

—普通高等院校—

电子信息类系列教材

TongXin DianZi
DianLu JiChu

通信电子电路基础

(第2版)

© 宁帆 方建邦 高立 编



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

通信电子电路基础

(第2版)

宁帆 方建邦 高立 编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

通信电子电路基础 / 宁帆, 方建邦, 高立编. —2版.
北京: 人民邮电出版社, 2009.1
(普通高等院校电子信息类系列教材)
ISBN 978-7-115-18788-8

I. 通… II. ①宁…②方…③高… III. 通信—电子电路—
高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第136508号

内 容 提 要

本书主要介绍模拟电子电路的基本原理、分析方法及工程计算。内容包括: 半导体元器件, 放大器基础, 模拟集成电路, 功率放大器, 正弦波振荡器, 线性频率变换——振幅调制、检波、变频, 非线性频率变换——角度调制与解调, 反馈控制电路等。

本书的特色是将三极管与场效应管、放大器基础原理与基本放大电路的应用、小功率低频与高频基本放大电路、低频与高频功率放大器进行统筹和有机的结合, 循序渐进, 体系完整。

为了便于自学, 全书的章节按由浅入深的原则安排, 语言力求通俗易懂; 并结合各章特点, 提供了例题、思考题及习题、小结等。

本书可为通信类及信息类各专业基础课教材, 也可供高等电子工程和无线电技术专业的学生和从事电子工程、通信、自动化等专业工作的技术人员阅读参考。

普通高等院校电子信息类系列教材

通信电子电路基础(第2版)

-
- ◆ 编 宁 帆 方建邦 高 立
责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京世纪雨田印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.25
字数: 493千字 2009年1月第2版
印数: 28 801—31 800册 2009年1月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-18788-8/TN

定价: 35.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

第 2 版前言

模拟电子电路是针对通信工程、信息工程和电子工程专业设置的本、专科专业基础课程。随着科学技术的发展和进步,在当前工学类学科建设中,出现了学科分裂和跨学科发展的情况,增加了各学科的课程种类,使学生的课程学习负担加重。为此,我们根据技术发展的方向,结合近 20 年的教学实践,将低频电子电路和高频电子电路的基本原理、分析方法有机地结合,由分立元件电路逐步向集成电路过渡,编写并修订了本教材。

随着信息技术的飞速发展,以及计算机技术与通信技术的结合,计算机通信已成为引领信息化技术发展的主流。电子设备、计算机设备、通信设备都采用了大规模或超大规模集成电路。面对通信和信息网络的数字化环境,设备智能化的更深层次开发,我们有必要对原课程中的内容进行较大的调整,把低频和高频模拟电子电路内容进行压缩,侧重介绍基本器件的特性和基本电路的组成、分析方法,分析以集成电路内部电路的组成为主,分立元件电路为拓展加深内容。

本书在编写时,紧密结合通信的实际情况,介绍基本理论、基本分析方法、工程计算方法和集成电路的应用,以培养和提高学生对电子技术问题进行分析 and 解决的能力,为学习相关专业和从事通信、信息技术工作打下坚实的基础。

为了便于自学,每章都附有一定数量的例题、思考题、习题和小结。在编排上,对拓展加深的内容,均注有 * 号。

本版的修改主要加强基础知识和基本理论的介绍;增加了深度负反馈放大器的应用计算和复合管放大器;删除了大信号特性及模拟乘法器内部集成电路分析。经过修改,力求使本书成为一本可以随时翻阅、查找方便的教材和技术参考书。

本书第 1 版的第 1、2 章由宁帆编写,第 3、4、6、7、8 章由方建邦编写,第 5 章由高立编写。本版主要由宁帆对第 1、2、3 章进行了较大的修改,并对本书进行了统编。李文海教授对本书稿进行了校阅,并提出了宝贵的意见;高峰、马川、徐文华和娄榭对本书进行了认真的校对,在此一并表示衷心的感谢。

本书虽经近 10 年的使用,编者也反复斟酌和仔细审校,但限于编者水平,书中难免存在一些错漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

对本书的意见和建议欢迎发送邮件至: ningfan@bupt.edu.cn。

编 者
于北京邮电大学
2008 年 8 月

目 录

第1章 半导体元器件..... 1

1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 什么是半导体	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 杂质半导体	3
复习思考题.....	4
1.2 PN结	4
1.2.1 PN结的形成	4
1.2.2 PN结的单向导电性	5
1.2.3 温度对伏安特性的影响	6
1.2.4 PN结的反向击穿	7
1.2.5 PN结的电容效应	7
复习思考题.....	8
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 二极管的结构和符号	8
1.3.2 二极管的伏安特性	9
1.3.3 二极管的主要参数	9
1.3.4 二极管的等效电阻.....	10
1.3.5 二极管等效电路.....	10
1.3.6 特殊二极管.....	11
1.3.7 二极管的应用.....	13
复习思考题	18
1.4 半导体三极管.....	18
1.4.1 三极管的结构类型.....	18
1.4.2 三极管的工作原理.....	19
1.4.3 三极管特性曲线.....	21
1.4.4 三极管的极限参数.....	23
复习思考题	24
1.5 场效应晶体管.....	24
1.5.1 结型场效应管.....	24
1.5.2 绝缘栅型场效应管.....	27
复习思考题	31

小结	31
习题	33

第2章 放大器基础

2.1 晶体管放大器.....	36
2.1.1 放大器的组成.....	36
2.1.2 放大器工作原理.....	36
2.1.3 图解分析法.....	37
2.1.4 等效电路分析法.....	40
2.1.5 共基极放大器的特点.....	45
2.1.6 多级放大器.....	46
复习思考题	50
2.2 放大器的反馈.....	50
2.2.1 反馈的基本概念.....	50
2.2.2 反馈放大器的一般表示式.....	55
2.2.3 负反馈对放大器性能的影响.....	57
2.2.4 两种常用的负反馈放大电路.....	60
* 2.2.5 深度负反馈放大器的计算举例	64
复习思考题	66
2.3 放大器的频率特性.....	67
2.3.1 频率特性的基本概念.....	67
2.3.2 晶体管的高频参数及等效电路.....	69
2.3.3 共射极单级放大器的高频特性.....	74
2.3.4 单级放大器的低频特性	81
2.3.5 多级放大器的频率特性	84
* 2.3.6 扩展放大器通频带的方法	85

复习思考题	90	复习思考题	132
2.4 小信号选频放大器	91	3.4 集成运算放大器	133
2.4.1 通频带和选择性	91	3.4.1 集成运放电路的组成	133
2.4.2 单谐振回路和耦合回路	92	3.4.2 通用型集成运放	134
2.4.3 LC 谐振回路小信号选频 放大器	101	3.4.3 集成运放的主要参数	135
2.4.4 石英晶体、压电陶瓷滤 波器和声表面波滤波器 选频放大器	102	* 3.4.4 专用型集成运放	136
复习思考题	105	复习思考题	138
2.5 场效应管放大器	105	3.5 集成运放的应用	139
2.5.1 场效应管的直流偏置 电路	106	3.5.1 集成运放的理想化	139
2.5.2 静态工作点的确定	107	3.5.2 基本放大电路	140
2.5.3 场效应管小信号等效 电路	107	3.5.3 线性运算电路	143
2.5.4 共源极放大器	108	3.5.4 非线性运算电路	148
2.5.5 共漏极放大器	109	复习思考题	150
复习思考题	110	3.6 二极管接于运算放大器输入 电路中的限幅器	151
小结	110	3.6.1 串联限幅器	151
习题	112	3.6.2 并联限幅器	154
第3章 模拟集成电路	119	复习思考题	157
3.1 集成电路概述	119	3.7 模拟乘法器	157
3.2 恒流源电路	120	3.7.1 模拟乘法器的基本性质	158
3.2.1 镜像电流源	121	3.7.2 模拟乘法器的应用	158
3.2.2 比例电流源	121	复习思考题	161
3.2.3 微电流源	122	小结	161
3.2.4 MOS 电流源	123	习题	162
3.2.5 有源负载	123		
复习思考题	124	第4章 功率放大器	166
3.3 差动放大器	124	4.1 概述	166
3.3.1 零点漂移	124	4.1.1 功率放大器的特点	167
3.3.2 差动放大器的工作 原理	125	4.1.2 功率放大器的分类	169
3.3.3 小信号分析	127	复习思考题	171
3.3.4 具有恒流源偏置和有源 负载的差动放大器	130	4.2 低频功率放大器	171
3.3.5 复合管放大器	131	4.2.1 乙类互补对称功率放大器 (OCL 电路)	171
		4.2.2 甲乙类互补对称功率 放大器	176
		4.2.3 单电源互补对称功放 (OTL 电路)	177
		* 4.2.4 单电源桥式互补对称 功放 (BTL 电路)	179

复习思考题.....	180	5.4.2 串联型晶体振荡电路 ...	203
4.3 高频丙类谐振功率放大器 ...	181	复习思考题.....	203
4.3.1 工作原理	181	5.5 RC正弦波振荡器	203
4.3.2 功率和效率	183	5.5.1 文氏电桥振荡电路	203
4.3.3 丙类放大器的工作 状态	185	5.5.2 RC相移式振荡电路 ...	205
复习思考题.....	186	复习思考题.....	206
4.4 丙类谐振倍频器	187	小结.....	206
复习思考题.....	189	习题.....	207
小结.....	189	第6章 线性频率变换——振幅调制、 检波、变频	209
习题.....	190	6.1 调幅信号的分析	210
第5章 正弦波振荡器	192	6.1.1 普通调幅(AM)信号 ...	210
5.1 反馈型正弦波振荡器的工作 原理	192	6.1.2 抑制载频的双边带 信号(DSB)	214
5.1.1 振荡电路的组成	192	6.1.3 单边带调幅信号 (SSB)	215
5.1.2 自激振荡的起振条件 和平衡条件	194	复习思考题.....	216
5.1.3 稳定条件	195	6.2 调幅电路	217
复习思考题.....	196	6.2.1 双边带调幅电路	217
5.2 LC反馈型正弦波振荡器 ...	197	6.2.2 普通调幅电路	218
5.2.1 变压器耦合反馈型 振荡器	197	6.2.3 单边带调幅电路	218
5.2.2 电感分压反馈型正弦波 振荡器	197	复习思考题.....	219
5.2.3 电容分压反馈型正弦波 振荡器	198	6.3 振幅检波	219
5.2.4 三点式振荡电路相位平衡 条件判断方法的归纳 ...	198	6.3.1 二极管峰值包络 检波器	220
复习思考题.....	199	6.3.2 相乘检波器	223
5.3 振荡器的频率稳定性	199	复习思考题.....	224
5.3.1 频率稳定度	200	6.4 变频	224
5.3.2 影响频率稳定度的因素 及改善措施	200	6.4.1 混频原理	225
5.3.3 改进型电容三点式振荡 电路	200	6.4.2 二极管双平衡混频	226
复习思考题.....	202	6.4.3 混频干扰及其抑制	227
5.4 石英晶体振荡器	202	复习思考题.....	229
5.4.1 并联型晶体振荡电路 ...	202	小结.....	229
		习题.....	230
		第7章 非线性频率变换——角度 调制与解调	232
		7.1 概述	232

复习思考题.....	234	* 8.3.2 具有自动频率控制的 调频器	269
7.2 调角信号分析	234	复习思考题.....	271
7.2.1 调角信号的表达式	234	8.4 自动相位控制	271
7.2.2 调角信号的波形图	238	8.4.1 锁相环的组成	271
7.2.3 调角信号的频谱和频带 宽度	239	8.4.2 环路基本部件	272
* 7.2.4 多频信号调制时调角 信号的频谱和带宽 ...	243	8.4.3 锁相环的工作过程	278
* 7.2.5 调角信号的功率	244	* 8.4.4 模拟集成锁相环	280
复习思考题.....	245	8.4.5 锁相频率合成	282
7.3 调频及调相信号的产生	245	复习思考题.....	284
7.3.1 变容管直接调频	245	小结.....	284
7.3.2 间接调频和调相	250	习题.....	285
复习思考题.....	253	附录 A 实验指导书	287
7.4 调频信号的解调	253	实验一 基本放大电路.....	287
7.4.1 鉴频器的基本原理	253	I 实验内容与方法.....	287
7.4.2 单失谐回路斜率 鉴频器	254	II 单级放大器实验的实施.....	289
7.4.3 双失谐回路斜率 鉴频器	256	实验二 运算放大器的基础 实验.....	292
* 7.4.4 集成电路中应用的斜率 鉴频器	259	I 实验方法与内容.....	292
复习思考题.....	260	II 运算放大器基础实验的 实施.....	295
小结.....	260	实验三 小信号选频放大电路.....	297
习题.....	262	I 多级单回路调谐放大器的 调整与测试.....	297
第8章 反馈控制电路	264	II 多级单回路调谐放大器 实验.....	299
8.1 什么是反馈控制	264	实验四 振幅调制器与检波器.....	301
8.2 自动振幅(幅度)控制	265	I 集电极调幅电路的调整 与测试方法.....	301
8.2.1 自动增益控制电路的 工作原理	265	II 振幅调制器与检波器 实验.....	302
* 8.2.2 集成电路中的自动增益 控制	266	附录 B 教学大纲	307
复习思考题.....	268	附录 C 教学进程表	312
8.3 自动频率控制	268	参考文献	315
8.3.1 自动频率微调电路的 工作原理	269		

第 1 章 半导体元器件

内 容 提 要

本章介绍构成模拟集成电路的基础器件：二极管、三极管和场效应管。重点分析它们的结构、特性、主要参数等，还介绍二极管的应用、特殊二极管的功能等，并说明放大电路中三极管、场效应管的工作特点，指出三极管工作状态在模拟及数字电路中的不同。

学 习 要 点

了解半导体物理知识和 PN 结的形成；熟悉 PN 结的特性，掌握二极管、三极管和场效应管的工作原理、基本方程、特性、主要参数、近似等效电路和使用注意事项；了解温度对半导体器件性能的影响以及锗管和硅管的性能差别。能解释下列名词术语：本征半导体，杂质半导体，多数载流子，空间电荷区，扩散电流和漂移电流；沟道，夹断，预夹断，耗尽型，增强型，夹断电压 U_P ，开启电压 U_T ，零栅饱和漏电流 I_{DSS} 和跨导 g_m 。熟悉特殊二极管的功能，掌握二极管在整流、稳压及限幅等方面的应用。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 什么是半导体

在日常生活中，将常见的容易导电的金、银、铜、铝等金属称为导体；而普通的塑料、陶瓷、橡胶等则几乎不导电，称为绝缘体。半导体因其导电能力介于导体和绝缘体之间而得名，如锗、硅和砷化镓（其化学元素符号分别为 Ge、Si 和 GaAs）是 3 种主要的半导体材料。为什么物质之间会存在导电性能差异的现象呢？根本原因在于物质内部原子结构、原子和原子的结合方式以及原子内部运载电荷的粒子数量和运动速度的不同而决定的。

半导体之所以在现代科学技术中得到广泛的应用，不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是因为它具有下面两个物理性质。

1. 半导体的导电性能很容易改变

(1) 半导体的电导率可以随加入的杂质发生显著的变化。例如，在室温 30°C 时，纯锗中掺入一亿分之一的杂质（称为掺杂），其电导率将增加两万多倍。正因为掺杂可以改变和控

制半导体的电导率,才能用它制成各种半导体元器件。

(2) 温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化。例如,温度每升高 8°C ,就可以使硅的电导率提高大约一倍。利用这种热敏效应可以制成热敏元件,如热敏电阻等。但是,从另一方面来看,热敏效应又会使半导体元器件的热稳定性下降,从而造成电路不稳定。

(3) 光照不仅可以改变半导体的电导率,而且还可以产生电动势,称这种现象为半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光电晶体管、光电耦合器、光电池等。

上述的半导体特性分别称为半导体的掺杂特性、热敏特性和光敏特性。

2. 半导体导电性能的改变是可以控制的

通过掺杂、温度变化和光照改变半导体导电性能的过程,可以人为地加以控制,使它按照人们预期的要求来变化,从而使半导体在现代电子技术领域中得到了广泛的应用。

1.1.2 本征半导体

1. 硅和锗晶体的共价键结构

由原子理论知道,组成物质的原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成,电子分几层围绕着原子核不停地运动。当最外层电子有 8 个时才处于稳定状态。

目前,用得最多的半导体材料是锗和硅,它们的原子结构如图 1-1-1 所示。锗和硅最外层电子都是 4 个,所以称它们为四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子。半导体的导电性能与价电子有关。

半导体材料在固态下是晶格结构。在半导体元器件的制作工艺中,首先要将半导体材料提纯并拉成单晶体,即在整个材料内部,原子之间整齐排列。纯净的半导体单晶体称为本征半导体。

当硅(锗)材料制成纯单晶体时,它的原子排列就由杂乱无章变成了非常整齐的状态。由于原子间距离很近,原来隶属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响,使价电子为两个原子所共有,从而形成了单晶体中的“共价键”结构,如图 1-1-2 中①所示。每个硅原子的 4 个价电子与相邻的 4 个原子的各 1 个价电子组成 4 对共价键,从而使每个硅原子最外层拥有 8 个共有电子。因此,本征硅(锗)是稳定的。

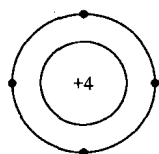


图 1-1-1 硅(锗)原子简化图

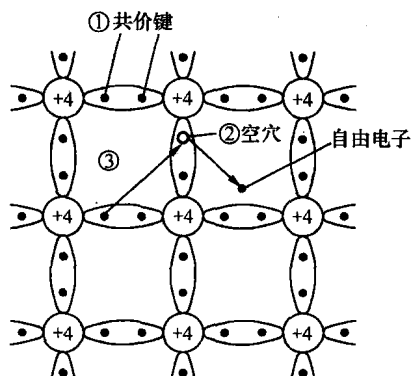


图 1-1-2 硅或锗材料的共价键结构

2. 本征半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

在绝对温度 0K (即 -273°C)，又无外部激发时，由于共价键中的价电子被束缚着，半导体中没有可以自由运动的带电粒子——载流子。因此，即使有外电场作用也不能产生电流。此时的半导体相当于绝缘体。但是当有外部激发，如温度升高或光照时，就会使一些价电子在获得能量后，挣脱共价键的束缚，而成为自由电子，也叫电子载流子，电荷量等于 $-q$ ，这种现象称为本征激发。当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，在共价键中就留下一个空位子，叫空穴，如图 1-1-2 中②所示。当邻近共价键内的价电子跑过来填充这个空穴，在原来的位置产生一新的空穴，这种情形相当于空穴在移动。空穴是由于失去价电子形成的，所以它是带正电 ($+q$) 的载流子。

综上所述，本征半导体中存在两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。它们是对出现的，也叫做“电子空穴对”。由于两者电荷量相等，极性相反，所以，本征半导体是电中性的。半导体在外电场作用下，通过它的电流可以看作是由两部分组成：一部分是自由电子逆电场方向定向运动形成的电子电流；另一部分是共价键中价电子填补空穴形成的空穴电流，如图 1-1-2 中③所示，即半导体中的电流为电子电流和空穴电流之和。

实践和理论证明，随着温度的升高，电子空穴对将迅速增多，其增加速度，比指数律还快。

电子和空穴在不停地运动中，还会彼此相遇，使某些自由电子重新回到共价键上，恢复了价电子“身份”使电子空穴对消失，这一过程称为复合。在一定温度下，电子空穴对的“产生”与“复合”可以达到动态平衡，即产生与复合虽然仍在进行，但电子空穴对却始终维持一定数目。

1.1.3 杂质半导体

利用本征半导体的掺杂特性，人为地掺入少量其他元素（称为杂质），可以制成杂质半导体，从而使半导体的导电性能发生显著的改变。利用这一特性，制成了各种性能的半导体器件。

根据掺入杂质性质的不同，可分为电子型半导体和空穴型半导体两种。因为电子带负电，取英文单词“Negative”（负）的第一个字母，所以电子型半导体又称为 N 型半导体；空穴带正电，取英文单词“Positive”（正）的第一个字母，空穴型半导体又称为 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素如磷、砷、锑等，使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置，便形成了 N 型半导体。图 1-1-3 所示为一个磷原子代替一个锗原子后，晶体的结构示意图。由图可见，磷原子有 5 个价电子，其中 4 个与锗原子结合成共价键，余下的一个价电子在共价键之外，磷原子对它的束缚力较共价键弱得多，因此，只需较少的能量，就可以使它

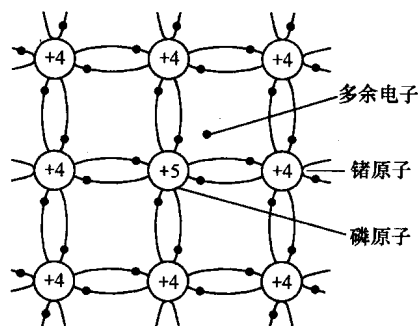


图 1-1-3 N 型半导体晶体结构示意图

激发成为自由电子,留下的则是不能移动的正离子。在常温下,由于每个五价原子都能释放(施舍)出一个自由电子,故称其为“施主杂质”或N型杂质。

在N型半导体中,除了杂质给出的大量额外自由电子外,在半导体中尚有少量的由本征激发产生的电子空穴对。这就使该半导体中的自由电子数远大于空穴数,所以N型半导体中的自由电子称为“多数载流子”,简称“多子”;而空穴称为“少数载流子”,简称“少子”。参与导电的载流子以自由电子为主,因而称为电子型半导体。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价元素,如硼、铝和镓等,可以形成P型半导体,硼原子在与锗原子构成共价键时,将因缺少电子而出现空穴,在温度不是很高的情况下,这些空穴比较容易吸引附近的电子来填充,形成空穴导电。图1-1-4所示为一个硼原子在晶体上取代一个锗原子的晶体结构示意图。从晶体结构上看,硼原子由于俘获了一个电子将成为不能移动的负离子。由于空穴的浓度远大于电子浓度,空穴为“多子”,电子为“少子”,P型半导体的导电基本上取决于空穴的运动,所以P型半导体又称为空穴型半导体。

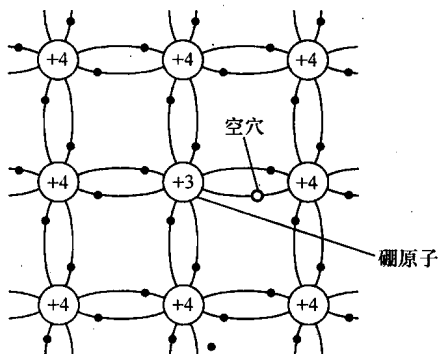


图 1-1-4 P型半导体晶体结构示意图

在P型半导体中,由于三价元素硼原子起着接受电子的作用,所以称其为“受主杂质”或P型杂质。

复习思考题

1-1-1 本征半导体的导电性能与金属和绝缘体有什么不同?它是怎样导电的?

1-1-2 N型半导体和P型半导体是怎样形成的?它们是否带电?其中少数载流子的多少与什么因素有关?

1.2 PN结

在一块半导体的一端掺入受主杂质,形成P型半导体;另一端掺入施主杂质,形成N型半导体,于是在它们的交界处,就形成了一个PN结。PN结是许多半导体器件的重要组成部分。

1.2.1 PN结的形成

在室温下,P型半导体内每一个受主杂质将产生一个空穴,同时形成一个负离子;N型半导体内每一个施主杂质将产生一个自由电子,同时形成一个正离子。

于是在两种杂质半导体的交界处,由于P型半导体(又称P区)内空穴为多子,N型半导体(又称N区)内电子为多子,存在很大的浓度差,所以,空穴将越过交界面由P区向N区运动。同理,电子也会由N区向P区运动,通常把这种由载流子浓度差引起的现象称为扩散,如图1-2-1所示。

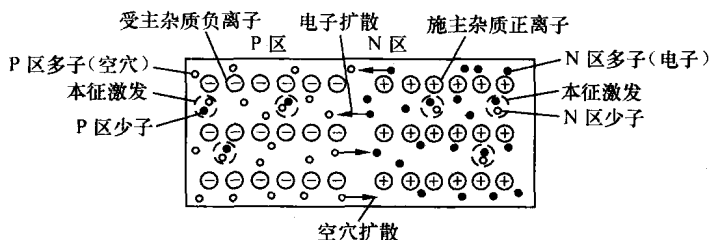


图 1-2-1 载流子分布浓度差引起扩散运动

扩散运动的结果，一是进入对方区域后，多子身份变为少子，很快就被复合掉了；另一个是在交界面两侧留下了不能移动的正负离子，形成了一个正负离子区，亦称空间电荷区，如图 1-2-2 所示。这个区域的载流子因扩散和复合而消耗掉了，所以又称为耗尽区。在交界面两端的正负电荷间必然有电场存在，这个电场称为内建电场，电场方向由 N 区指向 P 区，它所产生的电位差 U_D （又叫接触电位差）使 N 区的电位高于 P 区的电位。由图 1-2-2 可见，这个电场具有阻止多数载流子扩散的作用，所以，人们又把耗尽区称为势垒区或位垒区。与此同时，内电场将使 N 区的少子空穴向 P 区运动，使 P 区的少子电子向 N 区运动，通常把这种现象称为漂移。

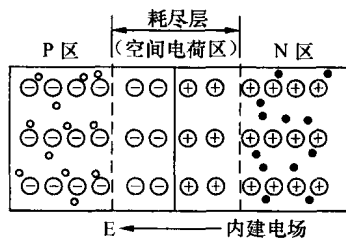


图 1-2-2 平衡状态下的 PN 结

由图可见，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。由扩散运动形成的电流，称为扩散电流，由漂移运动形成的电流，称为漂移电流。这两种电流方向相反。当这两种电流相等时，达到了动态平衡，此时势垒区的宽度也就确定下来了。PN 结指的就是势垒区，通常很薄，约为数十微米，其接触电位差的大小与半导体材料、掺杂浓度和环境温度有关。在室温下，硅材料 PN 结的接触电位差 $U_D \approx 0.6 \sim 0.8V$ ，锗材料 PN 结的 $U_D \approx 0.1 \sim 0.3V$ ，温度每升高 $1^\circ C$ ，电位差降低约 $2mV$ 。

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结外加正向电压 (PN 结导通)

电源电压通过限流电阻加在半导体的两端，其正极接 P、负极接 N。电源的这种接法称为外加正向电压，也叫正向偏置，简称“正偏”，如图 1-2-3 (b) 所示。由图可见，外加电压的极性与内势垒的极性相反，P 区的多子（空穴）在正极性电压的驱使下进入势垒区；N 区的多子（电子）在负极性电压的驱动下也进入势垒区，这将使势垒区的部分正、负离子被中和，导致势垒区变窄，势垒降低，有利于多数载流子的扩散运动，形成较大的扩散电流。但势垒区的变窄，内电场的减弱，却不利于少子的漂移运动，致使漂移电流可以忽略。正向电压下的电流称为正向电流，因此正向电流主要由扩散电流构成，它随着正向电压的增加而增大。所以，PN 结加正向偏压时是导通的。

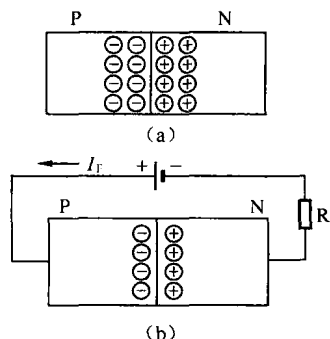


图 1-2-3 PN 结外加正向电压

2. PN 结外加反向电压 (PN 结截止)

如果将外部电压的负端接 P 区, 正端接 N 区, 称为外加反向电压, 或称反向偏置 (反偏), 如图 1-2-4 (b) 所示。由于外加电压的极性与内势垒极性相同, P 区的空穴将离开势垒区向电源负极运动; N 区电子也将离开势垒区向电源正极运动, 于是在势垒区就出现了更多的正、负离子, 使势垒区展宽, 势垒增高, 必然对多子的扩散产生影响, 使扩散电流减少, 随着外加电压的增大, 扩散电流很快减到零。剩下的漂移电流, 则基本不随外加电压而改变。这是因为漂移电流是由本征激发产生的少子形成的, 当温度一定时, 便是一个定值。反向电压作用下的漂移电流, 称为反向电流, 由于它不随反向电压而改变, 故称为反向饱和电流。因此, 当 PN 结反向偏置时, 基本是不导通的。但当温度升高时, 由于本征激发而产生的少数载流子增多, 反向电流也就增大。温度每升高 1°C 时, 反向电流增加约 7%。因为 $(1.07)^{10} \approx 2$, 故可认为, 温度每升高 10°C 时, 反向电流增加一倍。

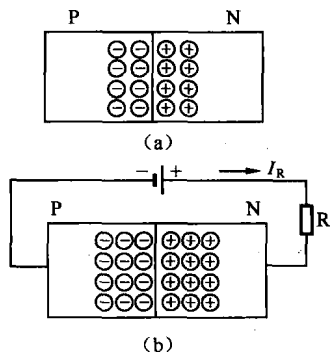


图 1-2-4 PN 结外加反向电压

3. 伏安特性

单向导电是 PN 结的重要特性。这一特性可用以下伏安特性方程描述:

$$i = I_s(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) = I_s(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-2-1)$$

式中, u 为 PN 结两端外加电压, i 为流过 PN 结的电流, I_s 为反向饱和电流, $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量, 其中 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻耳兹曼常数, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电荷量, T 为绝对温度。在常温 (300 K) 下, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。根据方程绘出的伏安特性曲线, 如图 1-2-5 所示。

当外加正向电压, 且 u 比 U_T 大数倍时, 由于式 (1-2-1) 中的 $e^{\frac{u}{U_T}} \gg 1$, 故式 (1-2-1) 可简化为 $i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$, 即正向电流随正向电压呈指数规律增大。如图 1-2-5 中伏安特性曲线的 OA 段。

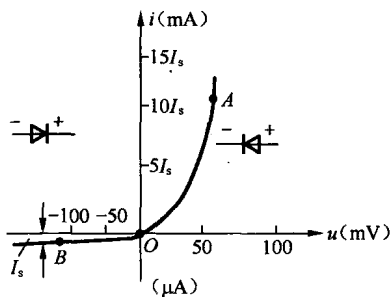


图 1-2-5 伏安特性曲线

当外加反向电压, 且 $|u|$ 比 U_T 大数倍时, 由于 $e^{\frac{u}{U_T}} \ll 1$, 故式 (1-2-1) 可简化为 $i \approx -I_s$, 即反向电流在一定温度下, 不随外加反向电压而变, 如图 1-2-5 中曲线的 OB 段。可见 PN 结的伏安特性是非线性的。

1.2.3 温度对伏安特性的影响

当温度升高时, 由于分子的热运动加剧, 载流子动能加大, 所以在 u_{BE} 还未达到导通电压值时, 就有大量载流子越过发射结扩散到基区, 表现在 PN 结的特性上, 正向特性使曲线略向上移; 少数载流子浓度迅速增加而导致反向饱和电流 I_s 显著增大, 使反向特性曲线下移, 如图 1-2-6 所示。实验结果表明, PN 结的 I_s 随温度变化, 在工程估算时可认为温度每升高 10°C , I_s 增加一倍。

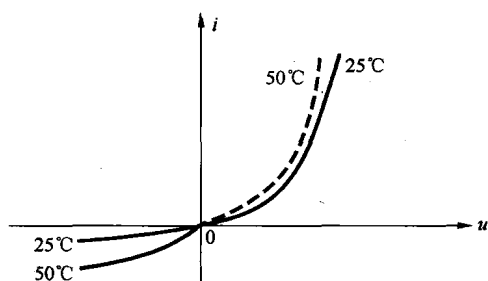


图 1-2-6 PN 结的温度特性

当温度进一步升高时，少数载流子浓度会迅速地增加。在极端情况下，甚至会超过原掺入的杂质电离产生的多数载流子的数量。这时本征激发的作用上升为主导地位，杂质半导体变得与本征半导体相似，PN 结就不复存在了。因此，为了保证 PN 结的正常工作，半导体元器件应有一个最高工作温度限额。其值与掺杂浓度有关，掺杂浓度越大，最高温度就越高。最高温度还与半导体材料中的价电

子突破束缚所需要的激发能有关。硅与锗相比，硅所需激发能较大，所以工作温度也较高。硅的最高工作温度不超过 200℃，锗的最高工作温度不超过 100℃。

1.2.4 PN 结的反向击穿

在测量 PN 结的伏安特性时，如果外加的反向电压增大到一定数值时，反向电流会突然增加，如图 1-2-7 所示。把这种现象称为 PN 结的反向击穿，发生击穿所需要的电压称为击穿电压 U_B 。PN 结被击穿后，如果对其电流不加限制，PN 结有可能由于过热而造成永久性损坏。

PN 结反向击穿的物理原因有如下两种。

1. 齐纳击穿

在高浓度掺杂的情况下，PN 结的势垒区很窄，较小的反向电压就可在结内形成很强的电场，把某些共价键内的价电子强拉出共价键，使载流子迅速增加，导致反向电流剧增，这种现象称为齐纳击穿。

2. 雪崩击穿

在低掺杂浓度下 PN 结的势垒区相对较宽，较高的反向电压还不足以在结内产生过强的电场，但由于载流子穿过结的路程较长，在获得足够的能量后，高速与原子碰撞，把价电子从共价键中撞出来，产生新的电子空穴对。这些新的载流子被电场加速后，又可撞出其他的价电子，载流子会雪崩式地倍增，导致反向电流激增，这种现象称为雪崩击穿。

对应硅材料的 PN 结，一般击穿电压在 7 V 以上的为雪崩击穿，4 V 以下的为齐纳击穿。而在 4~6 V 之间的击穿，可能两种情况都有，无论哪种击穿，击穿本身并没有破坏 PN 结，当反向电压降下来之后，其性能可以恢复。但必须对反向电流加以限制，否则当反向电流和反向电压的乘积超过 PN 结的耗散功率时，会由于过热而造成永久性损坏。

1.2.5 PN 结的电容效应

1. 势垒电容 C_B

当 PN 结外加正向电压增大时，P 区和 N 区的多子便进入势垒区，并与那里的一部分正、负离子相中和，使空间电荷减少，势垒区变窄。反之，当外加反向电压的数值增大时，多子远离 PN 结，使势垒区的空间电荷增多，势垒区变宽。外加电压的变化，引起了 PN 结空间电荷的改变，从而显示出 PN 结的电容效应。通常把由势垒区宽窄变化所呈现出的电容

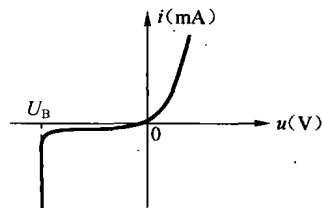


图 1-2-7 PN 结的击穿

效应称做势垒电容 C_B 。分析表明, 势垒电容的大小与 PN 结的面积成正比, 与势垒区的宽度成反比, 因此它与平行板电容器相似。只是势垒电容随外加电压而改变, 当反向偏压增加时, 会因势垒区变宽, 而使 C_B 减小; 当正向偏置时, 会因势垒区变窄, 而使 C_B 增大。一般情况下势垒电容为几个皮法至 200pF。

2. 扩散电容 C_D

PN 结的正向电流是由 P 区空穴和 N 区电子相互扩散形成的。为了使 P 区形成扩散电流, 注入的少数载流子电子沿 P 区必然有浓度差, 在结的交界处浓度大, 离结远的地方浓度小, 也就是在 P 区有电子的积累, 同理, 在 N 区也有空穴的积累。当 PN 结正向电压加大时, 正向电流随着加大, 就要有更多的载流子积累起来以满足电流加大的要求; 而当正向电压减小时, 正向电流减小, 积累在 P 区的电子或 N 区的空穴就要相对减小, 从而显示出 PN 结的电容效应。通常把扩散引起的电容效应称为扩散电容 C_D 。

总之, PN 结有两种电容效应, 等效为与 PN 结并联, 其总电容值为两者之和, 即, $C_0 = C_B + C_D$ 。显然, 正向偏置时, PN 结的结电容以扩散电容为主; 反向偏置时, 以势垒电容为主。

复习思考题

1-2-1 PN 结是怎样形成的? 写出 PN 结的伏安特性方程, 画出伏安特性曲线, 说明它的特点。

1-2-2 既然 PN 结两端存在着电位差, 则将 PN 结短路是否应该有电流流过?

* 1-2-3 将裸露的 PN 结两端接一个微安表, 不接任何电源, 问放在光照之下微安表是否有指示?

1.3 半导体二极管

一个 PN 结加上相应的电极引线并用管壳封装起来 (集成电路则不单独封装), 就构成了半导体二极管, 简称二极管。

1.3.1 二极管的结构和符号

二极管的结构和符号, 如图 1-3-1 所示。

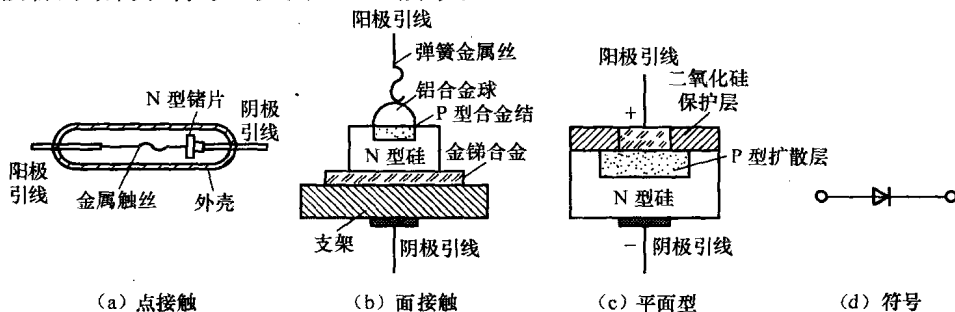


图 1-3-1 二极管的结构和符号

点接触型二极管金属丝很细,形成的PN结面积很小,所以结电容很小,一般在1 pF以下,因此工作频率很高,可达100 MHz以上。其缺点是不能承受较高的正向电压和通过大的电流。因此,多用于高频检波及脉冲数字电路中的开关元件。

面接触型的二极管PN结面积大,结电容也大,因此工作频率低。但是,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,所以多用在低频整流电路中。

1.3.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性可以通过逐点测试描绘,也可以从晶体管图示仪直接描绘。由于二极管是由一个PN结构成的,所以它具有PN结的导电特性。其伏安特性方程式为式(1-2-1),即

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

由于受二极管引线及半导体的体电阻、表面漏电流等因素的影响,实测二极管的伏安特性与按PN结方程式画出的理论伏安特性存在差异。但是,由于理想伏安特性曲线基本上反映了二极管的特性,所以在定量分析中,式(1-2-1)还是有效的。图1-3-2所示为不同材料(硅、锗)构成的二极管的伏安特性曲线。

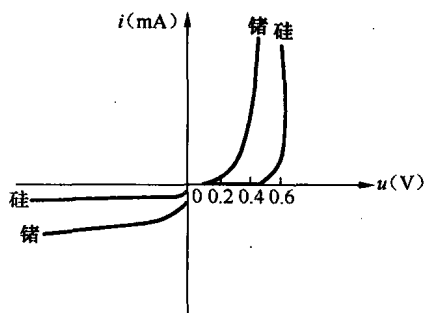


图 1-3-2 二极管伏安特性曲线

可以看出,二极管正向偏置时,外加正向电压大于某值电流才能迅速增加,定义该电压值为二极管死区电压 U_d 。锗和硅二极管的死区电压分别为0.1 V和0.5 V。

1.3.3 二极管的主要参数

二极管的参数一般可以从器件手册中查到,也可从特性曲线上求出,或直接测量得到。

1. 最大整流电流 I_F

指二极管长期运行时允许承受的最大正向平均电流,其大小由PN结的面积和散热条件决定。

2. 最大反向工作电压 U_R

指二极管运行时允许承受的最大反向电压。为避免二极管反向击穿,通常将二极管反向击穿电压 U_B 的一半定为 U_R 。

3. 反向电流 I_R

它是管子未击穿时反向电流的数值。反向电流越小,管子的单向导电性越好。温度对反向电流影响很大,在使用时应加以注意。

4. 最高工作频率 f_M

它主要决定于PN结结电容的大小。使用时,如果工作频率超过 f_M ,二极管的单向导电性将因结电容的存在变差。

应当指出,由于制造工艺的限制,即使同一型号的器件其参数的分散性也很大。选用器