

电子线路基础

DIAN ZI XIAN LU JI CHU

孙肖子
张畴先 编
谈文心
张企民

西安电子科技大学出版社

电子线路基础

孙肖子 张畴先 编
谈文心 张企民

西安电子科技大学出版社

2000

(陕) 新登字 010 号

内 容 简 介

本书内容包括: PN 结基本理论; 晶体二极管、三极管、场效应管的原理、特性及其模型参数; 放大器的基本组态及它们的基本性能分析; 放大器的频率响应; 负反馈在放大器中的应用; 集成运算放大器电路、集成运算放大器应用; 功率电路; 正弦振荡器; 调制、解调及 V/F、F/V 变换。最后介绍几个实际的、典型的电子线路子系统, 以增强同学们分析复杂电路的能力。

本书可作为高等学校通信、电子系统、电子工程、自动控制、工业自动化、检测技术和仪器等专业本科和大专的“低频电子线路”及“电子技术”的教材和参考书, 也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

电子电路基础

孙肖子 张畴先 编
谈文心 张企民
责任编辑 谭玉瓦

西安电子科技大学出版社出版

中铁一局印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张:19.5 字数:460 千字

1994 年 2 月第 1 版 2000 年 11 月第 6 次印刷 印数 24 001—28 000

ISBN 7-5606-0306-8/TN · 0078(课) 定价:17.50 元

前 言

《电子线路基础》由西安电子科技大学、西北工业大学、西安交通大学三所院校的有关教师联合编写。编写本书的依据是国家教委工科电工课程教学指导委员会审订通过的有关“电子线路”和“电子技术”课程的教学基本要求。编写本书的目的是为了进一步深化“电子线路”和“电子技术”课程的教学改革，满足电子类和非电子类低频电子线路和电子技术基础教材的需要。编写本书过程中，编者力求做到以下几点：1) 在满足基本要求的前提下，根据实际需要，尽量拓宽知识面；2) 叙述简练、深入浅出、可读性好；3) 尝试将电子线路和电子技术两种课程设置融为一体，使教材更适应宽口径要求。

本书内容共分十二章。其中负反馈一章的计算大为简化，并使其分析方法与运算放大器完全取得一致。本书集成运算放大器电路及应用得到了加强。“功率电路”将低频功放和直流电源合为一章，并介绍了集成功放、集成稳压器及开关稳压电源的工作原理。正弦振荡器及调制、解调、 V/F 、 F/V 变换两章基本上概括了非线性电子电路的内容，这两章主要为非电子类专业而设置的，对于通信电子类专业因为有“高频电子线路”这门课，故这两章可以不讲。最后一章为电子电路子系统举例，通过几个典型电路的分析，进一步引导学生将已学内容连贯起来，灵活运用，从而提高分析复杂电路的能力。

本书第六、十一、十二章由西安电子科技大学孙肖子老师编写；第五、八、九章由西北工业大学张畴先老师编写；第三、四、十章由西安交通大学谈文心老师编写，第一、二、七章由西安电子科技大学张企民老师编写，孙肖子、张畴先对部分章节做了较大的修改，孙肖子负责全书统稿工作。

本书可作为高等学校通信、电子系统、电子工程、自动控制、工业自动化、检测技术与仪器专业的本科和大专的“低频电子线路”及“电子技术基础”等课程的教材和参考书，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

由于时间比较仓促，书中必有不少问题，恳切希望广大教师、同学和读者提出批评和指正。

目 录

第一章 PN 结与半导体二极管	1	3-2-2 偏置电路	39
§ 1-1 半导体物理基础知识	1	§ 3-3 交流工作状态及主要性能分析	42
1-1-1 本征半导体	1	3-3-1 图解分析法	42
1-1-2 杂质半导体	3	3-3-2 交流等效电路分析法	45
1-1-3 半导体中的电流	4	§ 3-4 共集电极组态和共基极组态	50
§ 1-2 PN 结及其特性	5	3-4-1 共集电极组态电路	50
1-2-1 PN 结的形成	5	3-4-2 共基极组态电路	55
1-2-2 PN 结的单向导电特性	6	3-4-3 三种基本组态放大器的比较	56
1-2-3 PN 结的击穿特性	7	§ 3-5 放大器的级联	57
1-2-4 PN 结电容	7	3-5-1 级间耦合	57
1-2-5 PN 结的温度特性	9	3-5-2 组合电路及多级放大器	58
§ 1-3 半导体二极管	9	习题	62
1-3-1 二极管特性曲线	9	第四章 场效应管及其放大电路	69
1-3-2 二极管的主要参数	10	§ 4-1 结型场效应管	69
1-3-3 二极管简单应用电路	11	4-1-1 结型场效应管的基本工作原理	69
1-3-4 稳压二极管	14	4-1-2 N 沟道结型场效应管的特性曲线	71
习题	15	§ 4-2 绝缘栅场效应管	73
第二章 双极型晶体管	18	4-2-1 绝缘栅场效应管的基本结构、类型及电路符号	73
§ 2-1 双极型晶体管的工作原理	18	4-2-2 N 沟道增强型 MOSFET	74
2-1-1 晶体管中载流子的传输过程	19	4-2-3 其它类型的 MOSFET	76
2-1-2 电流分配关系	19	4-2-4 VMOS 场效应管	76
2-1-3 晶体管的放大作用	20	§ 4-3 场效应管与双极型管的简单比较	77
§ 2-2 晶体管特性曲线	21	§ 4-4 场效应管基本放大电路	78
§ 2-3 晶体管的主要参数	23	4-4-1 场效应管的直流偏置电路	78
§ 2-4 晶体管等效电路	25	4-4-2 场效应管的小信号交流等效电路及参数	79
2-4-1 直流等效电路	25	4-4-3 场效应管的三种基本组态电路及性能比较	80
2-4-2 小信号交流等效电路	27	习题	83
习题	32	第五章 放大器的频率响应	86
第三章 放大器基础	34	§ 5-1 频率特性的主要特征参数及波特图表示方法	86
§ 3-1 基本放大器电路的组成及其工作原理	34	5-1-1 频率特性的特征参数	86
3-1-1 电路组成及各元件的作用	34	5-1-2 频率特性的波特图表示方法	87
3-1-2 基本放大原理及电流电压波形	35		
3-1-3 放大器的主要性能指标	36		
§ 3-2 直流工作状态分析及偏置电路	38		
3-2-1 直流工作状态分析——估算法	38		

§ 5-2 单级放大器的频率特性	92	7-3-1 零点漂移现象	141
5-2-1 晶体管的高频等效电路模型 及频率参数	92	7-3-2 差动放大电路的工作原理及 性能分析	142
5-2-2 共发射极放大电路的频率特性	94	7-3-3 具有恒流源的差动放大电路 ..	145
5-2-3 共集电极电路和共基极电路的 频率特性	97	7-3-4 差动放大电路的传输特性	147
§ 5-3 多级放大器的频率特性	99	7-3-5 差动放大电路的失调及温漂 ..	149
5-3-1 多级放大器频率特性的 一般分析	100	§ 7-4 集成运算放大器的输出级电路	151
5-3-2 常用组合放大电路的频率响应	101	§ 7-5 集成运算放大器电路举例	153
习题	104	7-5-1 集成运算放大器 F007	153
第六章 负反馈在放大器中的应用	106	7-5-2 专用型集成运算放大器简介 ..	154
§ 6-1 反馈的基本概念及基本方程	106	§ 7-6 集成运算放大器的主要性能指标	155
6-1-1 什么是“反馈”	106	§ 7-7 MOS 集成运算放大器简介	156
6-1-2 反馈放大器的基本框图	106	7-7-1 MOS 集成运算放大器中的 基本单元电路	158
6-1-3 反馈放大器的基本方程	107	7-7-2 5G14573 CMOS 型集成 运算放大器	159
§ 6-2 负反馈对放大器性能的影响	108	习题	160
6-2-1 负反馈使放大倍数稳定度提高	108	第八章 集成运算放大器的应用	163
6-2-2 负反馈使放大器通频带展宽、 线性失真减小	109	§ 8-1 集成运算放大器的基本 应用电路	163
6-2-3 负反馈使非线性失真减小, 输入 动态范围展宽	111	8-1-1 理想化集成运算放大器的概念	163
6-2-4 负反馈可以减小放大器内部 产生的噪声与干扰的影响	112	8-1-2 反相和同相放大器	163
§ 6-3 反馈放大器的电路及分析计算	112	8-1-3 集成运算放大器组成电路 运算误差的初步讨论	165
6-3-1 反馈放大器的分类及输入、 输出电阻的计算	112	§ 8-2 集成运算放大器在信号模拟 运算中的应用	168
6-3-2 反馈放大器电路及计算举例 ..	116	8-2-1 符号变换器	168
§ 6-4 反馈放大器稳定性讨论	125	8-2-2 加法器	168
6-4-1 负反馈放大器稳定工作的条件	125	8-2-3 积分器	169
6-4-2 利用开环增益的波特图来判别 放大器的稳定性	126	8-2-4 微分器	170
6-4-3 常用的消振方法——相位 补偿法	127	8-2-5 对数与指数运算器	171
习题	130	§ 8-3 集成运算放大器在有源滤波 电路中的应用	173
第七章 集成运算放大器电路	136	8-3-1 有源滤波器的类型、传递 函数及幅频特性	173
§ 7-1 集成运算放大器的特点	136	8-3-2 无限增益多环反馈型二阶 有源滤波器	175
§ 7-2 电流源电路	137	8-3-3 压控电压源型二阶有源滤波器	177
§ 7-3 差动放大电路	141	8-3-4 几种常用的二阶带阻有源滤波器	178

8-3-5 全通有源滤波器	181	10-3-2 LC 正弦波振荡电路分析	243
8-3-6 状态变量型有源滤波器	182	§ 10-4 石英晶体振荡器	245
§ 8-4 集成运算放大器在信号变换 中的应用	182	10-4-1 频率稳定性和稳频措施	245
8-4-1 线性变换电路中的应用	182	10-4-2 石英晶体的基本特性及等效电路	246
8-4-2 非线性变换电路中的应用	185	10-4-3 石英晶体振荡电路	247
§ 8-5 集成运算放大器在电压比较 电路中的应用	190	习题	250
8-5-1 过零比较器	190	第十一章 调制、解调及 V/F-F/V 变换	254
8-5-2 迟滞比较器	191	§ 11-1 调制、解调的概念	254
8-5-3 窗孔比较器	193	11-1-1 模拟方法的三种基本调制方式	254
§ 8-6 集成运算放大器在波形产生 电路中的应用	195	11-1-2 数字调制	255
8-6-1 矩形脉冲产生器	195	11-1-3 脉冲调制	255
8-6-2 三角波产生器	196	11-1-4 多路调制和多路传输	255
8-6-3 多种波形产生器	199	§ 11-2 幅度调制	256
习题	200	11-2-1 标准调幅 (AM) 的基本特性	256
第九章 功率电路及系统	206	11-2-2 双边带调幅 (DSB AM) —— 平衡调幅	258
§ 9-1 功率放大器	206	11-2-3 单边带调幅 (SSB AM)	258
9-1-1 功率放大器的工作原理与 性能分析	206	11-2-4 混频	259
9-1-2 集成音频功率放大器电路举例	213	§ 11-3 模拟相乘器及 OTA 电路	260
9-1-3 VMOS 场效应管功率放大器	215	11-3-1 双差分模拟相乘器电路	261
§ 9-2 直流稳压电源	215	11-3-2 线性化的三差分模拟相乘器电路	263
9-2-1 整流滤波电路	216	11-3-3 可控跨导放大器 (OTA) 作为 相乘器	264
9-2-2 串联型直流稳压器	219	§ 11-4 角度调制	266
9-2-3 开关型稳压器 (SMR)	222	11-4-1 调频波与调相波的数学表达式	266
§ 9-3 功率管的散热与保护	227	11-4-2 调频波频谱	267
9-3-1 功率管的散热	227	11-4-3 调频波有效频谱宽度估算	268
9-3-2 功率管的保护电路	227	11-4-4 调频与调幅对比	268
习题	229	11-4-5 调频波的产生	269
第十章 正弦波振荡电路	233	§ 11-5 脉冲宽度调制 (PWM) 电路	271
§ 10-1 正弦波振荡的基本概念	233	§ 11-6 解调器	271
10-1-1 产生正弦波振荡的条件	233	11-6-1 调幅波的解调——检波器	272
10-1-2 振荡电路的组成及起振条件	234	11-6-2 调频波的解调	274
§ 10-2 RC 正弦波振荡电路	234	11-6-3 相敏检波器 (PSD)	278
10-2-1 文氏电桥振荡电路	235	§ 11-7 电压-频率变换器 (V/F) 和频率-电 压变换器 (F/V)	280
10-2-2 移相式振荡电路	237	11-7-1 电压-频率变换器	281
10-2-3 由集成电路构成的振荡器	239		
§ 10-3 LC 正弦波振荡电路	241		
10-3-1 LC 并联谐振回路的特性	241		

11-7-2 频率-电压变换器	282	12-2-1 系统功能及特点	290
习题	282	12-2-2 信号的主要通路	292
第十二章 电子电路子系统应用举例 ...	287	12-2-3 分块识别	292
§ 12-1 直流串激电动机的转速控制电路	287	12-2-4 统观整体、搞清整机原理	294
12-1-1 系统功能及特点	287	§ 12-3 传感器激励电路及信号预 处理电路	295
12-1-2 信号的主要通路	288	12-3-1 系统框图	295
12-1-3 分块识别	288	12-3-2 系统电原理图及各部分 工作原理	296
12-1-4 统观整体,搞清整机原理	290	习题	300
§ 12-2 数码开关控制型精密直流稳压电源	290	参考文献	301

第一章 PN 结与半导体二极管

本章主要讨论半导体的基本导电机理、PN 结及其特性。这部分内容是学习半导体器件的基础知识。然后介绍半导体二极管特性、参数和简单应用电路。

§ 1-1 半导体物理基础知识

按导电性能的不同,物质可分为导体、绝缘体和半导体。目前用来制造电子器件的材料主要是单晶半导体硅(Si)和锗(Ge)。它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,并且会随温度、光照或掺入某些其它物质而显著变化。要理解这些特性,就必须从半导体的原子结构谈起。

1-1-1 本征半导体

硅和锗都是四价元素,其原子结构中最外层轨道上有四个价电子。由于半导体的导电性能与价电子密切相关,所以为了突出价电子的作用,我们采用图 1-1 所示的简化原子结构模型。图中圆圈内的数字,表示原子核为中和最外层电子应具有的正电荷数。虚线圆上的黑点表示价电子。显然该图是硅或锗原子的简化模型。

纯净的半导体称为本征半导体。在本征硅和锗的单晶体中,原子按一定间隔排列成有规律的空间点阵(称为晶格)。由于原子间相距很近,价电子不仅受到自身原子核的约束,还要受到相邻原子核的吸引,使得每个价电子为相邻原子所共有,从而形成共价键。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键。依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图 1-2 是单晶硅和锗的共价键结构平面示意图。共价键中的电子,由于受到所属原子核的吸引,是不能在晶体中自由移动的,所以是束缚电子,不能参与导电。

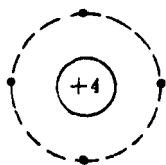


图 1-1 原子的简化模型

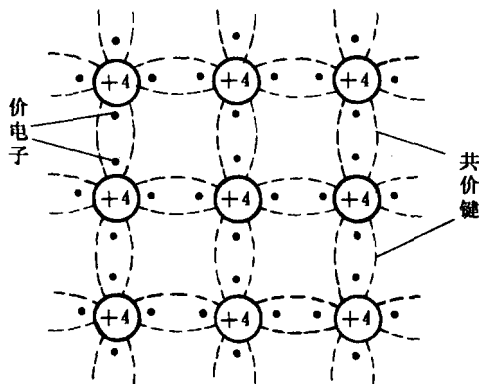


图 1-2 单晶硅和锗的共价键结构示意图

一、半导体中的载流子——自由电子和空穴

在绝对零度 ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 所有价电子都被束缚在共价键内, 晶体中没有自由电子, 所以半导体不能导电。当温度升高, 键内电子因热激发而获得能量。其中获得能量比较大的一部分电子, 能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子。与此同时在共价键内留下了与自由电子数目相同的空位, 如图 1-3 所示。

下面来看这些空位的作用。由图 1-2 可知, 完整的共价键, 价电子数等于原子核的正电荷数, 所以原子不显电性。现在空位处失去一个电子, 使得该处所属原子核多出了一个未被抵消的正电荷, 于是空位呈现出一个正电荷的电性。相邻共价键内的电子, 在正电荷的吸引下会填补这个空位, 从而把空位移到别处去。依此类推, 空位便可在整个晶体内自由移动。当有电场作用时, 价电子定向地填补空位, 使空位作相反方向的移动。这与带正电荷的粒子作定向运动的效果完全相同。由此可见, 空位既显一个正电荷, 又能在电场作用下作定向运动。因此, 可以把空位视为一种带正电荷的粒子, 并称之为空穴。这样由于热激发, 在本征半导体中存在

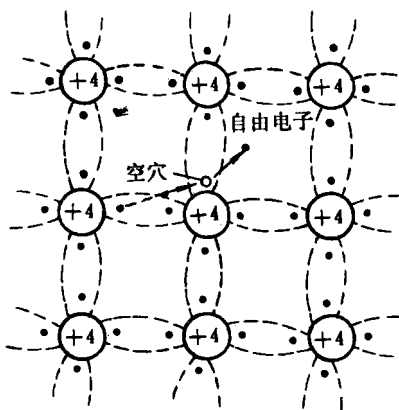


图 1-3 本征激发产生电子和空穴

有两种极性的载流子: 带负电荷的自由电子 (简称为电子) 和带正电荷的空穴。

本征半导体受外界能量 (热能、电能和光能等) 激发, 同时产生电子空穴对的过程, 称为本征激发。

二、本征载流子浓度

在本征半导体中, 由于本征激发, 不断地产生电子空穴对, 使载流子浓度增加。与此同时又会有相反的过程发生。由于正负电荷相吸引, 使电子和空穴在运动过程中相遇, 这时电子又会“填入”空穴成为价电子, 同时释放出原来吸收的能量, 从而消失一对电子、空穴。这一过程称为复合。显然载流子浓度越大, 复合的机会就越多。这样在一定温度下, 当没有其它能量存在时, 电子、空穴对的产生与复合最终会达到一种热平衡状态。使本征半导体中载流子的浓度一定。理论分析表明, 本征载流子的浓度为

$$n_i = p_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_{g0}/2kT} \quad (1-1)$$

式中 n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度 (cm^{-3}), T 为热力学温度 (K), k 为玻尔兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-6} \text{ V/K}$), E_{g0} 为 $T=0 \text{ K}$ 时的禁带宽度 (硅为 1.21 eV , 锗为 0.785 eV), A_0 是与半导体材料有关的常数 (硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$)。

在 $T=300 \text{ K}$ 时, 由式 (1-1) 可以求得本征硅 (锗) 的载流子浓度为 $1.43 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($2.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)。而硅 (锗) 的原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ($4.4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$), 相比之下可以看出, 室温下只有极少数原子 (对硅约三万亿分之一) 的价电子受激发产生电子空穴对。因此, 本征半导体的导电能力是很弱的。

由式 (1-1) 还可以看出, 本征载流子浓度随温度升高近似按指数规律增大, 所以半导体的导电性能对温度非常敏感。

1-1-2 杂质半导体

在本征半导体中,有选择地掺入少量其它元素,会使其导电性能发生显著变化。这些少量元素统称为杂质。掺入杂质的半导体称为杂质半导体,根据掺入的杂质不同,有N型半导体和P型半导体两种。

一、N型半导体

在本征硅(或锗)中,掺入少量的五价元素,如磷、砷、锑等,就得到N型半导体。这时杂质原子顶替了晶格中的某些硅原子,它的四个价电子和周围四个硅原子组成共价键,而多出一个价电子只能位于共价键之外,如图1-4所示。由于这个键外电子受杂质原子的束缚力很弱,只需很小激发能便可挣脱杂质原子的束缚,成为自由电子。因此,室温下几乎全部的杂质原子都能提供一个自由电子,使N型半导体中的电子数大大增加。因为这种杂质原子能“施舍”出一个电子,所以称为施主原子(杂质)。

施主原子失去一个价电子后,便成为正离子,由于施主离子被束缚在晶格中,不能自由移动,所以不能参与导电。

在杂质半导体中,本征激发依旧进行,产生电子空穴对。但由于掺入施主杂质后电子数目大大增加,造成空穴与电子复合的机会也大大增加,从而使空穴浓度远低于它的本征浓度值。因此,在N型半导体中,电子浓度远大于空穴浓度。因为电子占多数,故称它为多数载流子,简称多子;而空穴占少数,故称它为少数载流子,简称少子。由于N型半导体主要靠电子导电,所以又称为电子型半导体。

应当指出,在N型半导体中,虽然自由电子数远大于空穴数,但由于施主离子的存在,使正、负电荷数相等,即自由电子数等于空穴数加正离子数,所以整个半导体仍然是电中性的。

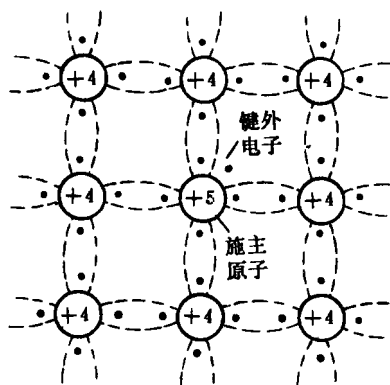


图 1-4 N型半导体原子结构示意图

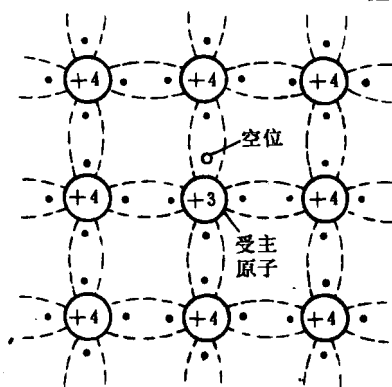


图 1-5 P型半导体原子结构示意图

二、P型半导体

在本征硅(或锗)中,掺入少量的三价元素,如硼、铝、镓等,就得到P型半导体。这时杂质原子顶替了晶格中的某些硅原子,它的三个价电子和相邻的四个硅原子组成共价键时,只有三个共价键是完整的,第四个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位,如图1-5所示。由于空位的存在,使邻近共价键内的电子只需很小能量的激发便能填补这个空位,使杂质原子因多一个价电子而成为负离子。同时在邻近产生一个空穴。由于这种杂质原子能

接受价电子，所以称为受主原子（杂质）。在室温下几乎全部的受主原子都能接受一个价电子而成为负离子，同时产生相同数目的空穴，所以在 P 型半导体中，空穴浓度大大增加。

与 N 型半导体中的情况相似，在 P 型半导体中，空穴浓度远大于电子浓度。空穴为多数载流子，而电子为少数载流子。因 P 型半导体主要靠空穴导电，所以又称为空穴型半导体。

在 P 型半导体中，空穴数等于自由电子数加受主负离子数，整个半导体也是电中性的。

通过以上分析可知，在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要由掺杂浓度决定，控制掺杂便能控制其浓度，与温度的变化关系不大。而少数载流子浓度主要由本征激发决定，所以受温度变化的影响很大。

1-1-3 半导体中的电流

了解了半导体中的载流子情况之后，就可以讨论它的电流。在半导体中有两种电流。

一、漂移电流

在电场作用下，半导体中的载流子作定向漂移运动形成的电流，称为漂移电流。它类似于金属中的传导电流。

在半导体中有两种载流子——电子和空穴，当外加电场时，电子逆电场方向作漂移运动，形成电子电流 I_n ，而空穴顺电场方向作漂移运动，形成空穴电流 I_p 。虽然它们运动的方向相反，但是电子带负电，其电流方向与运动方向相反，所以 I_n 和 I_p 的方向是一致的。因此，半导体中的总电流为两者之和，即

$$I = I_n + I_p \quad (1-2)$$

漂移电流的大小将由半导体中载流子浓度、迁移速度及外加电场的强度等因素决定。

二、扩散电流

在半导体中，当载流子的浓度分布不均匀时，载流子将由浓度大的地方向浓度小的方向作扩散运动，从而形成扩散电流。

半导体中某处的扩散电流主要取决于该处载流子的浓度差（即浓度梯度）。浓度差越大，扩散电流越大，而与该处的浓度值无关。反映在浓度分布曲线上（见图 1-6），扩散电流即正比于浓度分布线上某点处的斜率 dn/dx (dp/dx)。

为了反映半导体中载流子浓度的分布情况，进而确定其扩散电流的大小，通常采用浓度分布曲线来表示。如图 1-6 所示。图中 $n(x)$ 表示 x 处的电子浓度， $p(x)$ 表示相应的空穴浓度。由图中的电子（空穴）浓度分布曲线可知，该半导体的右端电子（空穴）浓度最大，沿 x 方向浓度按指数规律减小，最后趋向平衡值 n_0 (p_0)。因此，该半导体中的扩散电流，也有上述的变化规律，即沿 x 方向扩散电流逐渐减小，最后趋向于零。

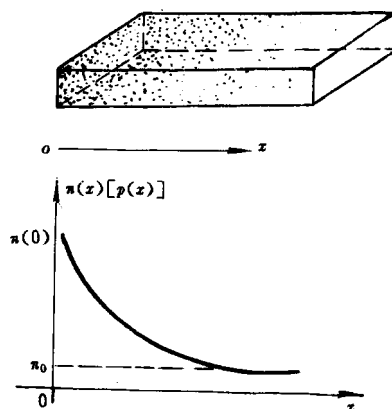


图 1-6 半导体中载流子的浓度分布

§ 1-2 PN 结及其特性

通过掺杂工艺,把本征硅(或锗)片的一边做成P型半导体,另一边做成N型半导体,这样在它们的交界面处会形成一个很薄的特殊物理层,称为PN结。PN结是半导体器件的基本组成部分。

1-2-1 PN 结的形成

P型半导体和N型半导体结合在一起时,因为P区一侧空穴多,N区一侧电子多,所以在它们的界面处存在空穴和电子的浓度差。于是P区中的空穴会向N区扩散,在P区留下不能移动的受主负离子,而在N区产生不能移动的施主正离子(这是因为复合扩散过来的空穴而失去电子所产生)。同样,N区中的电子也会向P区扩散,在N区留下施主正离子,而在P区产生受主负离子(因复合电子产生),上述过程如图1-7(a)所示。这样在界面的两侧会形成由等量正、负离子组成的空间电荷区,如图1-7(b)所示。

由于空间电荷区的出现,在界面处产生了内建电位差 U_B ,形成一个方向由N区指向P区的内电场。该电场一方面会阻止多数载流子的扩散,另一方面将引起少数载流子的漂移,即P区中的电子向N区漂移,N区中的空穴向P区漂移。少子漂移的结果会使界面两侧的正、负离子成对减少。因此,在界面处发生着多子扩散和少子漂移两种对立的运动趋向。

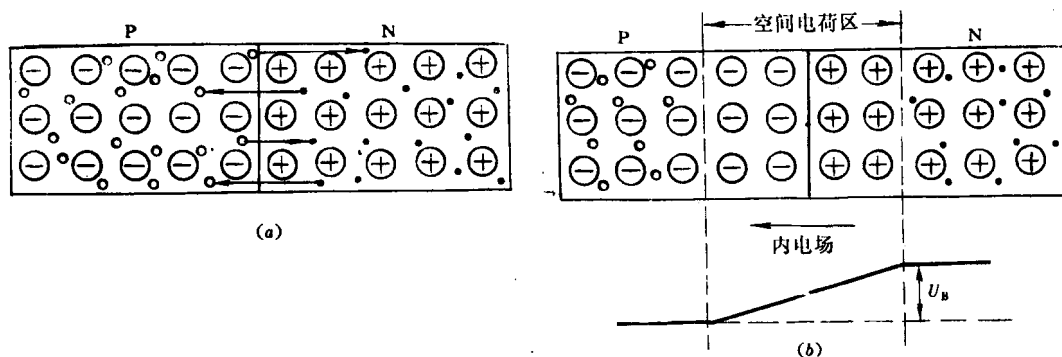


图 1-7 PN 结的形成

(a) 空穴和电子的扩散; (b) 平衡时的 PN 结

开始时,扩散运动占优势,随着扩散运动的不断进行,界面两侧显露出的正、负离子逐渐增多,空间电荷区展宽,使内电场不断增强,于是漂移运动随之增强,而扩散运动相对减弱。最后,因浓度差而产生的扩散力为电场力所抵消,使扩散运动和漂移运动达到动态平衡。这时,虽然扩散和漂移仍在不断进行,但越过界面扩散过去多少载流子,就会有相同数目的载流子越过界面漂移回来,通过界面的净载流子数为零。平衡时,空间电荷区的宽度一定, U_B 也就保持一定,如图1-7(b)所示。

由于空间电荷区内没有载流子,所以空间电荷区又称为耗尽区(层),又因为空间电荷区的内电场对扩散有阻挡作用,好像壁垒一样,所以又称它为阻挡区或势垒区。

实际中,如果N区和P区的掺杂浓度相同,则耗尽区相对界面对称,称为对称结,见

图 1-7 (b)。如果一边掺杂浓度大(重掺杂), 一边掺杂浓度小(轻掺杂), 则称为不对称 PN 结, 用 P^+N 或 PN^+ 表示 (+ 号表示重掺杂区)。这时耗尽区主要伸向掺杂浓度小的一边, 如图 1-8 (a)、(b) 所示。

1-2-2 PN 结的单向导电特性

一、PN 结加正向电压

使 P 区电位高于 N 区电位

的接法, 称 PN 结加正向电压(或正向偏置), 如图 1-9 所示。由于耗尽层相对 P 区、N 区为高阻区, 所以外加电压绝大部分都降在耗尽区。在外加电压作用下, 多子被强行推向耗尽区中和部分正、负离子, 使耗尽区变窄, 内电场削弱。这样就破坏了原来扩散与漂移的平衡, 而有利于多子的扩散。这时多子源源不断地扩散到对方, 通过回路形成正向电流。外加电压后, 耗尽区两端的电位差变为 $U_B - U$, 由于 U_B 较小, 一般只有零点几伏, 所以不大的正向电压就可以使内电场有明显的削弱, 产生很大的正向电流。当正向电压有微小变化时, 也会引起正向电流较大的变化。

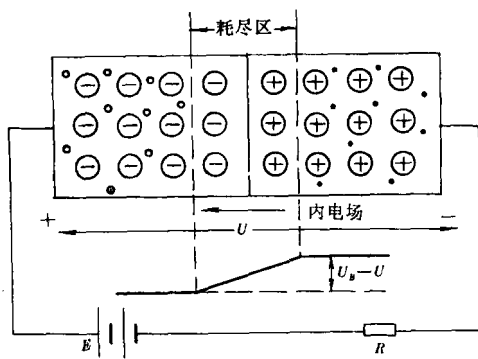


图 1-9 正向偏置的 PN 结

二、PN 结加反向电压

使 P 区电位低于 N 区电位的接法, 称 PN 结加反向电压(或反向偏置), 如图 1-10 所示。此时外电场强行将多子推离耗尽区, 让更多的正、负离子显露出来, 使耗尽区变宽, 内电场增强。这时多子的扩散无法进行, 而有利于少子的漂移。越过界面的少子, 通过回路形成反向(漂移)电流。因为少子浓度很低, 靠耗尽区边界处的少子数目不多, 所以反向电流很小。而且当反向电压增大使耗尽区向外扩展时, 其边界处的少子数目并无多大变化, 所以反向电流基本不随外加电压的增大而增加。

综上所述, PN 结加正向电压时, 电流很大, 并随外加电压有明显变化; 而加反向电压时, 电流很小, 且不随外加电压变化。因此, PN 结具有单向导电特性。

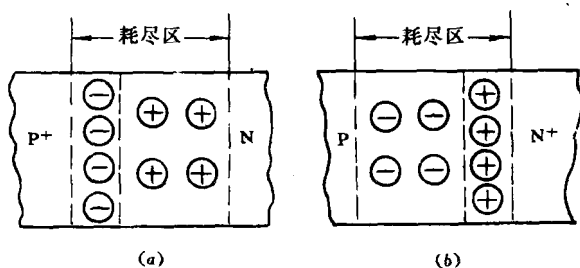


图 1-8 不对称 PN 结
(a) P^+N 结; (b) PN^+ 结

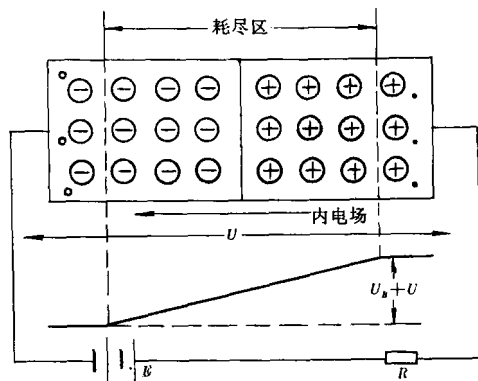


图 1-10 反向偏置的 PN 结

三、PN 结电流方程

理论分析证明, 流过 PN 结的电流 i 与所加电压 u 之间的关系为

$$i = I_s(e^{u/U_T} - 1) = I_s(e^{u/U_T} - 1) \quad (1-3)$$

式中 I_s 为反向饱和电流, 其大小与 PN 结的材料、结构、制作工艺、温度等有关。 $U_T = kT/q$, 称为温度的电压当量或热电压。在 $T = 300\text{ K}$ (室温) 时, $U_T = 26\text{ mV}$, 这是一个重要参数。

由式 (1-3) 可知, 加正向电压时, u 只要大于 U_T 几倍以上, $i \approx I_s e^{u/U_T}$, 即 i 随 u 呈指数规律变化; 加反向电压时, $|u|$ 只要大于 U_T 几倍以上, $i \approx -I_s$, 负号表示与正向参考电流方向相反。由式 (1-3) 可画出 PN 结的伏安特性曲线, 见图 1-11。图中 $|u| > U_{(BR)}$ 部分将在下面讨论。

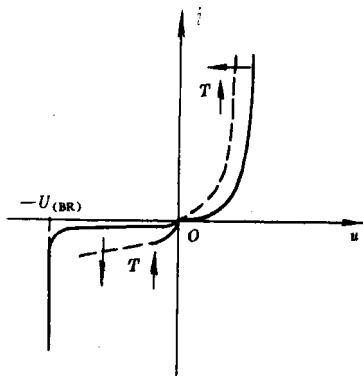


图 1-11 PN 结的伏安特性

1-2-3 PN 结的击穿特性

由图 1-11 看出, 当反向电压超过 $U_{(BR)}$ 后, $|u|$ 稍有增加时, 反向电流会急剧增大。这种现象称为 PN 结反向击穿, $U_{(BR)}$ 为 PN 结的击穿电压。PN 结发生反向击穿的机理可以分为以下两种。

一、雪崩击穿

在轻掺杂的 PN 结中, 外加反向电压时, 耗尽区较宽, 少数载流子漂移通过耗尽区时被加速, 动能增大。当反向电压大到一定值时, 在耗尽区内, 被加速而获得高能载流子的少数载流子, 在与中性原子的价电子相碰撞时, 会把价电子撞出共价键, 产生电子-空穴对。新产生的电子-空穴对被强电场加速后, 又会撞出新的电子-空穴对。这种连锁反应使耗尽区内的载流子数目剧增, 从而引起反向电流急剧增大。其现象类似于雪崩, 所以称为雪崩击穿。

二、齐纳击穿

在重掺杂的 PN 结中, 耗尽区很窄, 所以不大的反向电压就能使耗尽区内形成很强的电场。当反向电压大到一定值时, 强电场足以将耗尽区内中性原子的价电子直接拉出共价键, 产生大量电子-空穴对, 使反向电流急剧增大。这种击穿称为齐纳击穿或场致击穿。

一般来说, 对硅材料的 PN 结, $U_{(BR)} > 7\text{ V}$ 时为雪崩击穿; $U_{(BR)} < 5\text{ V}$ 时为齐纳击穿; $U_{(BR)}$ 介于 $5 \sim 7\text{ V}$ 时两种击穿都有。另外需要说明的是, 只要限制击穿时流过 PN 结的电流, 击穿并不损坏 PN 结。

1-2-4 PN 结电容

PN 结具有非线性电容特性, 按产生的原因不同可分为势垒电容和扩散电容两种。

一、势垒电容

从 PN 结的结构看, 在导电性能良好的 P 区和 N 区之间, 夹着一层高阻的耗尽区, 这与平板电容器相似。当外加电压增大时, 多数载流子推向耗尽区使正、负离子减少, 相当存储的电荷量减少; 当外加电压减小时, 多数载流子推离耗尽区使正、负离子增多, 相当存储的电荷量增加。

因此,耗尽区中的电荷量随外加电压变化而改变的特性,就形成了电容效应,称为势垒电容,用 C_T 表示。由理论分析得出

$$C_T = \frac{dQ}{du} \approx \frac{C_{T0}}{\left(1 - \frac{u}{U_B}\right)^n} \quad (1-4)$$

式中 C_{T0} 为外加电压 $u=0$ 时的 C_T 值,它由 PN 结的结构、掺杂浓度等决定。 U_B 为内建电势差。 n 为变容指数,与 PN 结的制作工艺有关。

二、扩散电容

正向偏置的 PN 结,由于多子扩散,会形成一种特殊形式的电容效应。下面利用图 1-12 中 P 区载流子的浓度分布曲线来说明。图中 n_{p0} 是 PN 结处于平衡状态(外加电压为零)时, P 区内电子的浓度值。PN 结加正向电压时,从 N 区扩散到 P 区的电子(称为非平衡少数子),由于不能立即被空穴复合而在边界处积累,然后边向 P 区纵深扩散边与空穴复合,经过一段距离 L_n 后才被全部复合掉。因此,在 L_n 这段扩散区内,非平衡电子形成了图中曲线①的浓度分布(由于非平衡电子的吸引, P 区空穴也会建立起相同的浓度分布)。这样在扩散区内就存贮了一定

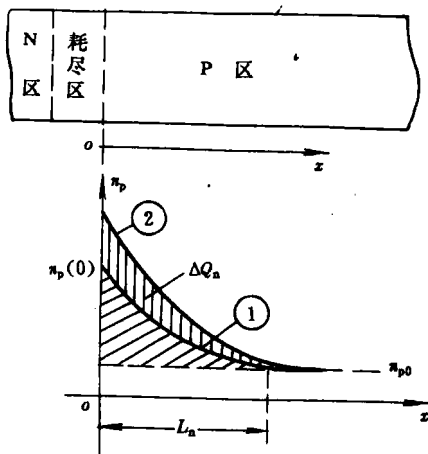


图 1-12 P 区少数子浓度分布曲线

数量的非平衡电子,其电荷量对应于曲线①下的面积。当正向电压增大,扩散到 P 区的电子数增加,非平衡电子的浓度分布线变陡,见曲线②(P 区空穴的浓度分布也作相应变化)。这时图中两条曲线之间的面积就是扩散区内存贮电荷的增加量 ΔQ_n 。同理, N 区内的空穴浓度也会发生同样的变化,引起存贮电荷的增加量 ΔQ_p 。这种外加电压改变引起扩散区内存贮电荷量变化的特性,就是电容效应,称为扩散电容,用 C_D 表示。

如果引起 ΔQ_n 、 ΔQ_p 的电压变化量为 Δu , 则

$$C_D = \frac{\Delta Q}{\Delta u} = \frac{\Delta Q_n}{\Delta u} + \frac{\Delta Q_p}{\Delta u}$$

对 PN^+ 结,可以忽略 $\Delta Q_p/\Delta u$ 项。并由理论分析得出

$$C_D \approx \frac{\Delta Q_n}{\Delta u} \approx \frac{\tau_n I}{U_T} \quad (1-5)$$

式中 τ_n 为 P 区非平衡电子的平均寿命。 I 为 PN 结电流,由式 (1-3) 确定。

由式 (1-4)、(1-5) 可知, C_T 、 C_D 都随外加电压变化而变化,所以势垒电容和扩散电容都是非线性电容。

势垒电容值和扩散电容值都与 PN 结的面积成正比。PN 结的总电容 C_j 为 C_T 、 C_D 之和,即 $C_j = C_T + C_D$ 。正偏时以 C_D 为主,反偏时以 C_T 为主。 C_T 和 C_D 一般都很小,所以在高频工作时,才考虑它们的影响。

1-2-5 PN 结的温度特性

PN 结特性对温度变化很敏感,反映在伏安特性上即为,温度升高,正向特性向左移,反向特性向下移,如图 1-11 所示。变化规律是,保持正向电流不变时,温度每升高 1°C ,结电压降低约 $2\text{ mV}\sim 2.5\text{ mV}$,即

$$\Delta u / \Delta T \approx -(2\text{ mV} \sim 2.5\text{ mV}) / ^{\circ}\text{C} \quad (1-6)$$

温度每升高 10°C ,反向饱和电流 I_s 增大一倍。如果温度 T_1 时 $I_s = I_{s1}$,温度 T_2 时 $I_s = I_{s2}$,则

$$I_{s2} \approx I_{s1} \cdot 2^{(T_2 - T_1) / 10} \quad (1-7)$$

当温度升高到一定程度时,由本征激发产生的少数浓度有可能超过掺杂浓度,使杂质半导体变得与本征半导体一样,PN 结就不存在了。因此,为了保证 PN 结正常工作,它的最高工作温度就有一个限制,对硅 PN 结约为 $(150 \sim 200)^{\circ}\text{C}$,锗 PN 结约为 $(75 \sim 100)^{\circ}\text{C}$ 。

§ 1-3 半导体二极管

半导体二极管是由 PN 结加上电极引线和管壳构成。其电路符号如图 1-13 (a) 所示,涂黑三角表示 P 区,短线表示 N 区。

二极管有许多类型。按材料分,常用的有硅管和锗管两种。按工艺结构分,普通二极管有点触型二极管、面触型二极管和硅平面型二极管,分别如图 1-13 的 (b)、(c)、(d) 所示。

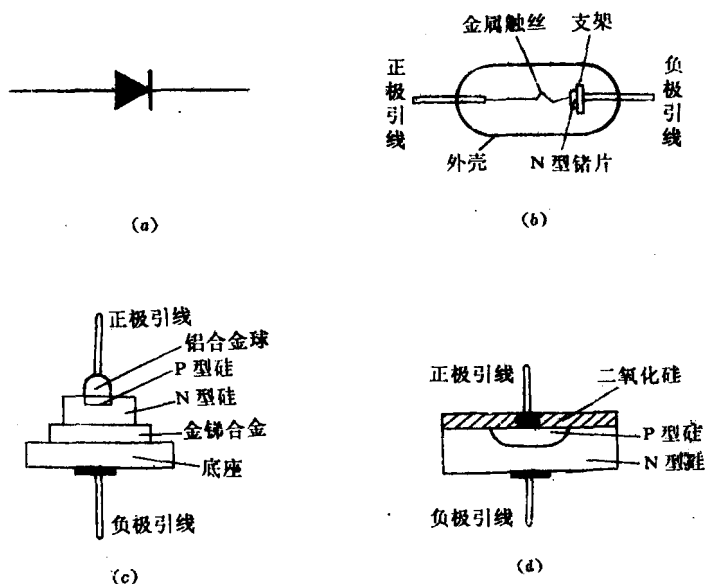


图 1-13 半导体二极管的符号和结构

(a) 符号; (b) 点触型; (c) 面触型; (d) 平面型

1-3-1 二极管特性曲线

普通硅二极管的典型伏安特性曲线如图 1-14 所示。实际二极管由于引线的接触电