

Dianzi



电子技术基础

(上册)

Jishu
DIANZIJISHUJICHU

大专理科教材·马灵先主编
河南教育出版社

大专理科教材
电子技术基础
上册

马灵先 主编

责任编辑 范敬儒

河南教育出版社出版

河南第一新华印刷厂印刷

河南省新华书店发行

850×1068毫米 32开本 12.75印张 32千字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数 1—2,550册

ISBN 7—5347—0114—7/TN·1

定 价

3.75元

前 言

本书是根据1982年9月教育部制订的“二、三年制师范专科学校《电子技术基础》教学大纲”，参照1984年教育部颁布的“高等师范院校《电子技术基础》教学大纲”精神，在河南省教委的领导和关怀下编写的。

在编写中，注重基本概念、基本理论的阐述和基本技能的训练；贯彻“少而精”和便于自学的原则；注意了讲授内容和习题的合理安排；体现了电子技术发展的新方向和新成就；删减了分立元件的功率放大、多级放大、稳压电源等比较陈旧、繁杂的内容，加强了集成电路、数字电路和电视，增添了微型计算机等内容。

本书由河南大学马灵先主编并执笔第十三章，参加编写的有南阳师专王玉树（第一、二章），河南大学杨兴宽（第三、五、八章），河南大学王民英（第四、六章），开封师专胡振亚（第七、九、十章），河南大学张学章（第十一、十二、十四章）。

本书在行文和习题上对书后所附参考文献有所引用，在此，特向编著这些文献的专家学者致以衷心的感谢。

本书的大部分章节曾在开封师专和南阳师专的教学中试用。在审稿中，河南大学计算机与自动控制教研室、开封师专和南阳师专的老师和同学们提出了许多宝贵意见，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和欠妥之处在所难免，恳望兄

弟院校师生和广大读者批评指正。

编 者

1987年元月于河南大学

目 录

第一章 晶体管原理	(1)
1.1 半导体的导电机理	(1)
1.1.1 本征半导体	(2)
1.1.2 杂质半导体	(5)
1.2 PN结	(7)
1.2.1 PN结的形成	(7)
1.2.2 PN结的单向导电性	(11)
1.3 半导体二极管	(14)
1.3.1 二极管的结构与分类	(14)
1.3.2 二极管的伏安特性	(15)
1.3.3 二极管的伏安特性方程	(18)
1.3.4 二极管的极间电容	(19)
1.3.5 二极管的主要参数	(22)
1.3.6 二极管的交流等效电路	(23)
1.4 晶体三极管	(27)
1.4.1 三极管的结构	(27)
1.4.2 三极管内部载流子的传输过程	(28)
1.4.3 电流分配关系和放大作用	(31)
1.4.4 三极管的特性曲线	(36)
1.4.5 三极管的主要参数	(41)
*1.5 场效应管	(48)
1.5.1 N沟道增强型MOS管	(50)

1.5.2	N沟道耗尽型MOS管	(55)
1.5.3	场效应管的主要参数	(56)
1.5.4	场效应管使用注意事项	(58)
附录	国产半导体器件的符号和命名方法	(60)
	思考题和习题	(60)
第二章	晶体管放大电路基础	(64)
2.1	基本放大电路	(64)
2.1.1	基本放大电路的组成原则及工作原理	(64)
2.1.2	静态工作点的设置	(68)
2.2	放大电路的图解分析法	(71)
2.2.1	直流通路和交流通路	(72)
2.2.2	用图解法分析静态工作情况	(74)
2.2.3	用图解法分析动态工作情况	(76)
2.2.4	用图解法分析放大器的非线性失真	(81)
2.3	放大电路的低频等效电路分析法	(83)
2.3.1	晶体管的 h 参数	(84)
2.3.2	晶体管的 h 参数等效电路	(89)
2.3.3	晶体管输入电阻的估算	(92)
2.3.4	用 h 参数等效电路分析基本共射放大电路	(94)
2.4	稳定放大器静态工作点的偏置电路	(103)
2.4.1	温度变化对静态工作点的影响	(103)
2.4.2	分压式电流负反馈偏置电路	(106)
2.4.3	补偿式偏置电路	(113)
2.5	基本放大电路的三种组态及其性能比较	(115)
2.5.1	射极输出器	(115)
*2.5.2	共基极基本放大电路	(119)
2.5.3	三种基本放大电路的比较	(122)

2.6	共射基本放大电路的频率特性	(123)
2.6.1	放大器频率特性的概念	(123)
2.6.2	共射基本放大电路的中频特性	(127)
2.6.3	共射基本放大电路的低频特性	(127)
2.6.4	共射基本放大电路的高频特性	(132)
2.7	多级放大器	(135)
2.7.1	级间耦合方式	(135)
2.7.2	多级放大器	(138)
2.7.3	多级放大器的频率特性	(140)
*2.8	场效应管放大器	(142)
2.8.1	场效应管放大器的偏置电路	(142)
2.8.2	场效应管的微变等效电路	(147)
2.8.3	用微变等效电路法分析场效应管放大电路	(149)
	思考题和习题	(153)
第三章	负反馈放大器	(164)
3.1	反馈的基本概念	(164)
3.1.1	什么是反馈	(164)
3.1.2	判别正负反馈的方法	(166)
3.1.3	反馈的一般关系	(167)
3.2	负反馈放大器的分类	(169)
3.2.1	电压串联负反馈	(169)
3.2.2	电压并联负反馈	(172)
3.2.3	电流串联负反馈	(174)
3.2.4	电流并联负反馈	(175)
3.3	负反馈对放大器性能的改善	(178)
3.3.1	提高放大倍数的稳定性	(178)
3.3.2	展宽通频带	(179)
3.3.3	减小非线性失真	(181)

3.3.4	改变输入和输出电阻	(183)
3.4	负反馈放大器的分析	(190)
3.4.1	电流串联负反馈放大器	(191)
3.4.2	电压串联负反馈放大器——射极输出器	(194)
3.4.3	电压并联负反馈放大器	(198)
3.4.4	电流并联负反馈放大器	(201)
	思考题和习题	(202)
第四章	直接耦合放大器和运算放大器	(211)
4.1	直耦放大器	(212)
4.1.1	级间耦合方式	(212)
4.1.2	零点漂移现象	(215)
4.2	差动放大器	(217)
4.2.1	差动放大电路的工作原理	(217)
4.2.2	典型差动放大电路	(220)
4.2.3	差动放大器的不同输入、输出方式	(228)
4.2.4	差动放大器的性能改进	(231)
4.3	集成运算放大器	(235)
4.3.1	模拟集成电路的特点	(236)
4.3.2	集成运放的内部电路	(238)
4.3.3	集成运放的主要参数	(246)
4.4	运算放大器的基本输入电路	(248)
4.4.1	运算放大器的理想模型	(248)
4.4.2	运算放大器的输入方式	(250)
4.5	运算放大器的应用	(255)
4.5.1	积分器	(255)
4.5.2	微分器	(256)
4.5.3	对数放大器	(257)
4.5.4	反对数放大器	(258)

4.5.5 乘法器	(259)
4.5.6 除法器	(261)
思考题和习题	(261)
第五章 低频功率放大器	(266)
5.1 功率放大器的特点和分类	(266)
5.2 互补对称功率放大电路	(268)
5.2.1 双电源乙类基本互补对称电路	(269)
5.2.2 甲乙类互补对称电路	(271)
5.2.3 单电源互补对称电路	(274)
5.2.4 互补对称电路实例	(279)
5.3 变压器耦合功率放大电路	(280)
5.3.1 单管甲类功率放大电路	(280)
5.3.2 推挽乙类功率放大电路	(284)
5.4 集成功率输出级	(286)
思考题和习题	(287)
附录 大功率功放管的选择和测试	(290)
第六章 晶体管直流电源	(293)
6.1 整流电路	(293)
6.1.1 半波整流电路	(293)
6.1.2 全波整流电路	(296)
6.1.3 桥式整流电路	(298)
6.1.4 倍压整流电路	(300)
6.2 滤波电路	(302)
6.2.1 电容滤波电路	(303)
6.2.2 电感滤波电路	(308)
6.2.3 复式滤波电路	(309)
*6.2.4 有源滤波电路	(310)
6.3 稳压管稳压电路	(311)

6.3.1	硅稳压二极管	(311)
6.3.2	稳压管稳压电路	(313)
6.3.3	电路元件的选择	(314)
6.4	串联型稳压电路	(315)
6.4.1	稳压原理和典型电路	(316)
6.4.2	稳压电路性能的改进	(318)
*6.4.3	集成稳压电路	(321)
思考题和习题		(324)
第七章 调谐放大器		(329)
7.1	LC并联谐振回路	(330)
7.1.1	回路电压的频率特性	(332)
7.1.2	并联回路的谐振频率	(333)
7.1.3	品质因数 Q	(335)
7.1.4	谐振曲线与通频带	(336)
7.1.5	信号源内阻及负载的影响	(340)
7.1.6	部分接入法	(342)
*7.2	耦合回路	(348)
7.2.1	等效电路和反射阻抗	(349)
7.2.2	频率特性	(351)
7.2.3	通频带和选择性	(355)
7.3	晶体管的高频特性及高频等效电路	(357)
7.3.1	混合 π 型等效电路	(357)
*7.3.2	Y 参数等效电路	(362)
7.4	调谐放大器	(365)
7.4.1	单调谐放大器	(365)
7.4.2	多级单调谐放大电路	(376)
7.4.3	双调谐放大电路	(378)
7.5	调谐放大器的稳定性	(382)

7•5•1 稳定性的分析.....	(382)
7•5•2 中和法.....	(383)
7•5•3 失配法.....	(386)
*7•6 集成电路调谐放大器及声表面波滤波器简介 ...	(388)
7•6•1 集成电路调谐放大器及其应用.....	(388)
7•6•2 声表面波滤波器.....	(389)
思考题和习题	(392)

第一章 晶体管原理

半导体二极管、晶体管、场效应管和集成电路是最常用的半导体器件，PN结是构成各种半导体器件的共同基础。本章先介绍本征半导体以及N型、P型半导体的导电机理，接着讨论PN结的物理特性和单向导电原理以及二极管的特性和参数，最后研究晶体管的工作原理、特性和参数。

1.1 半导体的导电机理

自然界中的各种物质，就其导电性能的差别可分为导体、绝缘体和半导体三类。通常用电阻率来表示物质的导电性能，导体的电阻率很小，约为 $10^{-6} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ；绝缘体的电阻率很大，约为 $10^8 \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ ；半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间，约为 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。硅、锗、硒及大多数金属氧化物和硫化物、许多金属间化合物等都是半导体。

半导体之所以能获得广泛的应用，不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是由于半导体还具有一些独特的性质：

1. 半导体的电阻率随温度的变化而发生很大的变化。当温度升高 1°C 时，它的电阻率下降 $3 \sim 6\%$ ，当温度升高 10°C 时约下降 75% 。

2. 半导体的电阻率随光照度的变化而发生很大的变化。光照愈强，电阻率愈低，导电能力愈大。

3. 半导体的电阻率受杂质的影响很大。在纯硅中加入百万

分之一的硼，它的电阻率就从原来的 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体何以具有这些独特的导电特性呢？根本原因在于半导体的导电机构。为了理解这些特点，下面简单介绍一下半导体物质的内部结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

非常纯净的、具有完整晶格结构的半导体称为本征半导体。目前用得最多的半导体材料是硅和锗，它们都是四价元素，具有同样的晶格结构。下面以硅为例来研究半导体的导电机理。

硅原子的原子壳层结构如图1.1.1(a)所示。未填满的最外壳层中的电子受原子核的束缚力最小，许多物理性质和化学性质是由最外壳层中的电子数决定的，这些电子称为价电子。硅原子的最外壳层的电子有4个，故为四价元素。为了研究上的方便，常把原子核和内层电子视为一个整体，称为“惯性核”，它的净电量为原子核的电荷量和内层电子的总电荷量之差，通常用如图1.1.1(b)所示的简化模型。

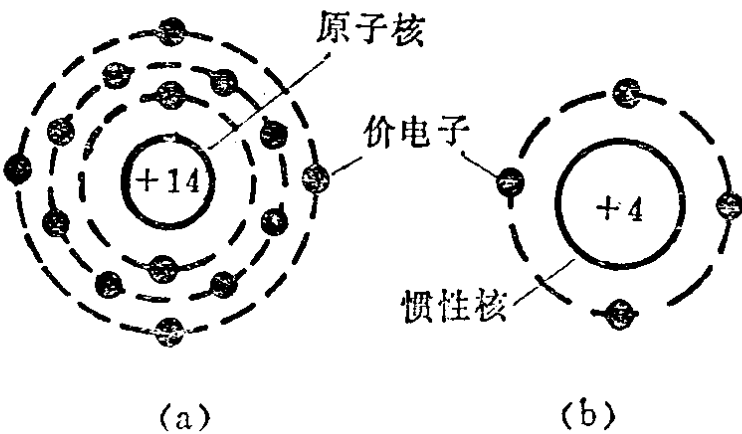


图1.1.1 硅原子结构模型

(a) 硅原子结构示意图 (b) 硅原子的简化模型

当有许多硅原子组成晶体后，原子之间靠得很近，相互之间

的距离约为 $2.351\text{\AA}$ ，各个原子的内外各壳层之间就有了一定的交迭，相邻原子最外壳层交迭最多，内壳层交迭较少。电子只能在相似壳层间转移，所以只有最外壳层上的电子转移最显著。这样，每个原子最外壳层上的价电子，不仅围绕自身原子核运动，而且还时常出现在相邻原子所属的最外壳层的轨道上，使价电子为相邻两原子所“共有”，这种现象叫做“共有化运动”。共有化运动使硅晶体中的两个相邻的原子被一对“共有”的价电子联系在一起，并起了键（联接）的作用，通常称为“共价键”。共价键内的两个价电子受到两个原子核引力的束缚，故共价键内的两个价电子称为“束缚电子”。由于共价键有较强的结合力，使各原子按一定的形式整齐地排列起来，形成了晶体中的“共价键”结构。图1·1·2是单晶硅共价键结构的平面示意图。由图可见，每个硅原子的四个价电子分别为相邻的四个原子所共有，看起来每个硅原子的外层轨道上都有八个电子，因而处于较为稳定的状态。

物质的导电能力，决定于载流子的数量和运动速度。本征半导体在绝对零度和无光照等外界影响时，价电子不能摆脱共价键的束缚而成为自由电子，半导体相当于绝缘体。在常温下，共价键中的价电子由于受热激发，可能有少数价电子获得较大的能量，挣脱共价键的束缚成为自由电子。当一个

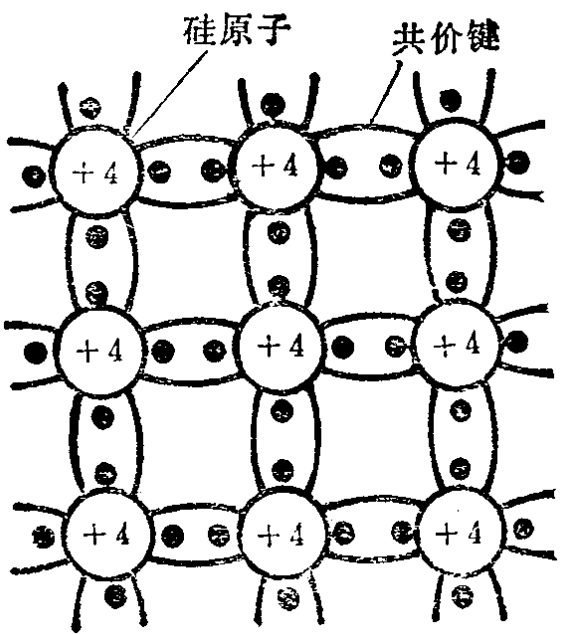


图1·1·2 硅单晶的共价键结构

共价键破裂，一个价电子成为自由电子时，在原来共价键处就留下一个空位，我们称为“空穴”，如图 1·1·3 所示。附近共

价键中的价电子很容易跳过来填补这个空穴，于是空穴又移到来填补的那个价电子原来的位置上，这样依次填补下去，便形成了空穴的移动。由于整个半导体是呈电中性的，所以“空穴”应带正电荷，其电量与电子相等。具有空穴的原子成了不能移动的正离子。由此可见，空穴的移动方向和束缚电子的移动方向是相反的，因而在分析时可用空穴

移动产生的电流来代表束缚电子移动产生的电流。这样，在本征半导体中就有两种载流子——自由电子和空穴。在本征半导体中，受热激发时每产生一个自由电子，必然伴随产生一个空穴，自由电子和空穴是成对产生的，这种现象称为本征激发。在任何时候，本征半导体中的自由电子和空穴的数目都相等。在没有外加电场的作用

时，自由电子和空穴的运动是无规则的，平均位移为零，所以并不产生电流。在外加电场作用下，它们都可以参与导电，因此流过半导体中的总电流应为电子电流和空穴电流的代数和，这是本征半导体导电的一个重要特性。

在本征半导体中，一方面本征激发不断地产生自由电子——空穴对；另一方面自由电子在运动过程中又会与空穴相遇，自由电子填入空穴恢复共价键，使自由电子——空穴对消失，这一过程叫做复合。在一定的温度下，如果没有其他外界的影响，“产生”“与复合”的机会相等，达到动态平衡，使载流子的浓度保持一定的热平衡值。

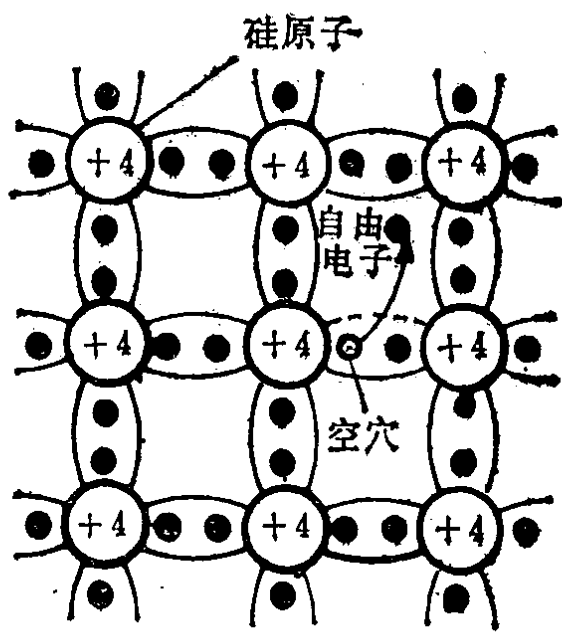


图1·1·3 本征激发产生电子——空穴对

理论分析表明，在室温下硅的本征载流子浓度仅为原子密度的三万亿分之一，因此本征半导体的导电能力很微弱。对给定的半导体材料来说，本征载流子的浓度随温度的升高按指数规律增大，半导体的导电性能将随温度的升高而显著的增加，这就是前面所述的半导体的一个独特特性。同样，本征载流子的浓度也与光照有关，随光照的增强而增大。

1.1.2 杂质半导体

如果在本征半导体中掺入微量的其他元素的原子（称为杂质），就会使半导体的导电性能发生显著的变化。掺杂后的半导体，称为杂质半导体，按掺入杂质的性质不同，可分为N型半导体（电子半导体）和P型半导体（空穴半导体）两大类。

1. N型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的五价元素磷（或砷、锑等），整个晶体结构基本不变，只是原来晶格中某些位置上的硅原子被磷原子所代替。磷原子有五个价电子，它用四个价电子与相邻的四个硅原子组成共价键后，还多余一个价电子，如图1.1.4所示。

这个多余的价电子不受共价键的束缚，但仍受磷原子核的吸引而只在磷原子周围活动，只要较小的能量就能挣脱磷原子的吸引而成为自由电子。在常温下，几乎每一个磷原子都能提供一个自由电子，故磷原子称为施主原子或施主杂质，也称N型杂质。当磷原子给出一个多余的价电子后，便因失去一个

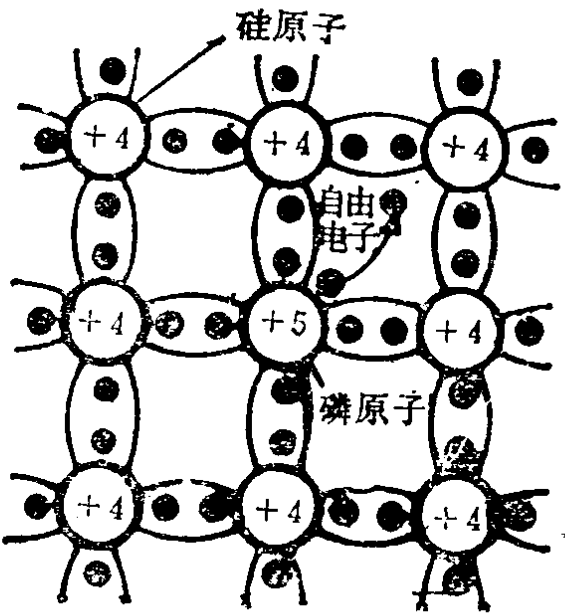


图1.1.4 N型半导体的结构

电子而成为正离子。但在产生自由电子的同时，磷原子并不产生新的空穴，这是与本征激发不同的。此时的正离子被固定在晶格中不能自由行动，所以它不起导电作用。除了上述的杂质给出的自由电子外，仍然还有由本征激发产生的少量的自由电子——空穴对。这样，在掺磷的硅晶体中，自由电子数远大于空穴数，自由电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子）。这种半导体主要靠自由电子导电，称为电子型半导体，简称N型半导体。

由理论分析可知，在室温下，若在本征硅中掺入250万分之一的磷，则产生的自由电子浓度比本征激发的空穴浓度大 10^{12} 倍以上，可见掺杂对半导体导电性能有巨大影响。

2. P型半导体

在本征半导体硅中掺入少量的三价元素硼（或铟等），由于硼原子只有三个价电子，当它与周围的四个硅原子组成共价键时，因缺少一个价电子而出现一个空位，邻近共价键上的电子在受到热振动或其他激发条件下获得能量时，就很容易填补这个空位，从而在失去电子的共价键中便形成一个空

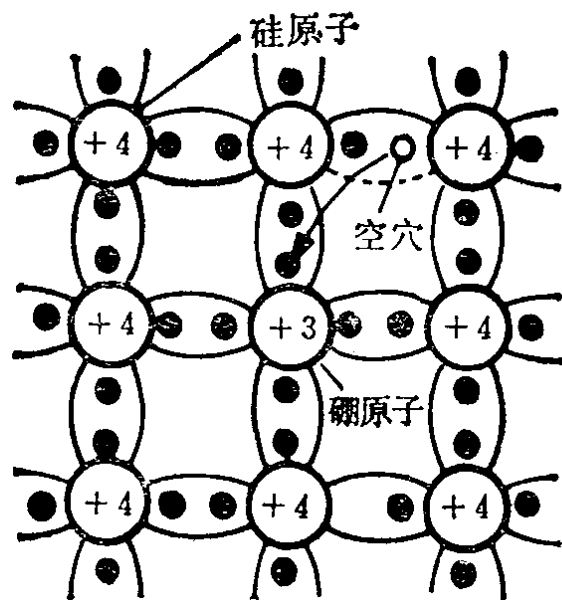


图1.1.5 P型半导体的结构

穴，如图1.1.5所示。在室温下，几乎全部硼原子的空位都被填充，产生与硼原子数量相等的空穴。但在产生空穴的同时并不产生新的自由电子。由于硼原子能接受一个电子，故称硼为受主杂质或P型杂质。但是由于本征激发，仍然有为数甚少的自由电子——空穴对。因此在掺硼的硅晶体中，空穴的数目远大于自由