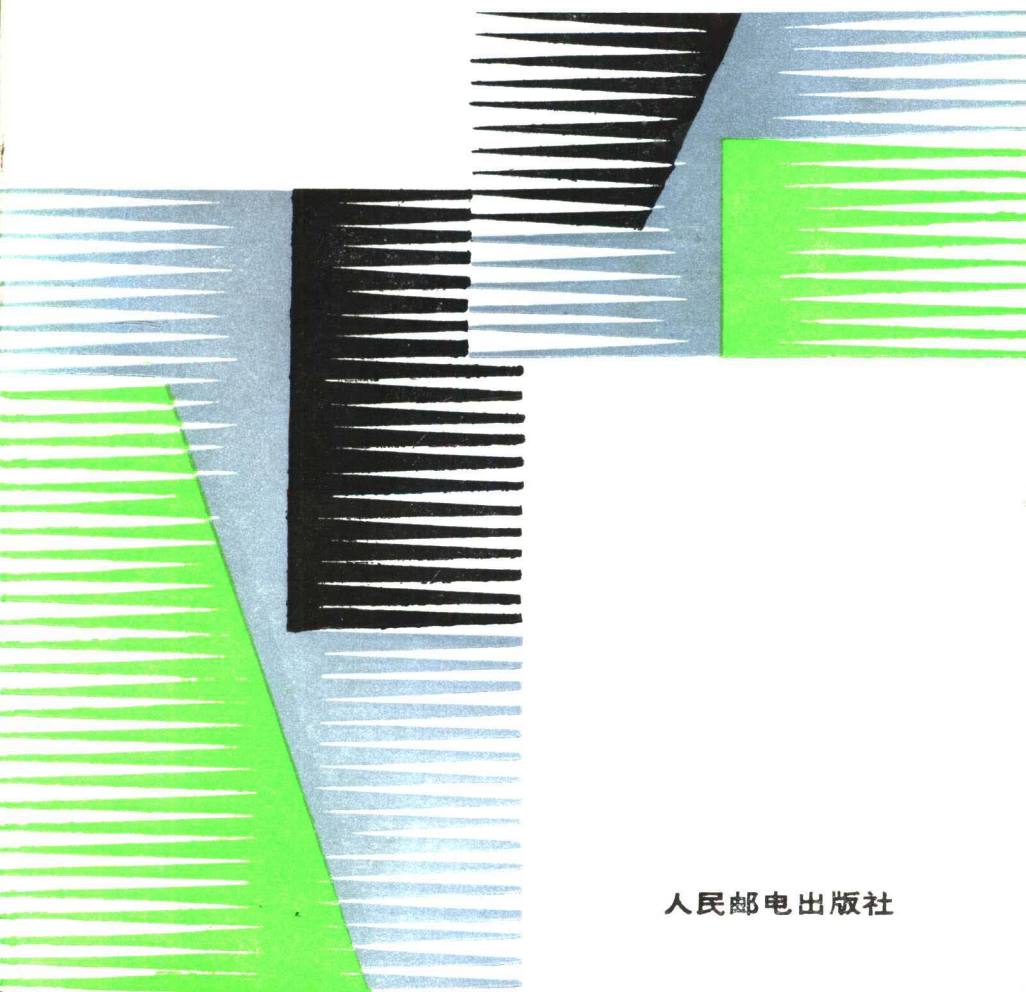


张志远 主编 薛顺根 等 编

邮电高等
函授教材

电子 电路基础



人民邮电出版社

邮电高等函授教材

电子电路基础

张志远 主编
薛顺根 等编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书主要讲述电子电路的基本工作原理及其分析方法。内容包括：半导体器件基础；放大电路基础；场效应管及其放大电路分析；放大器的频率特性；负反馈放大器；低频功率放大电路；集成运算放大器；正弦波振荡电路以及直流稳压电源等。

本书力求突出物理概念，并辅以必要的数学推导；编写时压缩了分立元件部分的篇幅，适当加强集成电路方面的内容；在写法上采用管路结合方式，以使器件与电路密切联系，便于理解。各章均有思考题、小结和习题，书末附有部分习题参考答案，便于自学。

本书为邮电高等函授专业基础课教材，也可供通信、电子技术类师生与相关的科技人员参考。

邮电高等函授教材

电子电路基础

张志远 主编

薛顺根 等编

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：850×1168 1/32

1987年11月 第一版

印张：16⁸/₃₂ 页数：260

1987年11月河北第1次印刷

字数：428千字

印数：1—10 500册

ISBN7115-03499-0/Z

定价：2.90元

前 言

本书系邮电高等函授专业基础课教材，是根据“高等工业学校电子电路(I)、(II)教学基本要求”和本课程教学大纲编写的，主要介绍电子电路的基本原理及其分析方法。

本书是在邮电高等函授历届所用教材《电子器件与电路》、《低频电子电路》的基础上，按照“保证基础，加强概念，精选内容，压缩篇幅，联系实际，不断更新，利于自学”的原则，并根据教学实践和广泛征求意见后增删修改而成。

本书在编写时，力求突出物理概念，并辅以必要的数学推导，在写法上采用“管路结合”方式，以使器件与电路密切联系，便于理解。根据技术发展的需要，压缩了分立元器件部分的篇幅，加强了集成电路等与新技术有关的内容。

本书第一、八、九章由周任淦编写；第二章由江玉珍编写；第三章由郭凯编写；第四、六章由薛顺根编写；第五、七章由张志远编写。全书由张志远主编、周任淦副主编。

本书承孙治国副教授和金良玉副教授初审，在编写过程中得到龚绍胜副教授、王天玺、方建邦、李桂风、胡宏一、王本平、韦保华以及肖仲、黄象贤、沈 慧、宁帆等同志的支持和帮助，在此一并表示衷心地感谢。

本书根据邮电高等函授《电子电路》编审组的讨论精神进行了全面的修改，限于编者水平，书中不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八六年十二月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

第一节 半导体的基础知识	(1)
一、半导体	(1)
二、本征半导体	(3)
三、杂质半导体	(4)
四、漂移电流和扩散电流	(8)
思考题	(8)
第二节 PN结	(9)
一、PN结势垒的形成	(9)
二、PN结的单向导电性	(11)
三、PN结的伏安特性方程	(13)
四、温度对伏安特性的影响	(14)
五、PN结的反向击穿	(15)
六、PN结的电容效应	(17)
思考题	(18)
第三节 半导体二极管	(18)
一、二极管的伏安特性	(19)
二、二极管的近似等效电路	(21)
三、二极管电路的基本分析方法	(21)
四、二极管的主要参数	(23)
五、稳压管	(25)
思考题	(27)
第四节 半导体三极管	(27)
一、三极管的结构和类型	(27)
二、三极管的工作原理	(29)
三、三极管的特性曲线	(33)
四、三极管的主要参数	(38)

五、三极管的结电容	(41)
思考题	(41)
小结	(42)
习题	(46)

第二章 放大电路基础

第一节 放大电路的基本概念	(48)
一、放大电路的功用	(48)
二、共发射极放大电路的组成	(49)
三、放大电路的工作原理	(50)
四、放大电路的主要性能指标	(52)
思考题	(52)
第二节 放大电路的图解分析法	(53)
一、静态工作情况分析	(53)
二、动态工作情况分析	(56)
思考题	(63)
第三节 稳定静态工作点的偏置电路	(63)
一、放大电路的非线性失真	(63)
二、工作点不稳定的原因	(64)
三、稳定偏置电路	(66)
思考题	(68)
第四节 放大电路的微变等效电路分析法	(69)
一、三极管的混合 π 型等效电路	(69)
二、共发射极 h 参数等效电路	(73)
三、简化混合 π 参数和简化 h 参数等效电路	(75)
四、放大器的等效电路分析	(75)
思考题	(97)
小结	(99)
习题	(100)

第三章 场效应管及其放大电路

第一节 结型场效应管	(108)
一、结型场效应管的结构和工作原理	(108)
二、结型场效应管的特性曲线	(112)
思考题	(117)
第二节 绝缘栅型场效应管	(118)
一、N沟道增强型绝缘栅场效应管的结构和工作原理	(118)
二、N沟道增强型场效应管的特性曲线	(121)
三、N沟道耗尽型绝缘栅场效应管	(123)
思考题	(125)
第三节 场效应管的参数、特点及使用注意事项	(127)
一、场效应管的主要参数	(127)
二、场效应管与普通晶体管的比较	(130)
三、场效应管使用注意事项	(131)
思考题	(132)
第四节 场效应管放大电路	(132)
一、场效应管放大电路的直流偏置电路和静态分析	(132)
二、场效应管放大电路的微变等效电路分析法	(142)
三、三种基本放大电路的性能比较	(148)
思考题	(148)
小结	(150)
习题	(151)

第四章 放大器的频率特性

第一节 频率特性的基本概念和分析方法	(155)
一、频率特性的基本概念	(155)
二、对数频率特性(波特图)	(159)
思考题	(160)
第二节 单级RC耦合共射放大器的低频特性	(160)
一、中频等效电路和中频放大倍数	(162)

二、低频等效电路和低频放大倍数·····	(162)
三、发射极旁路电容对低频特性的影响·····	(164)
四、低频段对数频率特性·····	(167)
思考题·····	(170)
第三节 单级RC耦合共射放大电路的高频特性·····	(170)
一、三极管的频率参数·····	(170)
二、高频等效电路和高频电压放大倍数·····	(172)
三、高频段对数频率特性·····	(175)
四、RC共射放大电路全频段频率特性曲线·····	(177)
五、放大器的增益一带宽积·····	(178)
思考题·····	(181)
第四节 多级放大器的频率特性·····	(181)
一、级间耦合方式·····	(182)
二、多级放大器的组成·····	(187)
三、多级放大器的频率特性·····	(188)
四、画波特图·····	(196)
五、展宽频带的方法·····	(198)
思考题·····	(202)
小结·····	(203)
习题·····	(204)

第五章 负反馈放大器

第一节 反馈放大器的基本概念·····	(208)
一、放大器的反馈·····	(208)
二、负反馈放大器的基本类型·····	(209)
三、负反馈放大器的基本方程·····	(218)
四、负反馈对放大器性能的影响·····	(223)
思考题·····	(237)
第二节 负反馈放大器的分析和计算·····	(238)
一、负反馈放大器的方框图分析法·····	(240)
二、负反馈放大器计算举例·····	(256)

思考题	(266)
第三节 负反馈放大器的稳定性分析	(267)
一、产生自激的原因及自激条件	(267)
二、稳定判断法和稳定裕度	(271)
三、负反馈放大器的稳定性分析举例	(274)
四、防止负反馈放大器自激的方法	(277)
思考题	(281)
小结	(282)
习题	(284)

第六章 低频功率放大电路

第一节 低频功率放大电路概述	(298)
一、功率放大电路的特点	(298)
二、功率放大管的工作极限区	(300)
三、功率放大电路的分类	(300)
思考题	(302)
第二节 互补对称功率放大电路	(303)
一、工作在乙类的基本互补对称电路	(303)
二、工作在甲乙类的基本互补对称电路	(308)
三、采用一个电源的互补对称电路	(312)
思考题	(323)
小结	(323)
习题	(324)

第七章 集成运算放大器

第一节 集成运算放大器概述	(328)
一、什么是集成电路和集成运算放大器	(328)
二、集成运算放大器线路特点	(329)
三、集成运放外壳引线编号与内部电路组成	(331)
思考题	(332)
第二节 差动放大电路	(332)

一、采用差动放大电路的必要性	(332)
二、基本差动放大电路及其工作原理	(334)
三、典型的差动放大电路分析	(338)
四、差动放大电路的改进	(344)
思考题	(351)
第三节 集成运算放大器电路	(352)
一、集成运放的其它内部电路	(352)
二、5G24型集成运算放大器电路分析	(362)
三、集成运算放大器的主要技术指标	(368)
思考题	(372)
第四节 集成运算放大器的线性应用	(374)
一、集成运放的理想化条件	(374)
二、比例运算放大器	(375)
三、运算放大器的运算误差分析	(380)
四、求和运算放大器	(382)
五、微积分运算电路	(387)
思考题	(391)
第五节 参数测试和实际应用中的一些问题	(391)
一、集成运放参数的测量	(392)
二、运算放大器在实际应用中的一些问题	(400)
思考题	(406)
小结	(406)
习题	(407)

第八章 正弦波振荡电路

第一节 振荡的基本概念	(419)
一、产生正弦波振荡的条件	(419)
二、正弦波振荡电路的组成和分析方法	(420)
三、自激振荡的建立和振幅的稳定	(421)
思考题	(423)
第二节 LC正弦波振荡电路	(423)

一、LC并联选频网络	(423)
二、变压器反馈式振荡电路	(425)
三、电感反馈式(电感三点式)振荡电路	(429)
四、电容反馈式(电容三点式)振荡电路	(430)
五、电容反馈式改进型振荡电路	(432)
六、正弦波振荡电路的频率稳定问题	(434)
思考题	(435)
第三节 石英晶体振荡电路	(436)
一、石英晶体谐振器	(436)
二、石英晶体振荡电路	(437)
思考题	(439)
第四节 RC正弦波振荡电路	(439)
一、文氏电桥振荡电路	(439)
二、RC移相式振荡电路	(445)
思考题	(446)
第五节 负阻正弦波振荡电路	(447)
一、隧道二极管	(447)
二、负阻振荡原理及其电路	(449)
思考题	(450)
第六节 寄生振荡	(451)
一、寄生振荡的产生	(451)
二、消除寄生振荡的措施	(451)
小结	(452)
习题	(454)

第九章 直流稳压电源

第一节 直流稳压电源的组成	(461)
一、电源变压器	(461)
二、整流电路	(462)
三、滤波器	(462)
四、稳压电路	(462)

第二节 整流—滤波电路	(462)
一、单相桥式整流电路	(462)
二、单相桥式整流电容滤波电路	(465)
思考题	(475)
第三节 硅稳压管稳压电路	(475)
一、稳压电路的主要指标	(475)
二、硅稳压管的伏安特性	(476)
三、硅稳压管稳压电路	(476)
思考题	(479)
第四节 串联型稳压电路	(480)
一、串联型稳压电路的基本形式	(480)
二、具有放大环节的串联型稳压电路	(481)
三、串联型稳压电路稳压性能的改进	(483)
四、保护电路	(487)
思考题	(492)
第五节 集成稳压电源	(492)
一、集成稳压电源 5G14 简介	(492)
二、5G14 电路工作原理	(495)
思考题	(496)
小结	(497)
习题	(498)
参考文献	(499)
部分习题参考答案	(500)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是组成半导体电路的核心元件，而电路的性能与其所用器件的特性有密切的关系。因此，学习半导体电路，必须首先了解半导体物理的基础知识和PN结的形成，掌握半导体器件的工作原理与外特性 并了解它们的直流参数和极限参数。

第一节 半导体的基础知识

一 半导体

在日常生活中，大家都知道，银、铜、铝、铁等金属材料很容易导电，通常把它们称为导体；而塑料、陶瓷、橡皮、石英玻璃却很难导电，所以把它们称为绝缘体；**锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等，因其导电能力介于导体和绝缘体之间，故称它们为半导体。**

为什么物质之间会出现导电难易的现象呢？其根本原因在于物质内部原子本身的结构、原子和原子的结合方式以及原子内部运载电荷的粒子（称为载流子）的数量和运动速度的不同。

半导体元素中的硅和锗的单个原子结构，其最外层的电子都是四个，所以硅和锗都是四价元素，由于内层电子受原子核的束缚力较大，同时又受到外层电子的屏蔽作用，因此不可能参与导电。但是，在硅、锗单晶体中，原子间的距离是相等的，每个原子的最外层的四个电子不仅受自身原子核的束缚，还与周围的四个原子发生联系。这时，每两个相邻的原子之间都共有一对电子，一方面围绕

自身原子核运动，另一方面也时常出现在相邻的原子所属的轨道上，这种组合称为共价键结构，如图1-1-1所示。

由原子理论可知，每个原子的外层须有八个电子才处于比较稳定的状态，但是硅和锗共价键结构的特点是它们的外层共有电子所受到的束缚力并不象绝缘体里那样大，在一定的温度下由于热运动，其中少数电子能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子，也叫电子载流子。通常，绝缘体中的价电子要挣脱原子核的束缚成为自由电子，则至少必须额外获得10个电子伏特的能量($1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ (焦耳))，而绝大多数半导体材料只需要1.1eV左右的能量就可以了。

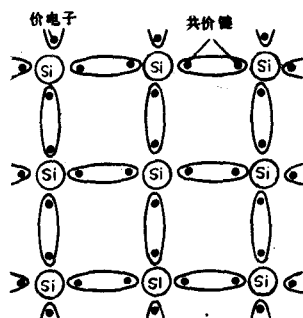


图 1-1-1 硅单晶的共价键结构

例如在300K时，硅为1.1eV，锗为0.72eV。因此，半导体的导电能力比导体差，而比绝缘体好。价电子冲破原子核的束缚所需要获得的最起码的额外能量，称为电子的“激发能”。价电子由束缚电子变为自由电子的过程称为“本征激发”或“热激发”。当温度升高时，热能激发出来的载流子数目会急剧增加，此时半导体的电阻率就会大大

下降。

我们知道，晶体中每个原子的原子核所带的正电荷数与核外电子所带的负电荷数相等，因而整个原子呈电中性，在与相邻原子形成共价键后仍然是电中性的。当价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子后，就在共价键中留下一个空位子，称为空穴。现在，处在空位置上的电子跑掉了，缺少一个负的电子电荷($-q$)，与这个空穴相应的共价键出现了未被抵消的正电荷，于是空位置呈现正电，其数值等于一个电子电荷($+q$)。

由此可见，空穴也是一种载流子。当半导体处于外加电压作用下，通过它的电流可以看作是由两部分组成：一部分是自由电子进

行定向运动所形成的电子电流，另一部分是共有电子递补空穴所形成的空穴电流。它们的区别是，电子电流是带负电的电子的定向运动，而空穴（由于它的运动和电子相反）电流是带正电荷的空穴的定向运动。所以，**在半导体中，不仅有电子载流子，而且还有空穴载流子**，这是半导体导电的另一个重要特性。

二 本征半导体

半导体里由于本征激发不断产生电子空穴对；同时自由电子在运动中又会与空穴重新结合而消失，这是一种相反的过程，称为“复合”。在复合过程中，要放出在数值上等于“激发能”的能量。这种能量或传给其它电子，或辐射出电磁波，或发光即放出光子。电子空穴对又产生，又复合，这是半导体里不断进行着的一对矛盾。在一定温度下，这对矛盾可以实现相对的平衡，这时，产生和复合的过程虽然仍在不断地进行，但电子空穴对始终保持着一定的数目。这样的半导体称为本征半导体。

在半导体物理中，通常用“载流子浓度”（即单位体积内的载流子数）来表示半导体中载流子的数目，因此，**本征半导体导电机构的基本特点可以描写为电子浓度等于空穴浓度**。即

$$n = p = n_i \quad (1-1-1)$$

式中： n_i 是本征载流子浓度； n 是本征半导体的电子浓度； p 是本征半导体的空穴浓度。

在300K时，硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ，锗的 $n_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ ，硅的 n_i 较小。已知硅的原子密度为 $5.0 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ ，锗的原子密度为 $4.4 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 。所以 10^{12} 个硅原子中约有一个原子产生一个自由电子（占三万亿分之一），在 10^8 个锗原子中约有一个原子产生一个自由电子（占二十亿分之一）。由此可见，本征硅或本征锗在室温时的载流子浓度都是很小的，其导电能力较差。

理论和实验都表明，本征载流子的浓度 n_i 是随温度的升高而迅速增大的，基本按指数规律上升。而半导体的电阻率 ρ 却随温度的

升高而急剧下降（不考虑温度对载流子漂移速度的影响）。因此，**本征半导体的导电能力随温度的变化而发生显著的变化。**

本征半导体的特性可归纳如下：

（1）本征激发成对地产生电子和空穴，所以电子浓度和空穴浓度相等，都等于本征载流子浓度 n_i 。

（2） n_i 与本征半导体材料有关。硅和锗比较，硅的电子激发能较大，所以它的 n_i 较小。

（3） n_i 与原子密度相比是极小的，所以本征半导体的导电能力极弱。

（4） n_i 与温度有关，温度升高时， n_i 就增大。

三、杂质半导体

本征半导体不能用来制造半导体器件。其原因，一是它的导电能力太低，二是本征半导体中参与导电的自由电子和空穴浓度是相同的。

但如果在本征半导体中，有选择地掺入一定数量的某种杂质元素，就会使半导体的导电性能发生显著地变化。人们正是利用半导体的这种特性，根据不同需要，在硅或锗中掺入各种不同的杂质以制成各种性能不同的杂质半导体，从而开辟了利用半导体的广阔途径

在杂质半导体中，根据掺入杂质性质的不同，通常可分为电子型半导体（N型半导体）和空穴型半导体（P型半导体）两大类，下面分别予以讨论。

（一）N型半导体

如果在本征硅和本征锗中掺入少量五价元素杂质，如磷（P）或锑（sb）等，就可使晶体中的自由电子浓度大大增加，从而得到N型半导体。

图1-1-2是在硅晶体中掺入少量磷的共价键结构示意图。因为磷原子最外层有五个价电子，所以当它以四个价电子与相邻的硅原

子组成共价键后，还多余一个价电子在共价键之外，由于磷原子对这个价电子的束缚力较弱，因而只需少许激发能（硅中掺磷为 0.044eV ），它便可挣脱磷原子核的束缚，成为自由电子。因此，在室温下几乎所有磷原子与硅原子形成共价键后多出的价电子都能变为自由电子。由于磷原子能“施舍”出自由电子，故称磷为“施主杂质”或 N 型杂质。

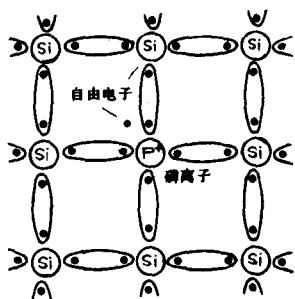


图 1-1-2 硅中掺磷的共价键结构

磷原子给出多余的价电子后，从晶体结构上看，留下的则是不能移动的正离子，正离子与空穴不同，它由原子核和内层电子所组成，不能自由运动，因此不是载流子，不能参与导电。磷原子在产生自由电子的同时，并不产生新的空穴，这是不同于本征激发的。

掺入施主杂质后，半导体中的自由电子浓度会比同一温度下本征半导体中的电子浓度大好多倍，这就大大加强了半导体的导电性能，这种半导体主要靠电子导电，称电子型半导体，简称 N 型半导体。 N 型半导体中自由电子浓度 n_e 大大超过空穴浓度 p_e ，即

$$n_e \gg p_e \quad (1-1-2)$$

在 N 型半导体中，电子占多数，故称为“多数载流子”，简称“多子”；空穴占少数，称为“少数载流子”，简称“少子”。一般地说，在杂质半导体中，多子对导电性能起决定性作用。

N 型半导体的电子浓度 n_e 和空穴浓度 p_e 有下列关系：

$$n_e p_e = n_i^2$$

或

$$n_e p_e = n_i^2 \quad (1-1-3)$$

上式的意义是，在 N 型半导体中，虽然电子浓度 n_e 大于本征浓度 n_i ，空穴浓度 p_e 小于本征浓度 n_i ，但两者的乘积却等于 n_i^2 。式 (1-1-3) 常用来计算杂质半导体的少子浓度。

若已知在 300K 时硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ， N 型硅单晶片的电