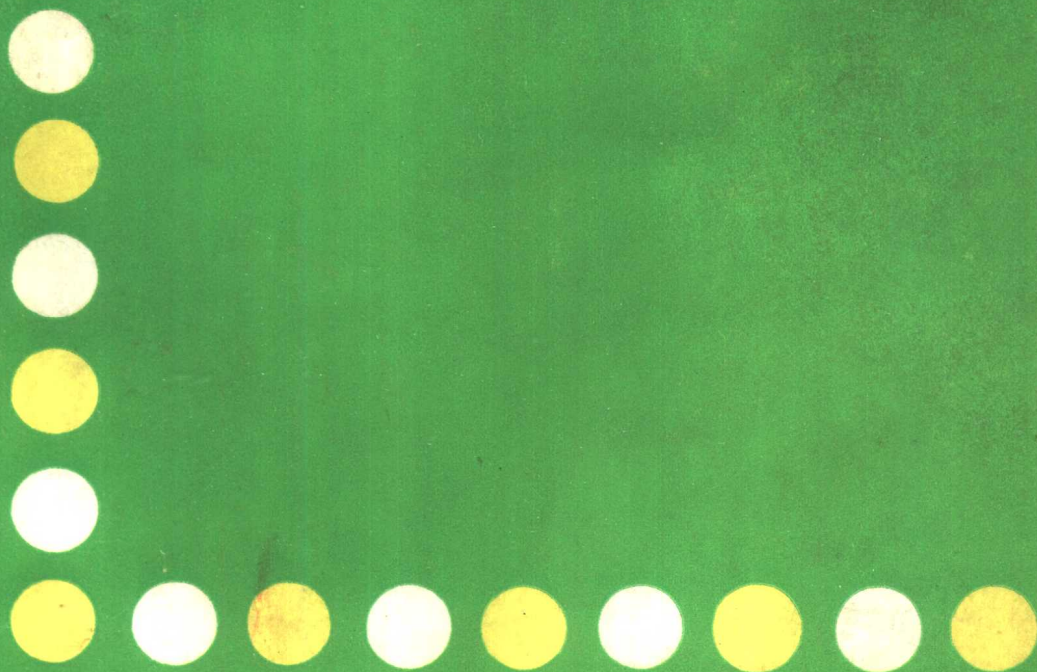


金 惠 幼 编

钱 彭 年 审

电子电路



人民邮电出版社

电 子 电 路

金惠幼 编

钱彭年 审

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

全书分为两部分讲述，第一章到第四章为半导体器件部分，第五章到第十二章为电路部分。器件部分较详细地论述了半导体器件的基本原理和结论，而电路部分则着重介绍电路的工作原理和基本分析方法。其中重点介绍了晶体管及场效应管的基本放大电路，放大器的频率特性和时间特性，负反馈放大器和集成运算放大器原理及运用等内容。

本书可作为通信、无线电技术、自动化和电子计算机等专门基础课教材或教学参考书，也可供有关专业的工程技术人员参考。

电 子 电 路

金惠幼 编

钱彭年 审

责任编辑：刘建章

•

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

•

开本：787×1092 1/16 1986年6月第一版
印张：28 8/16 页数：228 1986年6月河北第一次印刷
字数：712 千字 印数：1—9,500 册

统一书号：15045·总3181—教723

定价：5.50 元

前 言

电子电路是通信、无线电技术、自动化、电子计算机等专业共同的一门专业基础课。为了加强基础理论和适应电子工业发展的需要，本书是在总结了近几年来电子电路课程教学实践的基础上，并结合当前学生水平而编写的。

书中内容器件与电路并重，以电路为主，着重于电子电路的工作原理和基本分析方法。第一到第四章为器件部份，第五到第十二章为电路部份，其中以“基本放大电路”，“放大器的频率特性和时间响应”，“负反馈放大器”，及“集成运算放大器原理”几章为重点。本书与电路基础课程紧密结合，利用转移函数和零、极点的概念讨论放大器的频率特性和时间响应。书中带有*号部份为选读内容，舍去选读内容仍不失本书的连贯性。

本书可供邮电高等院校或其他工科院校的通信、无线电技术、电子计算机和自动化等专业作为教材或教学参考书，也可供有关的工程技术人员参考。

本书承北京邮电学院钱彭年副教授审阅，对本书的编写和修改提出了很多宝贵意见，对此深表感谢。

限于编者水平，书中难免存在很多缺点或错误，敬请读者批评指正。

编者 1985年1月于北京

目 录

第一章 半导体二极管	(1)
第一节 半导体的导电特性	(1)
1.1.1 本征半导体	(1)
1.1.2 P型半导体和N型半导体	(3)
1.1.3 载流子在半导体中的运动——扩散与漂移	(4)
第二节 PN结特性	(6)
1.2.1 PN结的形成及其单向导电性	(6)
1.2.2 PN结的电流方程	(9)
第三节 半导体二极管的特性与参数	(14)
1.3.1 半导体二极管及其伏安特性	(14)
1.3.2 二极管的直流电阻与动态电阻	(17)
1.3.3 二极管电容	(18)
1.3.4 二极管的主要参数和类型	(19)
习题	(20)
第二章 晶体三极管	(23)
第一节 晶体管的工作原理	(23)
2.1.1 晶体管内载流子的运动规律	(23)
2.1.2 晶体管中的电流分配关系	(25)
2.1.3 晶体管的放大作用及电流放大系数	(26)
2.1.4 晶体管的电流方程	(29)
2.1.5 晶体管的穿透电流 I_{CEO}	(30)
第二节 晶体管的静态特性曲线	(31)
2.2.1 共基极特性曲线	(32)
2.2.2 共射极特性曲线	(35)
第三节 晶体管的参数	(37)
2.3.1 电流放大系数	(37)
2.3.2 晶体管的高频参数	(37)
2.3.3 反向饱和电流	(39)
2.3.4 晶体管的极限参数	(39)
2.3.5 温度对晶体管参数的影响	(41)
2.3.6 锗管与硅管的比较	(42)
习题	(43)
第三章 场效应晶体管	(45)
第一节 结型场效应管	(45)
3.1.1 结型场效应管的工作原理	(45)

3.1.2 结型场效应管的特性曲线	(46)
第二节 绝缘栅场效应管	(48)
3.2.1 增强型MOS管的工作原理和特性曲线	(49)
3.2.2 耗尽型MOS管的工作原理和特性曲线	(51)
第三节 场效应管的参数	(52)
第四节 场效应管与晶体管的比较	(54)
习题	(56)
第四章 晶体管及场效应管模型	(57)
第一节 双极型晶体管模型	(57)
4.1.1 混合 π 模型	(57)
4.1.2 h 参数模型	(63)
4.1.3 双口网络参数	(66)
第二节 场效应管小信号模型	(68)
习题	(68)
第五章 晶体管及场效应管的基本放大电路	(70)
第一节 晶体管共射放大电路的分析	(70)
5.1.1 单级共射放大器的工作原理	(70)
5.1.2 单级共射放大器主要参量的计算	(72)
5.1.3 发射极带有负反馈电阻的单级共射放大器	(79)
5.1.4 多级共射放大器	(81)
5.1.5 共射放大电路的图解分析	(82)
第二节 共集电极放大电路的分析	(86)
5.2.1 共集电极放大器主要参量的计算	(86)
5.2.2 复合管	(88)
第三节 共基极放大电路的分析	(90)
5.3.1 共基放大器主要参量的计算	(90)
第四节 晶体管静态工作点的确定	(94)
5.4.1 晶体管输出电压幅度与静态工作点的关系	(94)
5.4.2 晶体管的 β_F 和 f_T 与静态工作点的关系	(96)
5.4.3 晶体管噪声与静态工作点的关系	(97)
5.4.4 多级放大器静态工作点的确定	(97)
第五节 静态工作点及直流偏置电路的计算	(98)
5.5.1 静态工作点的计算	(98)
5.5.2 直流偏置电路的计算	(99)
5.5.3 自举电路	(105)
5.5.4 直接耦合多级放大器的直流偏置电路	(106)
第六节 场效应管放大电路的分析	(108)
5.6.1 场效应管放大器主要参量的计算	(108)
5.6.2 场效应管放大器的直流偏置电路	(112)
习题	(115)

第六章 放大器的频率特性和时间特性	(121)
第一节 网络的转移函数	(123)
6.1.1 网络的转移函数及其零极点分布	(123)
6.1.2 网络的频率特性与零极点分布的关系	(126)
6.1.3 网络的时间特性与零极点分布的关系	(127)
第二节 放大器增益函数的对数频率特性	(129)
6.2.1 增益函数基本因式的对数频率特性	(129)
6.2.2 放大电路中常用网络的的对数频率特性	(137)
第三节 放大器的低频特性	(143)
6.3.1 单级R-C耦合共射放大器的低频特性	(143)
6.3.2 主控极点的概念	(147)
6.3.3 利用短路时间常数计算下截止频率	(148)
6.3.4 耦合电容及射极旁路电容的确定	(150)
6.3.5 场效应管共源放大器的低频特性	(151)
第四节 R-C耦合共射放大器的高频特性	(153)
6.4.1 单级R-C耦合共射放大器的高频特性	(153)
6.4.2 密勒效应——晶体管高频段单向近似模型	(154)
6.4.3 增益带宽积	(156)
6.4.4 多级共射放大器的高频特性	(157)
6.4.5 利用开路时间常数计算上截止频率	(159)
第五节 变量器耦合放大器的频率特性	(160)
6.5.1 变量器的频率特性	(161)
6.5.2 输入变量器耦合共射放大器的频率特性	(162)
第六节 最平幅度特性条件	(164)
第七节 利用组合电路展宽放大器通频带	(168)
第八节 脉冲放大器	(170)
6.8.1 脉冲放大器的主要特性指标	(170)
6.8.2 脉冲放大器的等效电路	(172)
6.8.3 脉冲放大器的瞬态特性	(173)
6.8.4 脉冲放大器对矩形脉冲输入信号的响应	(179)
习题	(181)
第七章 负反馈放大器	(185)
第一节 反馈的基本概念	(185)
7.1.1 负反馈放大器的构成	(185)
7.1.2 反馈极性的判断方法	(188)
7.1.3 负反馈对放大器性能的影响	(188)
第二节 四种基本反馈形式的分析和计算	(195)
7.2.1 A网络与B网络的构成, 闭环增益 A_f 的计算	(196)
7.2.2 输入阻抗的计算	(211)
7.2.3 输出阻抗的计算	(214)

7.2.4	负反馈与信号源内阻的关系	(218)
第三节	负反馈放大器的频率特性和时间特性	(219)
7.3.1	单极点负反馈放大器的频率特性	(219)
7.3.2	二极点负反馈放大器的高频特性	(220)
7.3.3	多极点负反馈放大器的高频特性	(224)
7.3.4	负反馈放大器的补偿问题	(228)
7.3.5	利用时间常数分析负反馈对放大器频率特性的影响	(233)
第四节	负反馈放大器的稳定问题	(235)
7.4.1	负反馈放大器的自激条件与稳定边际	(236)
7.4.2	负反馈放大器的校正措施	(240)
习题		(244)
第八章	集成运算放大器原理及应用	(249)
第一节	差动放大器的工作原理	(250)
8.1.1	直流放大器的零点漂移问题	(250)
8.1.2	差动放大器的工作原理	(250)
8.1.3	差模增益	(252)
8.1.4	共模增益	(252)
8.1.5	共模抑制比	(253)
8.1.6	采用恒流源的差动放大器	(255)
8.1.7	差动放大器的转移特性	(256)
8.1.8	差动放大器的其它形式	(258)
8.1.9	差动放大器的失调和零点漂移	(262)
第二节	集成运算放大器的单元电路	(266)
8.2.1	差动输入电路	(266)
8.2.2	恒流源偏置电路	(267)
8.2.3	电位位移电路	(270)
8.2.4	有源负载	(271)
8.2.5	单端输出转换电路	(272)
8.2.6	输出级电路	(273)
第三节	集成运算放大器的典型电路	(275)
8.3.1	通用型集成运算放大器5G24	(276)
8.3.2	高速型集成运算放大器XFC76	(276)
第四节	运算放大器的基本放大电路	(278)
8.4.1	理想运算放大器	(279)
8.4.2	反相运算放大器	(280)
8.4.3	同相运算放大器	(281)
8.4.4	差动运算放大器	(282)
第五节	信号运算电路	(282)
8.5.1	加法运算放大器	(282)
8.5.2	积分运算放大器	(283)

8.5.3 微分运算放大器	(287)
8.5.4 对数运算放大器	(287)
8.5.5 反对数运算放大器	(290)
8.5.6 利用运算放大器构成乘法器和除法器	(291)
8.5.7 运算放大器传输特性的一般关系	(292)
第六节 运算放大器在应用中的几个问题	(293)
8.6.1 运算误差	(293)
8.6.2 相位校正	(297)
8.6.3 运算放大器性能的扩展	(300)
8.6.4 运算放大器的直流电源	(302)
习题	(302)
第九章 功率放大器	(308)
第一节 甲类功率放大器	(309)
9.1.1 输出功率的计算	(309)
9.1.2 晶体管的最大输出功率	(313)
9.1.3 晶体管的最大集电极功耗及静态工作点的确定	(314)
9.1.4 输出变压器匝比的确定	(315)
9.1.5 晶体管效率	(316)
9.1.6 甲类功率放大器的非线性失真	(319)
第二节 乙类推挽功率放大器	(323)
9.2.1 电路及工作原理	(323)
9.2.2 最大输出功率与晶体管效率	(324)
9.2.3 晶体管的集电极功耗	(326)
9.2.4 乙类推挽功率放大器的非线性失真	(328)
第三节 无变量器的功率放大器	(329)
9.3.1 无变量器乙类推挽功率放大器的构成	(330)
9.3.2 互补对称功率放大器	(331)
第四节 功率管的散热问题和二次击穿现象	(334)
第五节 场效应管功率放大器	(336)
习题	(338)
第十章 正弦振荡器	(341)
第一节 振荡器的自激条件	(341)
第二节 LC振荡电路	(343)
10.2.1 谐振曲线与谐振方程	(343)
10.2.2 变压器耦合型LC振荡电路	(346)
10.2.3 三端型LC振荡电路	(351)
第三节 LC振荡电路的工作状态和振荡幅度问题	(359)
10.3.1 晶体管非线性与振荡幅度的关系	(359)
10.3.2 非甲类振荡电路的起振过程	(362)
10.3.3 半导角 θ 与 $A_V(\omega_0)B_F(\omega_0)$ 起始值的关系	(363)

*10.3.4 晶体管的指数特性分析及振荡幅度的计算	(366)
第四节 RC振荡电路	(374)
10.4.1 振荡频率及起振条件的计算	(374)
第五节 利用运算放大器构成的正弦振荡器	(376)
10.5.1 由运算放大器构成的文氏桥正弦振荡器	(377)
10.5.2 积分式正弦振荡器	(378)
第六节 振荡器的频率稳定问题	(380)
10.6.1 引起振荡频率不稳定的主要因素	(381)
10.6.2 振荡频率稳定性与Q值之间的关系	(383)
10.6.3 提高振荡频率稳定度的措施	(384)
第七节 石英晶体振荡器	(385)
10.7.1 石英晶体谐振器及其特性	(385)
10.7.2 石英晶体振荡器电路	(388)
习题	(391)
第十一章 调制与解调原理	(398)
第一节 调制方式及已调信号的基本特性	(398)
11.1.1 调幅波的基本特性	(399)
11.1.2 调频波的基本特性	(401)
第二节 调幅器与调频器电路	(405)
11.2.1 调幅器电路	(405)
11.2.2 调频器电路	(407)
第三节 检波器与鉴频器电路	(408)
11.3.1 检波器电路	(408)
11.3.2 鉴频器电路	(413)
习题	(416)
第十二章 直流稳压电源	(418)
第一节 整流与滤波电路	(418)
12.1.1 半波整流电路	(418)
12.1.2 全波整流电路	(420)
12.1.3 桥式整流电路	(421)
12.1.4 倍压整流电路	(422)
12.1.5 复合式滤波电路	(423)
第二节 硅稳压管稳压电路	(424)
12.2.1 硅稳压管的稳压特性及参数	(424)
12.2.2 硅稳压管稳压电路的工作原理	(426)
12.2.3 硅稳压管稳压电路的计算	(427)
第三节 串联型晶体管直流稳压电源	(428)
12.3.1 简单串联型稳压电源	(428)
12.3.2 带有放大环节的串联型稳压电源	(429)
第四节 集成稳压电源	(439)

12.4.1 W1系列集成稳压器.....	(440)
12.4.2 5G11型集成稳压器	(440)
习题.....	(443)

第一章 半导体二极管

构成电路的主要元件是半导体二极管、半导体三极管和场效应管等器件。为了熟悉和掌握半导体电路方面的知识和技术,就要求对半导体器件的工作原理有一定的了解。本章介绍半导体二极管。首先介绍半导体材料的特性,其次介绍利用半导体材料如何构成半导体二极管以及半导体二极管的特性和参数等。

第一节 半导体的导电特性

1.1.1 本征半导体

为了了解半导体二极管的工作原理和特性,首先要对构成二极管的材料作一简单介绍。半导体的特点是,在常温下它的导电率介于良导体与绝缘体之间。一般的良导体例如银、铜、铝等金属的导电率在 10^8s/m 以上,绝缘材料的导电率约在 $10^{-14}\sim 10^{-16}\text{s/m}$,而半导体的导电率则大约在 $10^{-11}\sim 1\text{s/m}$ 。用于制作半导体器件的材料有锗和硅。它们的化学符号分别为Ge和Si。

半导体之所以得到广泛的应用,不仅在于它的导电能力介于良导体和绝缘体之间,而且它还具有以下一些特殊性能。

(1)在半导体材料中,掺入一定数量的杂质,就可以控制其导电特性。如在纯锗中掺入 10^{-8} 的杂质元素,例如磷元素,则其导电率可增大十多倍。正因为掺杂可以改变和控制半导体的导电特性,所以利用掺杂的方法,可以制成各种半导体元器件。

(2)半导体的导电率随温度有明显的变化,利用它可作成各种热敏元件。

(3)半导体受到光照后,不仅导电率会发生变化,而且还会产生电动势,这就是半导体的光电效应,利用这种效应,可制成光敏电阻和光电池。

一、本征半导体的导电方式

半导体的导电方式与它的原子结构有关。任何元素的原子都是由原子核和围绕原子核运动的电子组成。电子在原子核的周围运动,形成一系列半径逐渐增大的壳层。原子核带正电荷,其电荷量与所有电子总的负电荷量相等,整个原子保持电中性。不同的原子,主要表现在原子核的质量和电子数量的不同。理论证明,每个原子的第一、二、三……层上分别排列2个,8个,18个……电子。硅原子有14个电子,它们依次填满第一和第二层,最外层有4个电子,这4个电子称为价电子如图1-1(a)所示。锗原子有32个电子,分别填满第一、二、三层,最外层也有4个价电子如图1-1(b)所示。所以锗和硅都是属于4价元素。锗原子和硅原子都可以用带有4个正电荷量的正离子和四个价电子来表示,如图1-1(c)所示。

纯的半导体硅或锗材料,提炼成单晶体后,它们的原子便排列成具有周期性和对称性的点阵。在晶体中,由于原子间的距离很近,价电子不仅受到自己原子的吸引,而且还受到相邻原子的作用,这就产生了电子运动轨道的交叠,晶体中的价电子就不再局限于围绕某一个

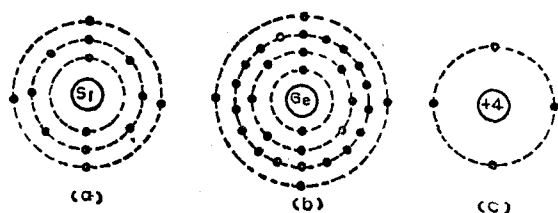


图 1-1 锗与硅的原子结构示意图

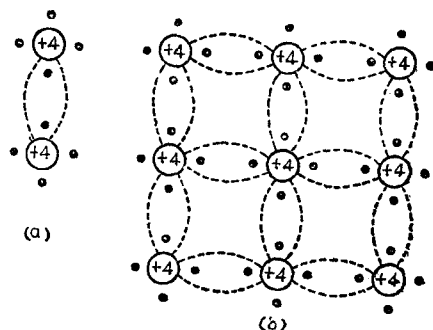


图 1-2 共价键示意图

原子运动，它可以从一个原子转移到另一个相邻的原子上去。因此在硅或锗晶体中，两相邻原子各有一个价电子为两个原子所共有，这两个价电子与该两个相邻原子的关系可以用共价键来表示，如图 1-2(a) 所示，图中小黑点表示价电子，二条虚线表示共价键。图 1-2(b) 表示锗晶体的结构平面示意图。每个原子通过共价键与邻近的四个原子结合在一起，组成排列整齐的晶阵。价电子被束缚在共价键上。

当温度高于零开尔文时，共价键中有些电子吸收到足够的热能，挣脱共价键的束缚成为自由电子。挣脱共价键束缚所需的能量，硅原子约是 1.1eV ，锗原子约是 0.7eV (1eV 称为一个电子伏，等于 1.6×10^{-19} 焦耳)，当价电子挣脱共价键的束缚后，由于这些价电子离开了电中性区域，在原来的共价键中留下一个空位，留下的空位带正电荷 q ，这个空位称为空穴。空穴一经产生，则其它共价键上的电子，不需要增加多少能量，就很容易来填补这个空穴，这时空穴就转移到另一个位置。因此，在晶体中，由于价电子的移动而产生了空穴的移动。空穴和电子的性质相似，但空穴带正电荷，电子带负电荷，它们的电荷量相等。空穴和自由电子统称为载流子。

在一定温度下，由于热能的作用，半导体中总有一定数量的价电子要挣脱共价键的束缚，而产生自由电子和相等数量的空穴。自由电子和空穴总是成对产生，称为电子空穴对，这种由热能产生电子空穴对的现象，称为热激发。自由电子和空穴在运动中又可能重新结合而同时消失，称为复合。在一定温度下，电子空穴对的热激发和复合达到动态平衡。这时，半导体中热激发和复合虽然在不断进行，但电子和空穴的数目却保持不变，这种状态就称为热平衡。

纯锗或硅晶体中，载流子均由热激发产生，因此半导体中自由电子和空穴的浓度（每单位体积内的自由电子或空穴数）相等，这种半导体称为本征半导体。用 p_0 和 n_0 分别表示空穴和自由电子的浓度，则本征半导体中

$$p_0 = n_0 = n_i$$

n_i 也称为本征载流子浓度， n_i 的数值除了与材料本身有关外，还决定于温度。对于硅晶体 $n_i = 3.87 \times 10^{22} T^{3/2} e^{-7000/T} \text{米}^{-3}$ ，对于锗晶体 $n_i = 1.76 \times 10^{22} T^{3/2} e^{-4550/T} \text{米}^{-3}$ ，式中 T 为热力学温度。图 1-3 为锗和硅晶体的本征载流子浓度与温度的关系曲线。由此看出，温度愈高，价电子获得的能量愈大，载流子浓度愈大。又在同一温度时，锗的载流子浓度比硅大。例如在室温 300K 时，锗的本征载流子浓度为 $2.36 \times 10^{19} \text{米}^{-3}$ ，硅的浓度为 $1.48 \times 10^{16} \text{米}^{-3}$ 。这是由于硅中价电子挣脱共价键的束缚所需要的能量比锗大得多，所以在相同的温度时，锗晶体中有更多的价电子能激发为自由电子。因此锗的本征载流子的浓度比硅大。

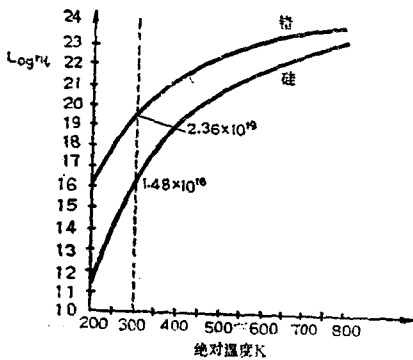


图 1-3 本征载流子浓度与温度的关系曲线

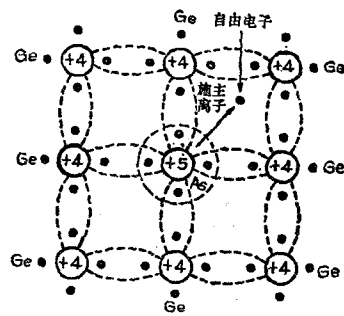


图1-4 N型半导体原子结构示意图

1.1.2 P型半导体和N型半导体

本征半导体只是一种纯半导体。实际上，半导体器件都是采用杂质半导体制成。在本征半导体中人为地掺入少量其它元素（称为杂质），就可以制成杂质半导体。常用的杂质有磷、砷、等五价元素，以及硼、铝、镓等三价元素。

一、N型半导体

在本征半导体中，掺入少量的五价元素，例如在纯度很高的锗单晶中掺入少量的砷(As)元素，即成为N型半导体。掺入的砷原子，取代了晶体中的某些锗原子，如图1-4所示。由于砷元素是五价元素，它有5个价电子，其中4个价电子与相邻的4个锗原子构成共价键，余下一个则不受共价键的束缚，而砷原子对它的束缚力又很弱，因此这个价电子很容易激发为自由电子，而砷原子失去一个电子后，成为带正电的砷离子，这就是杂质的电离过程。在常温下杂质原子都能电离。砷离子与其它的锗原子一样，被束缚在固定的晶格中。由于砷一类五价元素施放出一个电子，所以这类杂质称为施主杂质，电离后的正离子称为施主离子。

在掺杂半导体中，杂质电离和热激发是同时存在的，它们都将在半导体内产生载流子。但是杂质电离与热激发不同，热激发使自由电子和空穴成对产生，而杂质电离只产生一种载流子，对于砷一类的施主杂质，它只产生自由电子。如果杂质浓度远大于本征载流子浓度，则这种掺有施主杂质的半导体中，自由电子的浓度，远远大于空穴的浓度，自由电子成为多数载流子，空穴则为少数载流子，所以掺有施主杂质的半导体称为N型半导体。

二、P型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价元素，例如在锗晶体中掺入少量镓元素In，可成为P型半导体。同样，掺入的镓原子取代了晶体中的某些锗原子，如图1-5所示。由于镓元素是三价元素，有3个价电子，它只能和3个相邻的锗原子构成共价键，而与第4个相邻的锗原子组成的共价键就不完整。因此在晶体中产生了一个空位，这个空位很容易接受其他锗原子的价电子，使镓原子成为带负电荷的镓离子。而填补这个空位的价电子则在它原来的共价键中留下一个新的空位形成空穴，在图1-5中空穴用“0”表示。由于镓一类的三价元素起着接受电子的作用，故称为受主杂质，电离后的负离子则称为受主离子。掺有受主杂质的半导体

中，空穴的浓度远大于自由电子的浓度，故空穴成为多数载流子，而自由电子则为少数载流子，这种掺有受主杂质的半导体称为P型半导体。

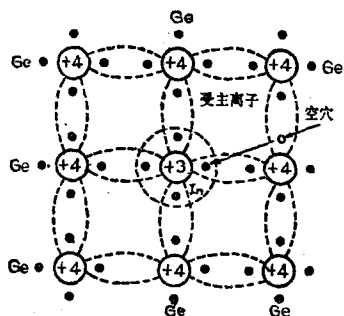


图 1-5 P型半导体原子结构示意图

足以下关系

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

即无论掺杂程度如何，在一定温度的平衡状态下，平衡载流子浓度的乘积保持一定，它等于该温度下本征载流子浓度 n_i 的平方。

当杂质的浓度远大于本征载流子浓度时，则半导体中多数载流子的浓度就近似等于杂质离子的浓度，按(1-1)式，少数载流子的浓度将远小于本征载流子浓度。这是因为由于掺杂的结果使多数载流子的浓度大大增加，电子和空穴复合的机会也大为增加，从而使少数载流子的浓度大大下降。

在本征半导体中，自由电子与空穴的浓度相等，它们都要随温度的上升而迅速增加。在合理掺杂（指杂质浓度远大于本征载流子浓度）的半导体中，常温下多数载流子浓度近似等于杂质离子的浓度，因此多数载流子受温度的影响很小，而少数载流子浓度却对温度十分敏感。如果温度足够高，以致使半导体中的本征载流子占主导地位，则半导体又将近似为本征型半导体。此时由掺杂半导体构成的半导体器件将不能正常工作。在相同温度下，由于硅晶体的本征载流子浓度比锗小，所以半导体硅器件允许的最高工作温度比锗器件高。

1.1.3 载流子在半导体中的运动——扩散与漂移

当半导体的温度大于零开尔文时，载流子就会在半导体内作不规则的热运动，温度越高，这种热运动愈剧烈。在平衡状态下，并且当载流子为均匀分布时，由于这种不规则运动对各个方向运动的机率都相等，因此半导体中不呈现电流。但是当半导体中的载流子受到电场的作用时，则空穴将沿电场方向运动，自由电子将逆电场方向运动，这种运动称为载流子在电场作用下的漂移运动。又当半导体中载流子的浓度不均匀时，高浓度处的载流子将向低浓度处方向移动，这种运动称为载流子由于浓度不均匀而造成的扩散运动，扩散和漂移都使载流子产生定向运动，从而在半导体中产生电流。由载流子的扩散运动所形成的电流称扩散电流。由载流子的漂移运动所形成的电流则称为漂移电流。

一、扩散电流

图 1-6 表示一块载流子浓度在X方向不均匀的半导体材料，设空穴浓度P随X增大的方向逐渐减小，如图 1-6 中曲线所示，则空穴将由高浓度处向低浓度处扩散，即空穴将沿X方

向移动, 从而产生扩散电流, 扩散电流的大小与载流子的浓度梯度 $\frac{dp}{dx}$ 成比例, 故半导体中在某 x 截面处由空穴载流子所形成的扩散电流可表示为

$$I_A = -D_A q A \frac{dp}{dx} \quad (1-2)$$

这里当电流的方向与 x 方向即载流子运动的方向一致时 I_A 为正, 由于空穴浓度随 x 增大而减小, 故 (1-2) 式中 $\frac{dp}{dx}$ 为负值。 q 为每个空穴所带的正电荷量值, D_A 为比例系数, 称为空穴扩散系数, 单位为 $\text{米}^2/\text{秒}$, A 为半导体材料截面面积。 (1-2) 式中的负号使 I_A 为正, 说明空穴扩散电流的方向与空穴运动的方向相一致。

当半导体中自由电子的浓度不均匀时同样可以得到电子扩散电流为

$$I_n = q D_n A \frac{dn}{dx} \quad (1-3)$$

式中 D_n 为自由电子扩散系数, $\frac{dn}{dx}$ 为自由电子的浓度梯度, 当电子浓度随 x 增大而减小

时, $\frac{dn}{dx}$ 为负值, q 为每一个自由电子所带的负电荷量值, q 仍为正。 (1-3) 式中由于

$\frac{dn}{dx}$ 为负, I_n 为负, 说明由自由电子扩散而形成的扩散电流, 其方向与 x 相反。

自由电子和空穴的扩散系数与半导体材料有关。锗的电子扩散系数 $D_n = 98 \times 10^{-4} \text{米}^2/\text{秒}$, 空穴扩散系数 $D_A = 46 \times 10^{-4} \text{米}^2/\text{秒}$, 硅的电子扩散系数 $D_n = 33 \times 10^{-4} \text{米}^2/\text{秒}$, 空穴扩散系数 $D_A = 13 \times 10^{-4} \text{米}^2/\text{秒}$ 。

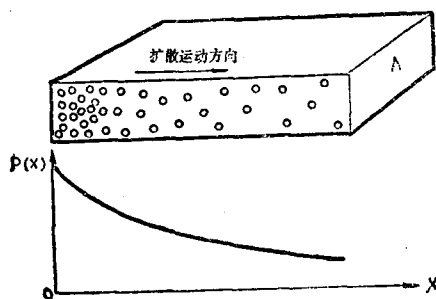


图 1-6 载流子的扩散运动

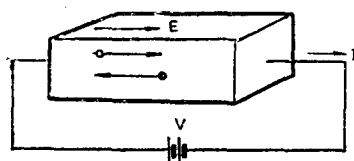


图 1-7 载流子的漂移运动

二、漂移电流

图 1-7 所示为一截面均匀的半导体材料, 在半导体两端加上直流电压 V 后, 半导体内将产生电场, 电场强度 E 的方向如图所示。半导体中的载流子在电场的作用下将产生漂移运动, 其中空穴将沿电场的方向漂移, 而自由电子则将逆电场的方向漂移。假设空穴的浓度为 p , 空穴漂移的平均速度为 V_A , 则单位时间内通过单位截面积的空穴数为 pV_A , 而单位时间内通过半导体截面的总的电荷量即为空穴漂移电流 I_A 。

$$I_A = q A p V_A$$

式中 q 为每个空穴的电荷量, A 为半导体截面积。由电场理论证明, 空穴载流子漂移运动的平均速度 V_A 与电场强度 E 成比例

$$V_A = \mu_A E$$

μ_A 为比例常数, 称为空穴的迁移率, 单位为米²/伏·秒, 因此, 空穴漂移电流

$$I_A = q A p \mu_A E \quad (1-4)$$

当 E 为正时, (1-4) 式中 I_A 为正, 说明由空穴产生的漂移电流其方向与电场方向相同。

同样可以求得由自由电子的漂移运动所产生的漂移电流, 由于每个电子所带的电荷量为 $-q$ 故

$$I_e = (-q) A n V_e$$

其中 $V_e = -\mu_e E$, μ_e 为自由电子的迁移率, 式中负号表示自由电子漂移运动的方向与电场强度的方向相反。由此可以求得

$$I_e = (-q) A n (-\mu_e E) = q A n \mu_e E \quad (1-5)$$

同样当 E 为正时 I_e 为正, 说明由自由电子的漂移运动所产生的漂移电流。其方向与电场强度的方向也相同。

半导体中总的漂移电流 I 应为二者之和

$$I = I_A + I_e = q A (p \mu_A + n \mu_e) E$$

半导体材料的导电率 σ 应为电流密度 J 与电场强度之比, 即

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{I}{A E} = q (p \mu_A + n \mu_e)$$

对于掺杂半导体, 例如 p 型半导体, $p \gg n$, 而多数载流子浓度 p 近似等于受主杂质的浓度 N_A , 故 $\sigma \approx q N_A \mu_A$, 改变受主杂质的浓度, 就可以控制半导体的导电率, 利用这种方法, 可以控制集成电路中各电阻元件的电阻值。

空穴和电子的迁移率与半导体材料及温度有关, 在 300K 时, 锗的电子迁移率 $\mu_e = 0.39$ 米²/伏·秒, 空穴迁移率 $\mu_A = 0.19$ 米²/伏·秒, 硅的电子迁移率 $\mu_e = 0.135$ 米²/伏·秒, 空穴迁移率 $\mu_A = 0.048$ 米²/伏·秒。

第二节 PN 结特性

利用掺杂的方法使半导体的一端为 P 型, 另一端为 N 型, 在 P 型和 N 型半导体的交界面上, 将会形成一个具有单向导电特性的 PN 结。这一节将要讨论 PN 结的形成、特性、及其电流方程。

1.2.1 PN 结的形成及其单向导电性

一、PN 结的形成

掺杂半导体中由于杂质电离而产生的多数载流子和杂质离子必然成对出现, 因此无论是 P 型半导体或 N 型半导体本身都是电中性的, 图 1-8(a) 和 (b) 分别为 P 型半导体和 N 型半导体中多数载流子与杂质离子的示意图。

在 P 型和 N 型半导体的交界面上, 载流子浓度将要发生很大的变化。图 1-9(a) 表示二种不同类型的半导体。在交界面的左侧为 P 型半导体, 右侧为 N 型半导体, 靠近交界面的 P