2 谐振回路	98
2.1.3 放大电路的主要性能指标	32	2.1 简单谐振回路	98
2.2 放大电路的基本分析方法	35	2.2 耦合回路.....	100
2.2.1 放大电路的静态分析法	35	2.3 串、并联阻抗等效互换	102
2.2.2 放大电路的动态分析法	37	2.4 并联谐振回路部分接入参数的折算	102
2.3 稳定偏置电路	43	3 模拟集成电路.....	104
2.3.1 温度对静态工作点的影响	43	3.1 概述.....	104
2.3.2 常用稳定偏置电路	44	3.1.1 模拟集成电路的发展.....	104
2.4 三种基本组态放大电路特性	49	3.1.2 集成电路中的元件及其特点.....	105
2.4.1 共射放大电路	49	3.1.3 集成运算放大器的基本组成.....	107

3.1.4 集成运算放大器的主要性能参数	108	4.4.2 四种负反馈类型闭环电压增益的估算	165
3.2 电流源电路	109	4.5 负反馈放大电路的稳定性问题	167
3.2.1 镜像电流源电路	110	4.5.1 负反馈放大电路稳定条件与判断	167
3.2.2 比例电流源电路	111	4.5.2 负反馈放大电路的相位补偿技术	171
3.2.3 微电流源电路	112	本章小结	172
3.2.4 多路输出电流源电路	112	思考题与习题	173
3.3 差动放大电路	113	5 模拟集成电路的应用	178
3.3.1 差动放大电路工作原理	113	5.1 集成运算放大器应用原理	178
3.3.2 差动放大电路基本性能	116	5.1.1 基本工作状态	178
3.3.3 差动放大电路四种运用方式	119	5.1.2 理想运放的应用特性	179
3.3.4 有源负载差动放大电路	122	5.1.3 集成运放应用电路的一般分析方法	180
3.3.5 不对称差放的失调特性	122	5.2 模拟运算电路	181
3.4 输出级及功率放大电路	124	5.2.1 加法与减法运算电路	181
3.4.1 输出级及功率放大电路的特点	124	5.2.2 积分与微分运算电路	184
3.4.2 互补对称推挽 ^① 输出级电路	125	5.2.3 对数与指数运算电路	187
3.4.3 其他推挽输出级电路	130	5.2.4 乘法、除法与平方、开方运算电路	188
3.5 模拟集成电路工作原理	135	5.3 有源滤波电路	191
3.5.1 集成运算放大器	135	5.3.1 滤波电路的基本概念	191
3.5.2 集成功率放大器	138	5.3.2 一阶 RC 有源滤波电路	192
3.5.3 集成电压比较器	140	* 5.3.3 二阶 RC 有源滤波电路	194
3.5.4 集成模拟乘法器	141	5.4 非线性应用电路	200
本章小结	146	5.4.1 电压比较电路	200
思考题与习题	147	5.4.2 精密整流电路与绝对值电路	204
4 负反馈放大电路	151	5.5 模拟集成器件应用中应注意的问题	206
4.1 反馈的基本概念	151	5.5.1 集成器件的选用	206
4.1.1 反馈的极性与反馈的形式	151	5.5.2 集成器件的测试	206
4.1.2 负反馈放大电路的类型	152	5.5.3 集成器件的调零	206
4.2 负反馈放大电路的方框图及反馈方程式	155	5.5.4 集成器件的保护	206
4.2.1 负反馈放大电路的方框图	156	5.5.5 集成器件的性能扩展	208
4.2.2 反馈方程式	156	5.5.6 集成器件的自激与消除	209
4.2.3 环路增益和反馈深度及广义参数的含义	157	本章小结	210
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	157	思考题与习题	210
4.3.1 降低增益、提高增益稳定性	158	6 直流电源电路	216
4.3.2 扩展通频带	158	6.1 单相整流电路	216
4.3.3 减少非线性失真	159	6.1.1 桥式整流电路	216
4.3.4 抑制干扰和噪声	160	6.1.2 倍压整流电路	217
4.3.5 改变输入电阻和输出电阻	160	6.2 滤波电路	218
4.4 负反馈放大电路的分析计算	164		
4.4.1 深度负反馈近似估算法	164		

6.2.1 电容滤波电路.....	218	7.1.2 正弦振荡电路的组成与分析方法.....	243
6.2.2 其他形式滤波电路.....	220	7.2 RC 正弦振荡电路	244
6.3 稳压电路.....	221	7.2.1 RC 串并联式振荡电路	244
6.3.1 并联型稳压电路.....	221	7.2.2 RC 其他形式振荡电路	246
6.3.2 串联型稳压电路.....	223	7.3 LC 正弦振荡电路	248
6.3.3 集成三端稳压器.....	227	7.3.1 变压器反馈式振荡电路.....	248
* 6.4 开关稳压电源电路.....	231	7.3.2 三点式振荡电路.....	248
6.4.1 开关稳压电源电路的特点与分类.....	231	7.4 石英晶体正弦振荡电路.....	251
6.4.2 开关稳压电路基本工作原理.....	232	7.4.1 石英晶体的特性.....	251
6.4.3 开关稳压电路主回路工作原理.....	233	7.4.2 石英晶体振荡电路.....	252
6.4.4 集成开关稳压器.....	235	7.5 非正弦信号发生电路.....	254
6.4.5 开关稳压电源电路分析.....	237	7.5.1 矩形波与方波发生电路.....	254
本章小结	238	7.5.2 三角波发生电路.....	256
思考题与习题	239	7.5.3 锯齿波发生电路.....	258
7 波形发生电路.....	242	本章小结	259
7.1 正弦振荡电路概述.....	242	思考题与习题	259
7.1.1 自激振荡条件.....	242	主要参考文献	262

1 半导体器件

电子线路由有源电子器件和电阻、电容、电感等元件组成,半导体器件是构成电子线路的主要核心部件。本章首先阐述半导体的导电特性,然后讨论半导体二极管、双极型晶体管(BJT)和场效应管(FET)的工作原理、特性及主要参数。

1.1 半导体导电特性

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其电导率 σ 是 $10^{-9} \sim 10^2 \text{ s/cm}$ 量级,如用于制造半导体器件的主要材料硅(Si)的 $\sigma \approx 10^{-5} \text{ s/cm}$ 、砷化镓(GaAs)的 $\sigma \approx 10^{-9} \text{ s/cm}$ 、锗(Ge)的 $\sigma \approx 2.174 \text{ s/cm}$ 。

半导体具有独特的导电特性:在本征半导体(纯净的且晶体结构完整的半导体)中掺入少量其他元素(称之为杂质),可以改变和控制半导体的导电能力和导电类型,藉此掺杂效应可制造各种类型的半导体器件;温度变化亦可以改变半导体的导电能力,藉此热敏效应可制造热敏元件;光照也可以改变半导体的导电能力,并能产生电动势,藉此光电效应可制造光晶体管、光电耦合器和光电池等。半导体的上述导电特性取决于其原子外层结构的特性。

1.1.1 本征半导体

1.1.1.1 锗和硅的原子结构和共价键

本征半导体是纯净的单晶半导体。本征锗和硅均是晶体,它们是四价元素,原子的最外层电子层均有4个电子,其原子结构如图1-1-1所示。最外层的电子,通常称为价电子。半导体的导电特性与价电子有关,为便于讨论导电机理,常采用图1-1-1(c)所示的简化模型。图中带4个单位正电荷的惯性核用于代表除价电子以外的所有电子和原子核;4个价电子分布在惯性核的周围。

在锗或硅晶体中,各原子间的距离很近,每个原子的价电子不仅受到本原子的作用,还受到相邻原子的作用。根据原子理论,原子的最外层有8个电子时才处于稳定状态。锗或硅的原子只有4个价电子,每个原子都要从四周相邻原子取得4个价电子才能组成稳定状态。这样,每两个相邻原子都共用一对价电子,形成共价键结构,如图1-1-2所示。

1.1.1.2 本征激发及载流子

在绝对温度 $T=0\text{K}$ 且没有外界因素影响时,半导体中的价电子都被束缚在共价键中,成为不能自由移动的束缚电子,因而半导体中没有能自由运动的带电粒子——载流子。当半导体受热或光照时,某些共价键中的价电子从外界获得了足够的能量而挣脱共价键的束缚,离开了共价键而成为自由电子(带一个单位负电荷);同时,在原来的共价键中留下一个空位(带一个单位正电荷),这个空位被称为空穴。上述现象称为本征激发,如图1-1-3所示。

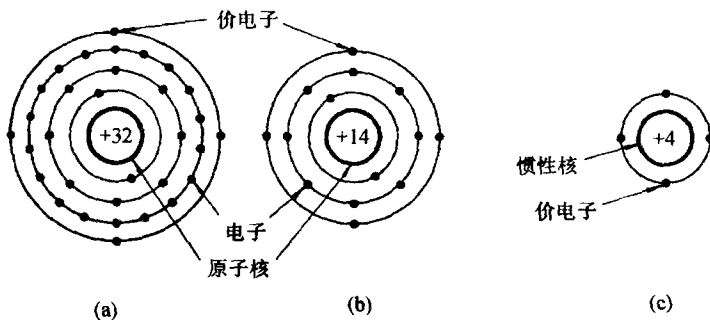


图 1-1-1 锗和硅原子结构模型

(a) Ge 锗; (b) Si 硅; (c) 简化模型

自由电子在外加电场作用下能作定向运动而导电；而由于空穴的存在，邻近共价键中的价电子在外加电场作用下将填补到这空穴上，在该价电子的原共价键上又留下新的空穴，此后，其他价电子又转移到这个新的空穴，依此类推，便形成了价电子依次填补空穴的定向运动，为了与自由电子的定向运动相区别，可以用空穴反方向的运动来等效价电子的定向运动。这种由空穴定向运动形成的导电现象称为空穴导电。可见，半导体中存在自由电子和空穴两种载流子。

1.1.2 杂质半导体

在室温下，本征载流子浓度数值虽然很大，但与其原子密度相比，却是很小的数字，其导电能力很弱。在本征半导体中掺入少量杂质，就成为杂质半导体，其导电能力发生显著变化。根据掺入的杂质不同，杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两种类型。

1.1.2.1 N 型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素砷(或磷、锑)，能使半导体中的自由电子浓度显著增加。由于五价元素有 5 个价电子，它在取代硅(或锗、砷化镓)原子后，其中 4 个价电子分别与相邻四个硅原子上的一个价电子构成共价键，多余的一个价电子不受共价键的束缚，受杂质原子的作用力亦较弱，很容易被激发成为自由电子，而失去多余电子的杂质原子变为不能移动的正离子，如图 1-1-4 所示。掺入的杂质原子数越大，产生的自由电子数就越多。由于五价元素杂质可以提供多余电子，故称为施主杂质。

半导体中，除施主杂质提供的大量的自由电子外，同时还存在本征激发产生的电子空穴对，但自由电子数量远大于空穴数量，故以自由电子导电为主。因此，称掺入五价元素杂质的

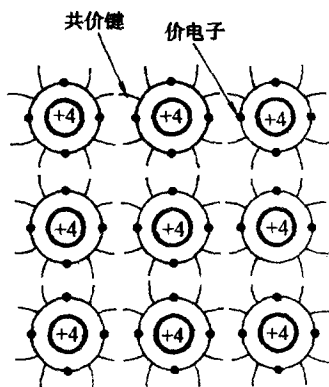


图 1-1-2 共价键结构示意图

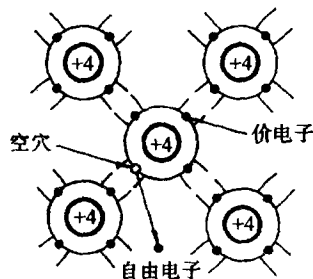


图 1-1-3 本征激发示意图

半导体为电子型或N型半导体。其中,自由电子称为多数载流子,简称“多子”;空穴称为少数载流子,简称“少子”。N型半导体可以用图1-1-4(b)所示模型来表示。

1.1.2.2 P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素硼(或铝、镓、铟),能使半导体中的空穴浓度显著增加。由于三价元素有3个价电子,它在取代硅(或锗、砷化镓)原子后,与相邻四个硅原子上的一个价电子构成4个共价键时,缺少一个价电子,产生一个空位。在室温下,相邻原子的价电子很容易填补这个空位,从而产生一个空穴,而三价杂质原子接受一个价电子变为不能移动的负离子,如图1-1-5所示。掺入三价杂质原子数越大,产生的空穴数就越多。由于三价元素杂质接受价电子,故称为受主杂质。半导体中,除掺入受主杂质产生的大量的空穴外,同时还存在本征激发产生的电子空穴对,但空穴数量远大于自由电子数量,故以空穴导电为主。因此,称掺入三价元素杂质的半导体为空穴型或P型半导体。其中,空穴为多子,自由电子为少子。P型半导体可以用图1-1-5(b)所示模型来表示。

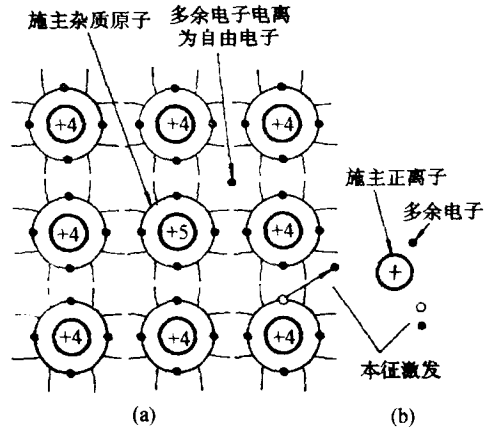


图 1-1-4 N 型半导体结构示意图

(a) 共价键结构; (b) 模型

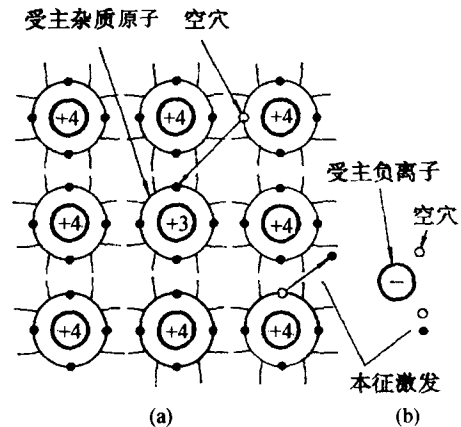


图 1-1-5 P 型半导体结构示意图

(a) 共价键结构; (b) 模型

1.2 PN 结与半导体二极管

在N型(或P型)半导体上采用杂质补偿方法,将其部分区域掺入浓度更高的三价(或五价)元素杂质而转变成P型(N型)区,其余区域仍为N型(P型)区,则在P型区与N型区的界面处便形成PN结。PN结是半导体器件及集成电路中元、器件的基本结构。

1.2.1 PN 结的形成

图1-2-1表示在同一半导体中的P型区和N型区。由于P区的空穴是多子,电子是少子,N区的空穴是少子,电子是多子,因此P区和N区的多子浓度(半导体中,每单位体积的载流子的数量称为载流子浓度)远大于对方区的少子浓度,即P

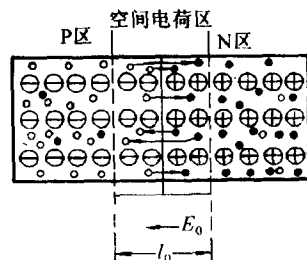


图 1-2-1 PN 结的形成

区空穴浓度远大于N区空穴浓度,N区电子浓度远大于P区电子浓度。在P区与N区的界面处存在同类载流子的浓度差,形成浓度梯度,导致了载流子的扩散运动。载流子从浓度高区域向浓度低区域运动:N区中的电子越过界面向P区扩散,并与P区的空穴复合,载流子消失,N区中留下正离子,P区中留下负离子;同时,P区的空穴也扩散到N区与电子复合,P区和N区分别留下负离子和正离子。这样,由于多子扩散,在交界面两侧形成了一个正负离子积累区,称为空间电荷区。在此区间内,多数载流子因扩散和复合而消耗掉,浓度大大下降,近于耗尽,因此空间电荷区又称为耗尽层。在空间电荷区内正负离子的积累形成了方向从N区指向P区的内电场 E_0 。电场 E_0 不利于多子的扩散,将阻止P区的空穴继续向N区扩散和N区的电子继续向P区扩散,故空间电荷区又称为阻挡层或势垒区;电场 E_0 却有利于少子的漂移,将驱使N区的空穴向P区漂移,P区的电子向N区漂移,使空间电荷区内正负离子积累数量减少。

综上所述,在P区与N区的界面处,同时存在多子扩散运动与少子漂移运动,随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽,电场 E_0 增强,又使扩散运动减弱,漂移运动则随之增强,使空间电荷区变窄,电场 E_0 削弱,再次促使多子扩散,最终将达到扩散运动和漂移运动的动态平衡。总的多子扩散电流与总的少子漂移电流大小相等,方向相反,PN结中总电流为零。而空间电荷区的宽度为恒定值,这就是所谓的PN结。此时,电场 E_0 亦为恒定值,并在PN结中产生电位差 V_0 。通常,称 V_0 为接触电位差,在室温下,硅PN结的 $V_0 \approx 0.6 \sim 0.8\text{V}$,锗PN结的 $V_0 \approx 0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

1.2.2 PN结及半导体二极管的特性

由半导体PN结加上欧姆接触电极、引出线和封装管壳就构成了一个半导体二极管。其中,由P区引出的电极称为正极,N区引出的电极称为负极,其结构与符号如图1-2-2所示。虽然二极管存在半导体中性区的体电阻、接触电极电阻和引线电阻,使二极管的特性与理想PN结特性有所不同,但是差异并不大,半导体二极管的特性基本上决定于PN结。

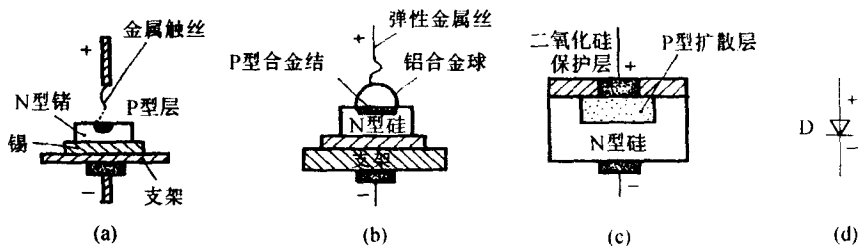


图 1-2-2 二极管的结构与符号

(a)点接触型; (b)面接触型; (c)平面型; (d)符号

1.2.2.1 单向导电性

半导体二极管D(PN结)具有单向导电特性,即正向偏置电流大,反向偏置电流很小。

二极管的正极接外电源正极,负极接外电源负极,称为正向偏置(简称正偏),如图1-2-3所示。正偏时,外加电压 V 在P-N结(P-N结是指P区多了浓度高于N区多了浓度时所形

成的PN结。此时,阻挡层深入P区的厚度小于深入N区的厚度)上建立的外电场 E 与内建电场 E_0 方向相反,削弱内电场的作用,空间电荷量减少,阻挡层宽度减小,由 l_0 变为 l ,耗尽层两端电位差由 V_0 降为 $V_0 - V$ (忽略体电阻、电极接触电阻和引线电阻上的压降),有利于多子扩散,不利于少子漂移。 P^+N 结失去动态平衡,多子的扩散电流远大于少子的漂移电流, P^+N 结有净扩散电流从 P^+ 区流向N区形成数值较大的正向电流 I_F ,二极管导通,其电流 $i_D = I_F$ 随外加电压 V 的变化而显著变化。这样,正偏的二极管表现为一个阻值很小的正向电阻。

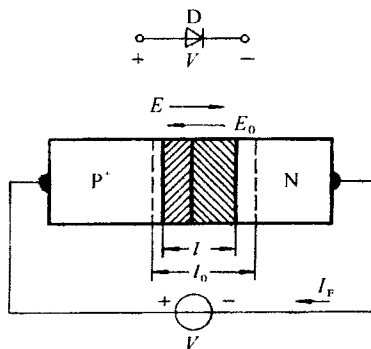


图 1-2-3 PN 结正向偏置

二极管的正极接外电源负极,负极接外电源正极,称为反向偏置(简称反偏),如图 1-2-4 所示。反偏时,外加电场 E 与内建电场 E_0 方向相同,增强内电场的作用,空间电荷量增加,阻挡层宽度增大,由 l_0 变为 l ,电位差由 V_0 增加到 $(V_0 + V)$,不利于多子扩散,有利于少子漂移。PN 结失去动态平衡,少子的漂移电流超过多子的扩散电流,形成从N区流向 P^+ 区的反向电流 I_R 。由于在温度一定时,本征激发的少子数量很少且为恒定值,因此反向电流 I_R 远小于正向电流 I_F ,而且当反偏压足够大时, I_R 几乎不随反偏压变化,趋于一恒定值,故称此恒定电流为反向饱和电流,用 I_S 表示。二极管电流 $i_D = -I_R$,数值很小,可以认为二极管基本不导通,表现为一个阻值很大的反向电阻。

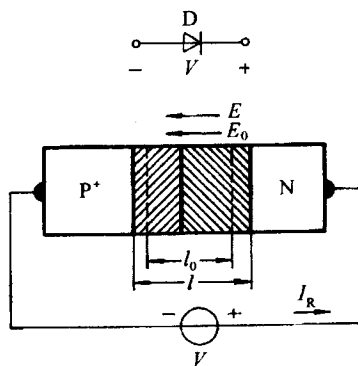


图 1-2-4 PN 结反向偏置

1. 2. 2. 2 伏安特性

二极管的电流 i_D 与二极管两端电压 v_D 之间的关系 $i_D = f(v_D)$ 称为二极管的伏安特性。二极管的伏安特性与PN结的理想伏安特性基本相同,通常用如图 1-2-5 所示的伏安特性曲线来表示。二极管伏安特性曲线可分为三个区。 $v_D > 0$ 的区域为正向工作区, $-V_{(BR)} < v_D < 0$ 的区域为反向工作区, $v_D \leq -V_{(BR)}$ 的区域为击穿区。在正向工作区,二极管的正向特性是非线性的。在正向特性的起始部分,由于正向电压较小,在PN结上形成的外电场对内建电场的影响小,因此这时的正向电流很小,几乎为零,一般认为二极管不导通,只有当二极管有显著的正向电流时,才认为导通。通常把二极管导通时所对应的正向电压称为导通电压(又称起始电压、阈电压、门限电压或死区电压),以 $V_{D(th)}$ 表示。硅管的 $V_{D(th)}$ 约为 $0.5 \sim 0.6V$,锗管的 $V_{D(th)}$ 约为 $0.1 \sim 0.2V$ 。当正向电压大于 $V_{D(th)}$ 时,内建电场被大大削弱, i_D 随 v_D 增加呈指数律增长。在反向工作区,二极管的反向电流数值很小,随反向电压的增大而稍有增加,最后趋于反向饱和电流 I_S 值。锗管的 I_S 在 μA 量级,硅管的 I_S 在 $10^{-9} \sim 10^{-15} A$ 量级。当反向电压增加到 $V_{(BR)}$,即 $v_D \leq -V_{(BR)}$ 时,二极管反向电流剧增,这时二极管反向击穿, $V_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。非稳压二极管反向击穿后,PN结因反向电流剧增而受到破坏,故应避免工作在反向击穿区。

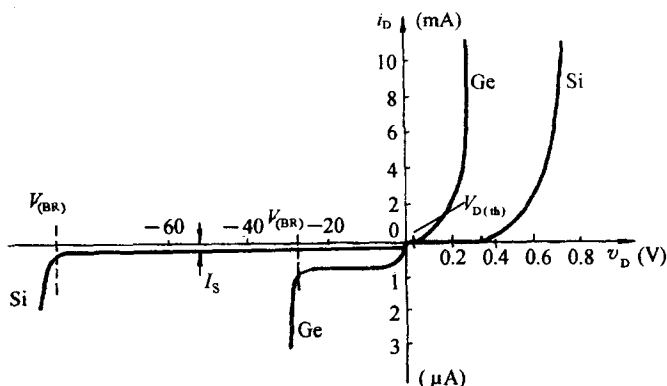


图 1-2-5 二极管伏安特性

根据理论分析,二极管的理想伏安特性可用PN结(二极管)电流方程来表示:

$$i_D = I_S \left(\exp \frac{q v_D}{k T} - 1 \right) = I_S \left(\exp \frac{v_D}{V_T} - 1 \right) \quad (1-2-1)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), T 为热力学(绝对)温度,单位为K, q 为电子的电荷量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$), $V_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度的电压当量,在室温 ($T = 300\text{K}$) 时, $V_T \approx 26 \text{mV}$ 。

由上式可知,当正偏电压 $v_D \geq 4V_T$ 时, $\exp \frac{v_D}{V_T} \gg 1$, 则 $i_D \approx I_S \exp \frac{v_D}{V_T}$, i_D 与 v_D 成指数关系;当反偏压 $v_D \leq -4V_T$ 时,指数项趋于零,则 $i_D \approx -I_S$ 。

1.2.2.3 反向击穿特性与稳压管

(1) 雪崩击穿与齐纳击穿

如上面所述,当加在PN结上的反向电压达到反向击穿电压 $V_{(BR)}$ 时,PN结将被击穿。引起PN结反向击穿的机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

雪崩击穿是在电导率较低(低掺杂)的半导体PN结中发生的。这种PN结的势垒区较宽,当反向电压足够高时,PN结内电场较强,在势垒区内作漂移运动的载流子不断地被加速,以致速度足够高而获得足够的动能,它们碰撞中性原子,使中性原子的价电子受激发,产生新的电子空穴对。新的电子空穴对又受到足够的加速,再碰撞别的中性原子激发新的电子空穴对,如此继续下去,载流子数量迅速增大,反向电流急剧增大,导致PN结被击穿。由于温度升高时,少数载流子的迁移率下降,需要有更强的内电场才能使载流子获得足够的动能,去碰撞中性原子激发其价电子,因此雪崩击穿电压随温度升高而增大。

齐纳击穿是在电导率高(高掺杂)的半导体PN结中发生的。这种PN结的势垒区很薄,只要加上不很高的反向电压,在势垒区就可获得高于 $(2 \sim 3) \times 10^5 \sim 10^6 \text{V/cm}$ 的场强,足以使价电子摆脱共价键的束缚变成自由电子,产生大量的电子空穴对,使反向电流急剧增大,导致PN结击穿。齐纳击穿电压较雪崩击穿电压低,而且随温度升高而降低。在击穿电压高于6V时,则主要是雪崩击穿。

(2) 稳压管

PN 结反向击穿,破坏了其单向导电特性,普通二极管不能工作在击穿状态。然而,PN 结击穿后,其端电压基本恒定,只要限制击穿时的电流不超过允许值,PN 结并不会损坏。可利用 PN 结的这一反向击穿特性制造具有稳定电压作用的稳压管。

稳压管 D_Z 的符号、模型及伏安特性如图 1-2-6 所示。 V_Z 表示反向击穿电压,即稳压管的稳定电压。由于制造工艺的缘故,同一型号的稳压管, V_Z 的分散性也较大。而且 V_Z 随温度不同而变, V_Z 低于 4V(齐纳击穿)时具有负温度系数;高于 7V(雪崩击穿)时具有正温度系数;在 4~7V 之间温度系数较小。 I_{Zm} 为稳压管的最小稳定电流,稳压管反向工作电流 $I_Z < I_{Zm}$ 时,将不能正常起稳压作用。在计算稳压管稳压电路时,通常以器件参数手册给定的参考电流(稳定电流)代替 I_{Zm} 。 I_{ZM} 为稳压管的最大稳定电流,当稳压管电流 $I_Z > I_{ZM}$ 时,其功率损耗 $P_Z = V_Z I_Z$ 将超过最大允许耗散功率 P_{ZM} 。可见,稳压管工作电流 I_Z 应满足 $I_{Zm} \leq I_Z \leq I_{ZM}$ 的关系。稳压管的反向击穿特性越陡,其动态电阻,即稳压管的内阻 $r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$ 越小,稳压性能就越好。 r_Z 与稳定电压 V_Z 和工作电流 I_Z 有关:一般认为, $V_Z = 8V$ 左右的稳压管的 r_Z 较小, V_Z 低于这个电压值的稳压管,其 r_Z 随 V_Z 的下降迅速增大;工作电流越大, r_Z 越小。表 1-2-1 列出了几种稳压管的主要参数。

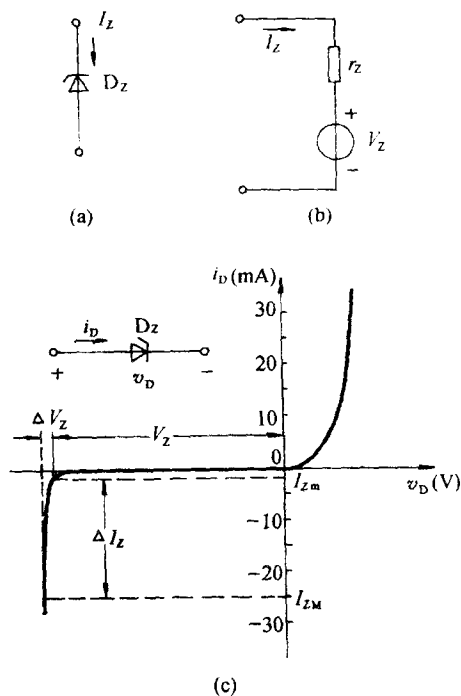


图 1-2-6 稳压管

(a) 符号; (b) 模型; (c) 伏安特性

表 1-2-1 几种稳压管的主要参数

型 号	稳定电压 $V_Z(V)$	稳定电流 $I_Z(mA)$	最大稳定电流 $I_{ZM}(mA)$	耗散功率 $P_{ZM}(W)$	动态电阻 $r_Z(\Omega)$	温度系数 $k(\%/^{\circ}C)$
2CW11	3.2~4.5	10	55	0.25	<70	$-0.05 \sim +0.03$
2CW15	7~8.5	5		0.25	≤ 10	$+0.01 \sim +0.08$
2DW7A*	5.8~6.6	10	30	0.20	≤ 25	0.05

* 2DW7 为具有温度补偿的稳压管。

1.2.2.4 电容特性与变容二极管

PN 结势垒区的空间电荷量和两中性区(P 区和 N 区)的非平衡少数载流子数量都随外加电压的改变而变化,形成电容效应。PN 结势垒区里的电容效应称为势垒电容 C_T ;两中性区里的电容效应称为扩散电容 C_D 。PN 结电容 $C_J = C_T + C_D$ 。

(1) 势垒电容 C_T

PN 结外加电压变化时, 势垒区将发生充放电现象。PN 结反偏压增大(或正偏压减小)时, 空间电荷量增加, 耗尽层加宽, 相当于对势垒区充电; PN 结反偏压减小(或正偏压增大)时, 空间电荷量减少, 耗尽层变薄, 相当于势垒区放电。若外加电压的变化量为 dv_D 、势垒区内空间电荷的相应变化量为 dQ , 则势垒电容定义为

$$C_T = \frac{dQ}{dv_D} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta v_D} \quad (1-2-2)$$

分析表明, C_T 与外偏压 v_D 的关系为

$$C_T = \frac{C_{T0}}{\left(1 - \frac{v_D}{V_\phi}\right)^n} \quad (1-2-3)$$

式中, V_ϕ 是接触电位差; v_D 是外偏压(正偏时, $v_D > 0$, 反偏时 $v_D < 0$); C_{T0} 是 $v_D = 0$ 时的势垒电容值。 n 取值决定于 PN 结的结构。对于 P 区和 N 区内杂质分布均匀, 从 P 区到 N 区杂质类型突变的突变 PN 结, $n = \frac{1}{2}$; 对于超突变 PN 结, $n = \frac{1}{2} \sim 6$; 对于从 P 区到 N 区杂质类型逐渐过渡的缓变 PN 结, $n \approx \frac{1}{3}$ 。

上式表明, C_T 与 v_D 是非线性关系, v_D 越大, C_T 越小。 C_T 一般在 $0.5 \sim 150 \text{ pF}$ 范围内。

利用势垒电容 C_T 随外加电压变化的特性可制造变容二极管, 其符号、模型和特性如图 1-2-7 所示。变容二极管通常在反偏状态下工作, 改变反偏压的大小可以调节电容量, 它作为压控电容器广泛应用于压控振荡器(VCO)、频率变换和参量电路中。

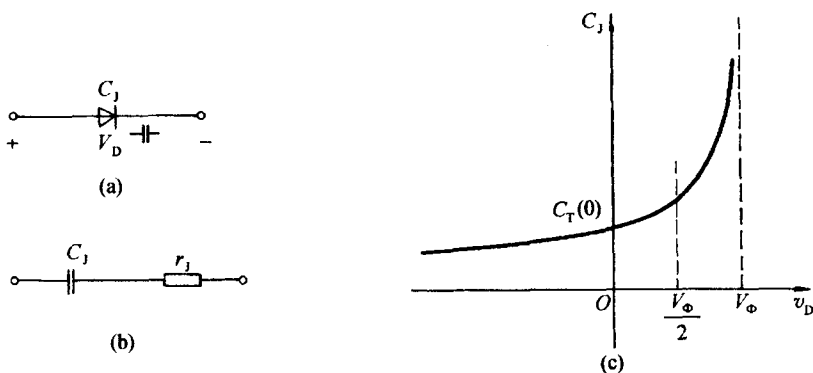


图 1-2-7 变容二极管及其容压特性

(a) 符号; (b) 模型; (c) 容压特性曲线

(2) 扩散电容 C_D

PN 结正偏电压变化时, 多子扩散运动将随之变化, 两中性区亦发生电荷充放电现象。如前所述, PN 结正偏时, 多子扩散增强, 多子越过 PN 结进入另一中性区成为非平衡少数子, 并在该中性区继续扩散, 直至复合消失。这种由非平衡少数子扩散到两中性区形成的电容效应便是扩散电容 C_D 。根据理论分析, C_D 正比于正向电流 I_D 。 C_D 一般在几十~几百 pF 范围内。

C_T 和 C_D 是并联的, PN 结总电容 C_J 为

$$C_J = C_T + C_D \quad (1-2-4)$$