

模拟集成电路

上册

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社

模拟集成电路

(上 册)

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 提 要

本书系根据国家教委批准颁布的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》，结合电信工程等通信类专业特点编写的，经多年使用修改后，由邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会评审通过推荐出版的八五规划教材。

本书分上、下册共 12 章。第 1 章，介绍器件与模型；第 2~5 章，介绍模拟集成电路的各种基本放大单元电路、集成运算放大器、反馈放大电路、放大电路的频率响应和相位补偿；第 6~12 章，介绍集成运算放大器的应用、集成功率放大器、正弦波振荡器、集成模拟乘法器及其基本运算电路、调制与解调电路、集成锁相环以及集成稳压器。各章后面附有习题。

本书可作为通信、电子、计算机和自动控制类专业的“线性电子电路”和“非线性电子电路”课程的本科教材，亦可供电子技术工程人员参考。

责任编辑：张 克

模 拟 集 成 电 子 电 路

(上 册)

王汝君 钱秀珍 编

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销

南京邮电学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17 字数 420 千

1993 年 12 月第 1 版 1994 年 5 月第 2 次印刷

印数：3001—6000 册

ISBN 7-81023-803-5/TN·63

定价：13.60 元

(上下册总价：24.00 元)

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

前 言

根据国家教委批准颁布的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》，结合电信工程等通信类专业特点编写的这本教材，经我院使用多年并作了三次修改后，于1991年由邮电部高等院校专业基础课教学指导委员会评审通过推荐出版。

本书包括三个部分共12章，上册第一部分《器件与模型》，即第1章器件与模型。第二部分《模拟集成电子电路基础》，即第2~5章，介绍模拟集成电路的各种基本放大单元电路、集成运算放大器、反馈放大器、放大电路的频率响应和相位补偿。下册第三部分《模拟集成电路与系统》，即第6~12章，介绍集成运算放大器的应用、集成功率放大器、正弦波振荡器、集成模拟乘法器及其基本运算电路、调制与解调电路、集成锁相环以及集成稳压器。

本书在编写时注意了这样几点：

1. 是以模拟集成电路为主的电子线路教材，也兼顾了分立元件电路。这是因为在一段时期内还将有相当数量的分立元件电路；同时，模拟集成电路和与之相应的分立元件电路，在电路原理、分析方法以及它们的功能方面也是基本一致的。本教材把集成运放作第三章，居负反馈放大电路和频响之前；把集成乘法器和锁相环都单独设章，更加突出集成电路为主的体系。

2. 加强了FET特别是MOSFET电路内容，并适当介绍了开关电容电路的内容，以适应电子技术越来越广泛的应用要求。

3. 注意到本课程的工程特点。在等效电路分析法中，BJT的模型主要使用简化的混合 π 模型，以简化电路的分析计算，同时更加突出了工作原理，便于理解基本概念。负反馈放大电路侧重于深负反馈条件下的分析计算等。

4. 注意结合电信工程等通信专业的特点。同时，把高频功率放大器等与之关系并不太大的内容略去，更有利于电子、计算机以及自动控制等类专业使用。

为提高本书的质量，特请国家教委电子线路教学指导小组组长、东南大学谢嘉奎教授作了仔细的审校，使本书在基本概念讲深、讲透，分析计算上注重工程估算，内容上注意引入新技术的几个特点上得到了进一步加强，在此表示衷心的感谢。

文中谬误、不妥之处，恳请读者批评、指正。

编者

1993年5月

常用文字符号表

1. 基本符号

U, u	电压
I, i	电流
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
$Z(j\omega) = R + jX$	阻抗
$Y(j\omega) = G + jB$	导纳
L	电感
C	电容
M	互感
T	热力学温度, 脉冲重复周期
t	时间, 摄氏温度
F, f	频率
ω, Ω	角频率
$S = \sigma + j\omega$	复频率
BW	带宽
NF	噪声系数

2. 电压、电流

大写 $U(I)$ 电压(电流)

下标大写表示直流电压(电流), 如 U_c, I_D

下标小写表示正弦电压(电流)有效值, 如 U_c, I_a

小写 $u(i)$ 电压(电流)

下标大写表示直流和交流电压(电流)总的瞬时值如 u_D, i_D

下标小写表示交流电压(电流)的瞬时值, 如 u_c, i_a

$\dot{U} = U(j\omega)$	正弦电压的复数值
$U(s)$	电压的拉氏变换
$U_m(I_m)$	正弦电压(电流)振幅值
$U_Q(I_Q)$	工作点直流电压(电流)
$u_i(i_i)$	输入交流电压(电流)瞬时值
$u_o(i_o)$	输出交流电压(电流)瞬时值
$u_s(i_s)$	交流信号源电压(电流)瞬时值
$A_u(A_i)$	电压(电流)增益
$\dot{A}$	增益的复数值

U_R	参考电压
$U_{IO}(I_{IO})$	输入失调电压(电流)
$U_{id}(U_{ic})$	差模输入电压(电流)
U_f	反馈电压有效值
$E_C(E_D), (E_+)$	正电源电压
$E_E(E_S), (E_-)$	负电源电压

3. 功率

P_i	输入信号功率
P_o	输出信号功率
P_C	集电极耗散功率
P_E	直流电源供给功率

4. 阻抗

R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
R_S	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_t	回路固有谐振电阻
R_T	电路有载谐振电阻
RP	电位计

5. 频率

f_0	回路固有谐振频率, 晶体串联谐振频率
ω_0	回路固有谐振角频率, 晶体串联谐振角频率
$f_o(f_{osc})$	振荡频率
ω_o	振荡角频率
f_L	3dB 下限频率(下截止频率)
f_H	3dB 上限频率(上截止频率)
f_{Ω}	调制信号频率
f_c	载波频率(载频)

6. 器件参数

D	二极管
T	晶体管(三极管), 场效应管
U_0	内建电位差, 势垒电压
U_{th}	导通电压、门限电压
I_S	PN 结反向饱和电流
U_{BR}	PN 结击穿电压
U_T	热电压
U_Z	稳压管的稳定电压
C_j	结电容

C_T	势垒电容
C_D	扩散电容
α	共基极短路电流传输系数
β	共发射极短路电流传输系数
f_α	共基极交流电流传输系数的截止频率
f_β	共发射极交流电流传输系数的截止频率
f_T	特征频率
r_e	发射结结电阻
$r_{bb'}$	基区体电阻
I_{CBO}	发射结开路时集电结反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
U_{CS}	集电极饱和压降
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时 C、B 结反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 C、E 结反向击穿电压
U_A	厄尔利电压
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
g_m	跨导
I_{DSS}	$U_{GS} = 0$ 时的饱和漏极电流
U_P	场效应管夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
$U_{(BR)DS}$	漏、源极间击穿电压

7. 其他符号

Q_0	回路空载品质因数或回路固有品质因数
Q_T	回路有载品质因数
η	效率
n	接入系数, 匝数比, 变容管的变容指数
N	匝数
Q	静态工作点
τ	时间常数
E	电场强度, 电子能量
F	反馈放大器的反馈深度
B	反馈系数
T	反馈放大器的环路增益
$G \cdot BW$	增益带宽积
K_{CMR}	共模抑制比
S	选择性
φ	角度

上册目录

1 器件与模型

1.1 半导体的导电特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 半导体中的导电过程	4
1.2 PN 结和二极管	5
1.2.1 PN 结的形成和接触电位差	5
1.2.2 PN 结的基本特性	6
1.2.3 晶体二极管的特性	10
1.2.4 二极管的近似电路模型	11
1.3 双极型晶体管	14
1.3.1 双极型晶体管的结构和电路符号	14
1.3.2 双极型晶体管的工作原理	15
1.3.3 双极型晶体管的伏安特性曲线	18
1.3.4 双极型晶体管的极限参数	22
1.3.5 双极型晶体管模型	23
1.4 场效应晶体管	28
1.4.1 MOS 场效应晶体管	28
1.4.2 结型场效应晶体管	33
1.4.3 场效应管的参数	34
1.4.4 场效应管的模型	38
1.5 模拟集成电路元、器件的结构特点	38
1.5.1 模拟集成电路中的元、器件	38
1.5.2 集成电路元、器件的特点	40
习题	41

2 基本放大单元电路

2.1 单管共射放大电路	44
2.1.1 放大电路的组成及工作原理	44
2.1.2 放大电路的图解分析法	48
2.1.3 放大电路的小信号等效电路分析法	52
2.2 放大电路稳定的直流偏置	55
2.2.1 静态工作点变动的原因及其影响	55
2.2.2 电流源偏置电路	56
2.2.3 分压式电流负反馈直流偏置电路	59

2.3 带有射极电阻 R_E 的共射放大电路	63
2.4 共集放大电路(射极输出器)	64
2.5 共基放大电路	67
2.6 场效应管的三种组态放大电路	69
2.6.1 场效应管放大电路的偏置电路	70
2.6.2 共源放大电路的交流分析	73
2.6.3 共漏放大电路(源极输出器)的交流分析	76
2.6.4 共栅放大电路的交流分析	77
2.7 双管放大电路	79
2.7.1 复合管及其放大电路	79
2.7.2 共射—共基(CE-CB)放大电路	80
2.7.3 共集—共基(CC-CB)放大电路	82
2.8 有源负载放大电路	82
2.9 差动放大电路	84
2.9.1 差动放大电路的工作原理	84
2.9.2 差动放大电路的小信号分析	86
2.9.3 差动放大电路的其他型式	89
2.9.4 差动放大电路的大信号分析	91
2.9.5 场效应管差动放大电路	93
2.9.6 差动放大电路的失调和漂移	93
2.10 多级放大电路	98
2.10.1 多级放大电路的组成	98
2.10.2 级间耦合方式	98
2.10.3 小信号多级放大电路的分析计算	100
习题	105
3 集成运算放大器	
3.1 集成运放的组成和主要技术参数	117
3.1.1 集成运放的组成方框图	117
3.1.2 集成运放的主要技术参数	119
3.2 BJT 集成运算放大器单元电路及典型产品分析	121
3.2.1 差动输入级的几种电路	121
3.2.2 电平位移电路	123
3.2.3 输出级电路	124
3.2.4 改进的电流源电路	125
3.2.5 BJT 集成运放典型产品分析	127
3.3 MOS 集成运放的单元电路及典型产品分析	132
3.3.1 改进型电流源	132
3.3.2 MOS 单级放大电路	133
3.3.3 改进的 FET 差放电路	136

3.3.4	双—单端转换电路与电平位移电路	136
3.3.5	输出级电路	137
3.3.6	MOS 集成运放举例	138
3.3.7	BiCMOS 集成运放举例	140
3.4	集成运放应用电路的基础电路	141
3.4.1	集成运放的理想化条件	141
3.4.2	反相输入放大器	142
3.4.3	同相输入放大器	143
3.5	集成运算放大器的误差分析	145
3.5.1	A_{ud} 、 R_{id} 为有限值引起的误差	145
3.5.2	共模抑制比为有限值引起的误差	146
3.5.3	输入失调电压 U_{io} 、电流 I_{io} 及其温漂引起的误差	146
3.6	运算放大器的宏模型	147
	习题	151
4	反馈放大电路	
4.1	负反馈放大电路的基本概念	157
4.1.1	负反馈放大电路的方框组成	157
4.1.2	反馈放大电路的电路类型及其判别	158
4.1.3	负反馈放大电路的基本关系式	161
4.2	负反馈对放大电路特性的影响	164
4.2.1	负反馈提高增益稳定性	164
4.2.2	负反馈展宽放大电路的频带	166
4.2.3	负反馈减小放大电路的非线性失真	166
4.2.4	负反馈调节放大电路输入电阻和输出电阻	168
4.3	负反馈放大电路的分析计算	172
4.3.1	负反馈放大电路的拆环方法	173
4.3.2	深负反馈放大电路放大倍数的近似估算	175
4.3.3	负反馈放大电路的框图计算法	180
4.4	双环反馈放大电路	183
	习题	184
5	放大电路的频率响应和相位补偿	
5.1	放大电路频率响应的概念和分析方法	191
5.1.1	放大电路的频率响应和频率失真	191
5.1.2	网络函数和零、极点	193
5.1.3	上、下限频率的计算	197
5.2	共射电路的高频响应	202
5.2.1	集成晶体管的高频小信号模型	202
5.2.2	晶体管的高频参数	202
5.2.3	单级共射电路的高频响应	205

5.2.4	高频特性的近似图示法	209
5.2.5	共射级联放大电路的高频响应	212
5.3	共集和共基电路的高频响应	215
5.3.1	共集电路的高频响应	215
5.3.2	共基电路的高频响应	217
5.4	场效应管放大电路的高频响应	218
5.4.1	场效应管的高频模型	218
5.4.2	单级共源电路的高频响应	219
5.4.3	共漏电路的高频响应	220
5.5	集成宽带放大器	221
5.5.1	增益带宽积	221
5.5.2	组合电路展宽频带	221
5.5.3	负反馈展宽频带	223
5.6	耦合电容和旁路电容对频率特性的影响	225
5.7	负反馈放大电路的自激和相位补偿	227
5.7.1	自激概念和自激条件	227
5.7.2	自激判别	228
5.7.3	BJT 集成运放的相位补偿技术	230
5.7.4	MOS 集成运放的相位补偿技术	233
5.8	窄带放大电路	234
5.8.1	概述	234
5.8.2	集中选频放大电路	237
5.8.3	LC 谐振放大电路	237
5.8.4	RC 选频放大电路	243
5.9	放大电路的噪声	245
5.9.1	噪声的来源	246
5.9.2	信噪比与噪声系数	246
5.9.3	噪声温度	247
5.9.4	双极型晶体管、场效应管和运算放大器的噪声	248
	习题	251
	参考书目	258

器件与模型

电子电路可以是由分立的半导体器件(二极管、晶体管、场效应管)、电阻、电容等连接而成的分立电路,也可以是把这些器件、电阻、电容制作在一块半导体基片上的集成电路。不论是分立电路还是集成电路,半导体器件都是电子电路的关键元件。

本章讨论半导体的导电特性;半导体器件的核心——PN结;二极管、晶体管以及场效应管的特性、参数和模型;最后简介集成电路器件的特点。

1.1 半导体的导电特性

自然界的物质按其导电能力大小可以分为导体、半导体和绝缘体三类。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,而且会随着光照或掺进微量杂质而显著变化。如掺进不同类型的杂质,可以改变其导电类型,制成P型或N型半导体。所以,半导体成了制造各种晶体管和集成电路的基本材料。目前常用的制造半导体器件的材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。为了解释半导体的上述特性,先简单介绍半导体的内部导电机构。

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体的晶体结构

用来制作晶体管或集成电路的原材料硅(或锗)是非常纯净的,整个材料内部原子的排列也是非常有规则的,通常把这种材料称为单晶体。图1-1-1是单晶硅(或锗)的结构示意图。由图可见,硅原子是四价元素,它的最外层有四个价电子,每个价电子同邻近的一个原子的价电子组成共价键,用连接每个原子与其邻近原子的直线来表示,“+4”表示硅原子核与内层电子合在一起共带四个正电荷。在每对共价键中的电子不仅受到自身原子核的吸引,也受到相邻原子核的吸引,这些价电子被束缚在共价键中,不加额外能量,它们是不能变成自由电子而参加导电的。

2. 本征激发

在温度很低(如绝对零度即 -273°C)时,硅晶体接近于图1-1-1所示的理想结构,这时不存在带电的自由载流子,相当于绝缘体。在一定的温度下或外界条件的影响下,使价电子获得一定的额外能量,一部分价电子就可能冲破共价键的束缚变成自由电子,这种现象被称为本征

激发,如图 1-1-2 所示。

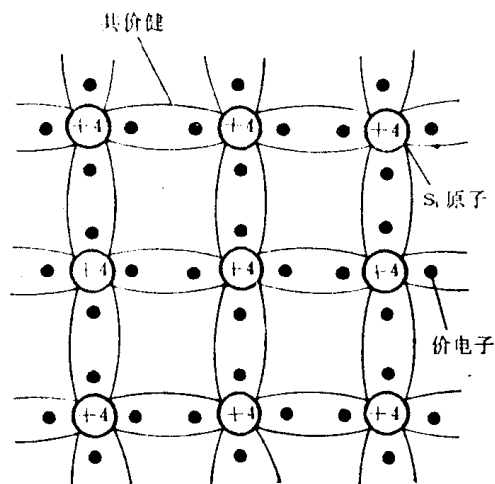


图 1-1-1 硅晶体排列的符号表示

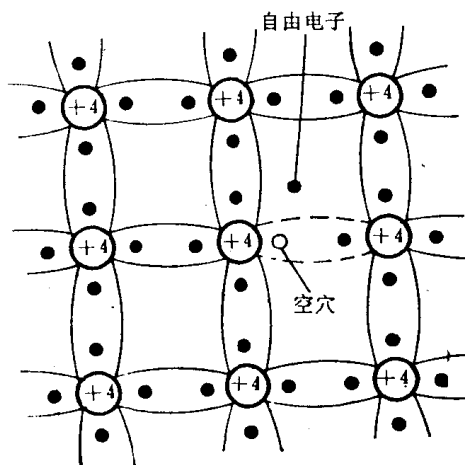


图 1-1-2 本征激发产生电子—空穴对

当价电子变成自由电子时,在共价键中就留下了一个空位,这个空位称为空穴,图 1-1-2 中用小圆圈表示。在这个空穴邻近的没有足够能量变成自由电子的价电子会移动进入这个空穴,而在进入这个空穴的电子的原来位置上又留下了一个空穴,这个过程可以继续下去。很明显,空穴的运动与电子的运动方向相反,而且一个空穴的运动实际上是许多价电子作相反运动的结果。没有空穴时,价电子无法运动,即使互换位置,也不会产生电荷的迁移。空穴越多,价电子的运动越方便。但需指出,电流的大小与价电子的多少无关,只与空穴的多少成正比。因此,可以确定空穴是与电子带有相等数量的正电荷。

综上所述,在半导体内有两种载流子:一种是自由电子,带负电荷;一种是空穴,带正电荷。在本征半导体内,自由电子和空穴是成对出现的。

3. 产生和复合

在一定的温度下,由于本征激发,一方面产生电子—空穴对,另一方面,由于碰撞,自由电子失去能量而返回共价键,自由电子—空穴对消失,前者叫产生,后者叫复合。在一定的温度下,产生和复合达到了动态平衡,此时,每立方厘米的载流子数,即载流子浓度不变。在本征半导体中,热平衡时空穴浓度 p_0 一定等于自由电子浓度 n_0 ,即

$$p_0 = n_0 = n_i \quad (1-1-1)$$

或

$$p_0 \times n_0 = n_i^2 \quad (1-1-2)$$

式中 n_i 叫做本征热平衡载流子浓度,简称本征浓度。 n_i 随温度升高基本上按指数规律增大,同时,还与材料有关。在室温(300K)时,硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$,锗的 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$,可见硅的 n_i 约为锗的 n_i 的千分之一。但不论硅或锗,它们的载流子数与原子密度相比还是很小的,例如,硅的原子密度为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,那么室温下大约每 3×10^{12} 个硅原子中才有一个价电子挣脱共价键变成自由电子。所以,纯净半导体的导电性能比金属差得多。

1.1.2 杂质半导体

如果在本征半导体中掺入微量的杂质(杂质的数量级只有晶体原子密度的几百万分之一),半导体的导电性能将会大大改变。掺入的杂质为五价或三价元素,可分别得到N型半导体或P型半导体,它们都被称作杂质半导体。

1. N型半导体

在单晶硅中掺入微量五价元素的杂质原子磷(P),杂质原子磷将替代晶体中的硅原子,如图1-1-3所示。杂质原子的五个价电子有四个进入共价键,第五个价电子没有共价键可以进入,这个价电子受原子核的束缚力很小,只要很小的能量就能变成自由电子。由于五价元素的杂质原子失去了一个电子,从而变成带有不能导电的正电荷的正离子。正因为五价元素的杂质能给出一个价电子并成为自由电子,所以五价元素杂质叫做施主杂质或N型杂质。

在室温时,几乎每一个施主原子都能释放出一个自由电子,因此自由电子的浓度大大增加,同时与空穴复合的机会也大大增加,空穴浓度相应减少。这种杂质半导体称为N型半导体,自由电子是它的多数载流子(简称多子),空穴是它的少数载流子(简称少子)。可以证明,掺入杂质后,自由电子和空穴浓度的乘积不变,仍满足关系式(1-1-2),即

$$n_{n0} \times p_{n0} = n_i^2 \quad (1-1-3)$$

式中 n_{n0} 和 p_{n0} 分别为N型半导体的热平衡自由电子浓度和热平衡空穴浓度。

在N型半导体中,多子浓度 n_{n0} 几乎只取决于施主杂质浓度 N_D ,即 $n_{n0} \approx N_D$,与温度无关。根据式(1-1-3),少子浓度 $p_{n0} = n_i^2 / N_D$,因 n_i 是温度的函数,所以少子的浓度与温度密切相关。

2. P型半导体

在单晶硅中掺入微量的三价元素杂质原子硼(B),杂质原子硼替代硅原子后,仅有三个电子进入共价键,留有一个共价键空着,邻近原子的共价电子只需获得少许能量就能移动进入这个空着的穴位,使得杂质原子多了一个电子而成为不能导电的负离子。同时在失去共价电子的邻近原子中产生一个空穴,如图1-1-4所示。因为三价杂质元素能接受一个价电子而产生一个空穴,所以这种杂质叫受主杂质或P型杂质。

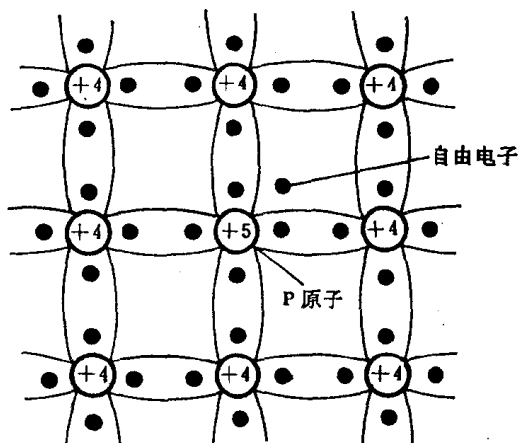


图 1-1-3 五价杂质原子替代硅原子的晶格

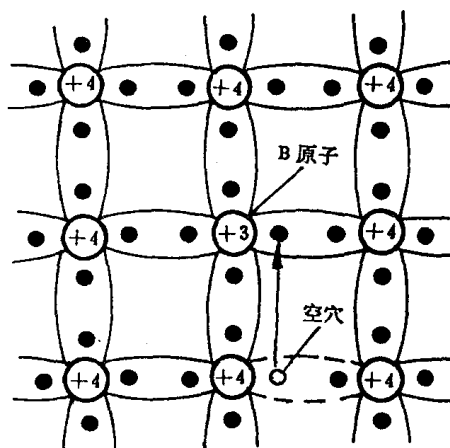


图 1-1-4 三价杂质原子替代硅原子的晶格

在室温时,几乎每个受主原子都能产生一个空穴,因此空穴浓度将大大增加,自由电子的浓度则相应减少。这类杂质半导体叫P型半导体,空穴是它的多数载流子,自由电子是它的少数载流子。空穴的浓度几乎等于受主杂质的浓度 N_A 。式(1-1-2)的关系同样成立,即

$$n_{p0} \times p_{p0} = n_i^2 \quad (1-1-4)$$

式中 n_{p0} 、 p_{p0} 分别表示P型半导体的热平衡自由电子浓度和热平衡空穴浓度。

3. 杂质的补偿作用

如果在本征半导体中同时掺入相等的施主和受主杂质,施主杂质的电子与受主杂质的空穴相结合,不产生额外的载流子,半导体仍是本征的。如果掺入的施主杂质多于受主杂质,半导体中将有多余的自由电子,这时的半导体将是N型的。反之,则是P型的。这种利用掺入不同杂质原子来改变杂质半导体导电类型的过程称为杂质的补偿,广泛地应用于半导体器件制造工艺中。

1.1.3 半导体中的导电过程

半导体中有两种载流子,即电子和空穴。在半导体中的导电过程也有两种,一种是在电场作用下的漂移运动,另一种是由于载流子浓度不均匀而产生的扩散运动。

1. 漂移运动

当外加电压加到半导体上,则要建立一个电场,在这个外加电场 E 的作用下,自由电子逆着电场方向作加速运动,空穴顺着电场方向作加速运动。可以证明,由于电子同晶格的原子相碰等原因,电子和空穴的加速度并不能无限增加,最后是以一个平均速度运动。此平均速度叫做漂移速度,此时载流子的运动叫漂移运动。

自由电子和空穴的漂移运动要产生漂移电流,如图1-1-5所示。由于自由电子和空穴的漂移运动方向相反,而自由电子带负电,其漂移电流方向与漂移运动方向相反;空穴带正电,漂移电流方向与漂移运动方向一致,所以自由电子和空穴的电流方向是一致的。在半导体中,总的漂移电流等于这两种电流之和,即

$$I = I_n + I_p \quad (1-1-5)$$

漂移电流类似金属导体中的传导电流,其大小与外加电场的强弱成正比。

2. 扩散运动

在半导体器件的工作中,扩散运动是比漂移运动更为重要的一种导电机理,这种导电机理在金属导体中是不会遇到的。

设有一块本征半导体,当温度不变、又无光照等其他激发时,载流子浓度均匀不变,称为平衡载流子浓度。不加外电场,不会产生电流。当从一端注入载流子或用光线照射时,该端就增加了新的载流子浓度(电子或空穴),称为非平

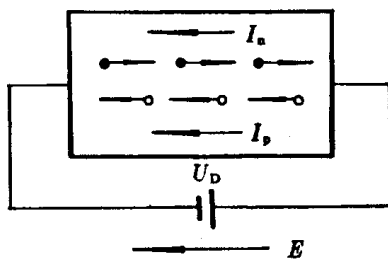


图 1-1-5 载流子的漂移运动

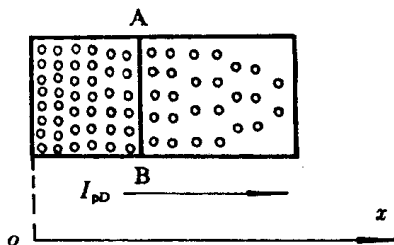


图 1-1-6 载流子的扩散运动

平衡载流子浓度。由于有非平衡载流子,使半导体内载流子浓度分布不均匀,图 1-1-6 是以空穴为例画出了载流子浓度不均匀而产生的扩散运动。设图中的切面线 A-B 为一假想面,切面线左边的空穴浓度大于切面线右边的空穴浓度,则在交界面处存在着浓度差。在没有外电场的作用下,由于载流子随机的热运动,从左边运动到右边的空穴必将多于从右边到左边的空穴,这样就产生了左边到右边的净运动。空穴的净运动形成空穴电流 I_{p0} 。这种由于载流子浓度不均匀引起的运动叫扩散运动,相应产生的电流称为扩散电流。

很显然,如果图 1-1-6 中半导体的载流子浓度是均匀的,就不存在扩散运动,扩散电流必等于零,也就是说,扩散电流与载流子浓度的大小无直接关系。理论和实验都证明,扩散电流是与载流子的浓度梯度成正比的。

1.2 PN 结和二极管

利用杂质补偿的方法使半导体的导电类型一边是 P 型另一边是 N 型,这就形成了 PN 结。PN 结是半导体器件的核心。一个 PN 结构成一个二极管,两个紧密耦合的 PN 结可以构成一个三极管等等。

1.2.1 PN 结的形成和接触电位差

1. PN 结的形成

利用一定的制造工艺,将一块半导体的一边做成 P 型半导体,另一边做成 N 型半导体,如图 1-2-1(a)所示。图中打圆圈的符号 $\ominus$ 表示离子化的受主原子, $\oplus$ 表示离子化的施主原子,小圆圈表示空穴,小黑点表示自由电子。因为 P 区空穴很多,电子很少,而 N 区电子很多,空穴很少,所以 P 区的空穴要向 N 区扩散, N 区的电子要向 P 区扩散,如图 1-2-1(a)中的箭头所示。

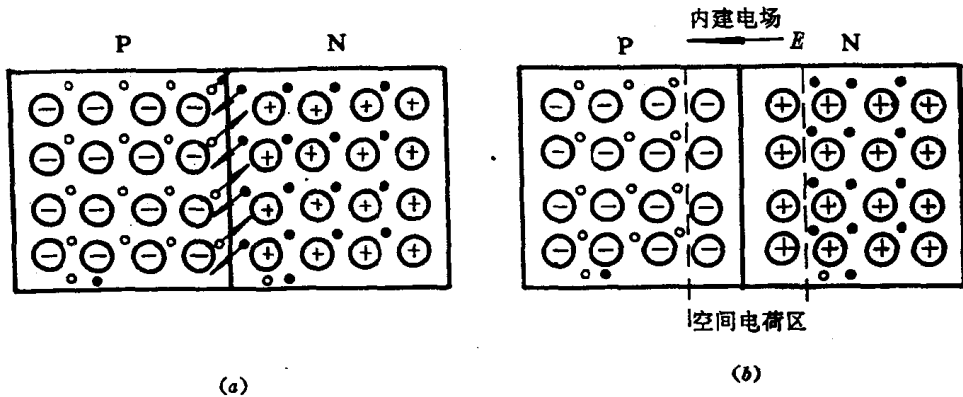


图 1-2-1 PN 结的形成

由于自由电子和空穴都是带电粒子,当 P 区交界面附近的空穴扩散到 N 区,并与 N 区的电子相遇而复合,而 N 区交界面附近的自由电子扩散到 P 区,与 P 区的空穴相遇而复合,这样在 P 区留下了不能移动的受主负离子,在 N 区留下不能移动的施主正离子,于是在交界面附近形成一层电荷量相等、符号相反的空间电荷区。靠 P 区的一边带负电,靠 N 区的一边带正电,如图 1-2-1(b)所示。这层空间电荷区要产生一个由 N 区指向 P 区的内电场 E ,这个内电场

E 对多子的扩散运动起阻挡的作用,而对于 P 区中的少子电子和 N 区中的少子空穴的漂移运动却是有利的。空间电荷区外的 P 区和 N 区仍处于热平衡状态,是电中性的。因此,在空间电荷区内,空穴浓度将由 P 区的热平衡值 p_{p0} 逐渐减少到 N 区的热平衡值 p_{n0} ,自由电子浓度由 N 区的热平衡值 n_{n0} 逐渐减少到 P 区的热平衡值 n_{p0} 。随着扩散运动的继续进行,空间电荷量增多,空间电荷区增宽,内电场 E 增强,多子扩散运动减弱,少子漂移运动加强,最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡,这时从 P 区向 N 区扩散过去多少空穴,同时也从 N 区向 P 区漂移过来相等数量的空穴。电子亦是如此。于是空间电荷量和宽度达到了相对稳定,不再变化。

因为在空间电荷区载流子浓度很小,以至耗尽。又因空间电荷区的内电场阻止多数载流子的扩散运动,所以空间电荷区又叫耗尽层,也叫阻挡层。

综上所述,流过 PN 结的电流由两部分组成:一部分由多数载流子的扩散运动形成的电流;一部分由少数载流子的漂移运动形成的电流。这两种电流的方向相反,数值相等,因此流过 PN 结的总电流为零。

2. 接触电位差

在平衡状态下,内建电场在 PN 结中产生的电位差叫内建电位差,或接触电位差,用 U_0 表示。P 区是低电位,N 区是高电位。这样,P 区中的空穴(N 区中的电子)必须有足够的能量才能越过接触电位差到达 N 区(P 区)。这种作用犹如壁垒,所以空间电荷区也称位垒区或势垒区。

接触电位差与温度、掺杂浓度和材料有关。室温下锗的 U_0 约为 $0.2 \sim 0.3V$,硅的 U_0 约为 $0.6 \sim 0.8V$ 。

3. 不对称的 PN 结

上面讨论的 PN 结,P 区和 N 区的掺杂浓度相等,称为对称的 PN 结。实际使用的 PN 结都是不对称的,有的 P 区掺杂浓度远大于 N 区的掺杂浓度,这种 PN 结称为 P^+N 结。反之称 PN^+ 结。由于空间电荷区中的正、负电荷量相等,所以在不对称的 PN 结中,阻挡层的宽度应与杂质浓度成反比,即阻挡层主要向杂质浓度小的区域延伸。

1.2.2 PN 结的基本特性

1. 正向特性

1) 正向偏置

如果电源的正极接 P 区,负极接 N 区,如图 1-2-2(a)所示,称 PN 结正向偏置。这时,外加

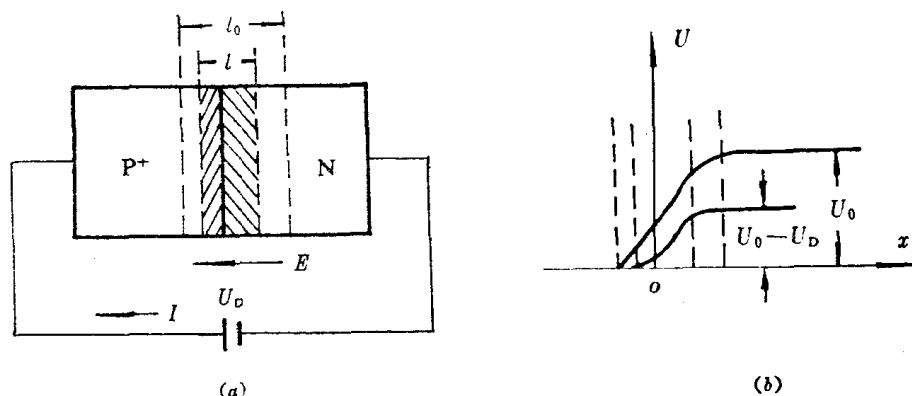


图 1-2-2 正偏时的 P^+N 结