

广东省师范专科学校试用教材

电子线路

上册

广东省师专《电子线路》教研

前 言

为了提高我省物理专业《电子线路》课程的教学质量，在尚未有与师专相适应的教材所造成的情况下，在省高教局的领导下，根据我省拟订的本课程教学大纲，参考了兄弟院校同一课程试用教材的基础上，编写了这套教材，供我省师专物理专业试用。

在编写过程中，我们从师专是培养初中物理教师这一基本任务和广东省当前中学实际情况出发，认真学习兄弟院校教材编写的宝贵经验，注意总结近几年来我们教学实践经验，按照“打好基础、精选内容、加强实践、体现教法”的编写原则，在内容的安排上，着重加强了基础和理论联系实际：在基础方面、选择了晶体管原理与特性、晶体管低频放大器、负反馈放大器、低频功率放大器、*集成运算放大器、直流稳压电源、调谐放大器、正弦振荡器、调制、解调与变频、*场效应管放大器、脉冲电路、数字集成电路简介等；在理论联系的实际方面，选择了超外差收音机、电视接收机、收录机等。为了更好地将两者有机的联系起来，采用了将前面的基础知识应用于所联系的实际——收音机、电视机、收录机的电路分析的编写方法。因此，在讲授有关后者的内容时，单学时教学内容可以比讲授前面基础知识的内容相应增加，从而可减少后者整章的讲授学时。此外，本书与我会所编广东省师专试用教材《电子线路实验》一书配套，组成了我省师专《电子线路》理论课和实验课完整教材。这样，读者在学完这一课程后，就能掌握较为完

整的(按师专要求)有关电子线路的基本知识、基本理论和基本实验技能。

本书是根据课程总学时数约为162(包括实验)、除去50学时实验课外,理论教学实约为112学时而编写的。为了使理论教学学时数在80至120学时范围内都能适用,部分内容(打*号的)在编写上自成体系,使用时,可根据具体学时数和实际情况,灵活选择。

参加本书编写工作的有:韶关师专周奉年、海南师专梁安坤、肇庆师专郑定齐、惠阳师专何坚、韩山师专余庆信、雷州师专梁友、嘉应师专李锦生、佛山师专张国濂。由周奉年同志担任主编、负责统编定稿工作。

本书由华南师范大学物理系何学淡同志主审。广东省师专《电子线路》教研会1982年8月潮州教材审定会议通过。韶关师专何国仪同志描绘了本书全部插图,唐彦、赖淦辉两同志为本书出版做了许多工作,在此致以衷心的感谢。

本书系我省师专自编试用教材。由于编写水平有限,时间非常仓促,一定有许多错误和不妥之处,恳请读者批评指正,以便今后能更好修订,逐步完善起来。

编者 1982年12月1日于韶关

目 录

第一章 晶体管原理与特性	1
§ 1-1 半导体的导电特性	1
一、什么是半导体	1
二、半导体的类型及其导电特性	2
§ 1-2 PN结的形成及其特性	8
一、PN结的形 成	8
二、PN 结 的单向导电性	10
§ 1-3 晶体二极管	12
一、晶体二极管的结构	12
二、晶体二极管的伏安特性	14
三、二极管伏安特性的表 达 式	16
四、二极管的主要参数	17
§ 1-4 晶体管的工作原 理	21
一、晶体管的结构	22
二、晶体管内载流子的运动过程	23
三、晶体管的放大作用	27
§ 1-5 晶体管的特性曲 线	28
一、输入特性曲线	29
二、输出特性曲线	32
三、晶体管的三个工作区域	34
§ 1-6 晶体管的参 数	35
一、电流放大系数	36
二、极间反向电流	38
三、极限参数	39
四、频率特性参数	42

本章小结	44
思考题与习题	45
附录1-1 半导体器件型号命名方法	48
第二章 晶体管低频放大电路	50
§ 2-1 基本放大电路的工作 原 理	50
一、共射极基本放大电路	50
二、静态工作点的设置	51
三、放大电路的特性指标	58
§ 2-2 放大电路的偏置电路	66
一、固定偏置电路	67
二、电流负反馈偏置电路	71
三、分压式电流负反馈偏置电路	73
四、其他稳定工作点的偏置电路	79
§ 2-3 放大电路图解分 析 法	82
一、直流负载线和静态工作点	82
二、交流负载线	85
三、电路参数变化对静态工作点的影响	87
四、放大电路的放大倍数	88
§ 2-4 晶体管低频小信号微变等效电路分 析 法	94
一、简单等效电路	94
二、微变 h 参数等效 电 路	98
三、用“ h ”等效电路法分析晶体管放 大 器	103
§ 2-5 放大电路的频率特性	111
一、中频区电压放大倍数	112
二、低频区电压放大倍数	113
三、高频区电压放大倍数	117
四、放大电路的幅频和相频特性	119
§ 2-6 阻容耦合多级放大电路	124
一、耦合	124

二、多级放大电路电压放大倍数的估算	127
三、放大电路的幅频和相频特性	131
本章小结	133
思考题与习题	136
第三章 负反馈放大电路	140
§ 3-1 反馈的基本概念	140
§ 3-2 负反馈的四种类型	141
一、电流串联负反馈	142
二、电压串联负反馈	143
三、电压并联负反馈	145
四、电流并联负反馈	148
§ 3-3 负反馈对放大电路性能的影响	151
一、提高放大倍数的稳定性	153
二、减小非线性失真	155
三、扩展频带	158
四、改变输入电阻和输出电阻	161
§ 3-4 负反馈放大电路的计算方法举例	170
一、电流负反馈放大电路	171
二、电压并联负反馈放大电路	176
三、射极输出器	181
四、具有深度负反馈放大电路的估算	187
本章小结	189
思考题与习题	190
第四章 低频功率放大器	194
§ 4-1 低频功率放大电路的特点	194
§ 4-2 单管甲类功率放大器	196
§ 4-3 乙类推挽功率放大器	201
一、电路结构	202
二、工作原理	202

三、电路性能分析	203
四、无输出变压器 (OTL) 功率放大器	218
*五、不采用耦合电容的OCL电路	228
本章小结	229
思考题与习题	230
附录4-1 T504型晶体管扩音机	234
第五章 直流放大器	236
§ 5-1 概述	236
§ 5-2 直接耦合放大器	237
一、电阻分压耦合电路	238
二、提高后级发射极电位的耦合方式	239
三、用二极管代替发射电阻 R_{e2} 的直接耦合电路	240
四、用硅稳压二极管代替发射极电阻 R_{e2} 的直接耦合电路	241
五、NPN和PNP型管直接耦合电路	241
§ 5-3 直流放大器的零点漂移	242
§ 5-4 差动放大器工作原理	244
一、基本电路	244
二、差模放大倍数	245
三、共模抑制比	246
四、对零点漂移的抑制作用	247
五、典型差动放大器静态工作点与电压放大倍数的计算 举例	249
§ 5-5 差动放大器的其他几种电路	250
一、单端输入、双端输出	250
二、单端输入、单端输出	252
§ 5-6 差动放大器性能的改进	253
一、恒流源差动放大器	253
二、具有“共模负反馈”的差动放大器	254
本章小结	256
思考题与习题	257

*第六章 集成运算放大器	260
§ 6-1 概述	260
§ 6-2 线性集成运算放大器典型电路分析	262
一、集成运放内部电路的特点和方框图	262
二、5G24型集成运放电路分析	263
三、 μ A741型运算放大器电路	270
§ 6-3 集成运放主要参数	270
§ 6-4 集成运放基本电路	276
一、理想集成运放的主要特点	276
二、反相负反馈电路	277
三、同相负反馈电路	279
四、差动负反馈电路	280
§ 6-5 集成运放应用举例	281
一、加法器	281
二、减法器	282
三、指数与对数运算器	283
四、乘法器	284
五、除法器	286
六、微分、积分运算器	288
七、恒压源与恒流源	289
§ 6-6 集成运放的调零与补偿	290
§ 6-7 集成运放的简易检测	294
本章小结	296
思考题与习题	298
第七章 直流稳压电源	302
§ 7-1 整流电路	303
一、半波整流电路	303
二、全波整流电路	308
三、桥式全波整流电路	313

四、倍压整流电路	315
§ 7-2 滤波电路	319
一、电容滤波器	320
二、电感滤波器	325
三、 Γ 型滤波器	328
四、 Π 型滤波器	330
§ 7-4 直流稳压电路	331
一、硅稳压二极管	331
二、并联式稳压电路	334
三、串联式晶体管稳压电路	339
本章小结	355
思考题和习题	357
第八章 调谐放大器	360
§ 8-1 LC并联谐振回路	360
一、LC并联谐振的条件和谐振频率	360
二、LC并联谐振回路的特点	361
§ 8-2 中间抽头式并联谐振回路	367
一、谐振频率	368
二、谐振阻抗	369
§ 8-3 调谐放大器	370
一、晶体管的高频特性及高频等效电路	373
二、单调谐放大器	379
本章小结	389
思考题与习题	390
第九章 正弦振荡器	392
§ 9-1 概述	392
§ 9-2 LC振荡器	394
一、电感三点式振荡器	394
二、电容三点式振荡器	399

三、互感耦合(变压器耦合)振荡器	403
§ 9-3 石英晶体振荡器	407
§ 9-4 RC振荡器	412
一、多节RC移相电路	412
二、文氏电桥电路	415
本章小结	419
思考题与习题	420
第十章 解调与变频	425
§ 10-1 概述	425
§ 10-2 调幅与解调	426
一、调幅波分析	426
二、非线性元件的频率变换作用	430
三、晶体管调幅电路	434
四、解调(检波)	438
§ 10-3 调频与解调	441
一、调频的基本原理	441
二、常用的调频电路	442
三、调频波的表达式及频谱	444
四、解调(鉴频)	447
§ 10-4 变频	458
一、为什么要变频	459
二、变频原理	460
三、晶体管变频电路	462
本章小结	466
思考题与习题	467
第十一章 超外差式收音机	470
§ 11-1 概述	470
§ 11-2 超外差式收音机电路分析	473
一、输入电路	473

二、变频级	476
三、中频放大级	477
四、检波级	478
五、低频级	479
六、自动增益控制(AGC)电路	480
*七、其他附加电路	483
八、典型电路的整机综合分析	489
§ 11-3 收音机的统调	489
§ 11-4 超外差式接收机的干扰	496
一、中频干扰	496
二、假象波道干扰	497
三、中频二次谐波干扰	498
本章小结	498
思考题	499
*第十二章 场效应管放大器	500
§ 12-1 结型场效应管	501
一、结型场效应管的结构和工作原理	501
二、结型场效应管的特性曲线	505
§ 12-2 绝缘栅型场效应管	507
一、N沟道增强型绝缘栅场效应管的结构和基本工作 原理	508
二、N沟道增强型MQS管的特性曲线	511
三、N沟道耗尽型绝缘栅场效应管的工作原理和特性 曲线	512
§ 12-3 场效应管的参数和使用注意事项	513
§ 12-4 场效应管放大器	516
一、场效应管的三种连接方法	517
二、场效应管的偏置电路	517
三、场效应管的基本放大电路	522
本章小结	532
思考题与习题	533

第一章 晶体管原理与特性

内 容 提 要

本章从物理的原子结构出发，详细介绍了本征半导体和杂质半导体的导电规律、PN结的形成和单向导电原理。然后在此基础上，着重讲解二极管、三极管的内部结构、工作原理，以及它们的外部特征、主要参数等。

§ 1—1 半导体的导电特性

晶体管是用半导体材料做成的。那么，什么是半导体，它具有什么特性呢？这是本章首先要回答的问题。

一、什么叫半导体

大家知道，有些物质，如金、银、铜、铝等金属材料是很容易导电的，我们把它们叫做导体；而另一些物质，如塑料、橡胶、陶瓷、云母、石英、玻璃、木材和纸张等都是不容易导电的，这些物质通常称为绝缘体；导电性能介于导体和绝缘体之间的物质叫半导体，如锗、硅、硒及大多数金属氧化物和硫化物等。如果用电阻率来表示物质的导电性能，导体的电阻率约为 $10^{-8} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ；绝缘体的电阻率约 $10^8 \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ ；半导体的电阻率则介于导体与绝缘体之间，约为 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体之所以能用来制造晶体管和在各方面获得广泛的应

用，不在于它的导电能力介于导体与绝缘体之间，而在于半导体的导电能力具有在不同条件下发生很大变化的特性：

1. 半导体的电阻率随温度、光照度的变化而变化很大。例如温度每升高 1°C ，半导体的电阻率下降 $3\sim 6\%$ ，升高 10°C 约下降 75% ，而温度升高 100°C 时，便下降约50倍左右。可见，半导体的电阻率随温度的升高迅速下降，即其导电能力显著增加；另外，用光照射半导体时，半导体的导电能力也显著增加，光照愈强，半导体的导电能力愈大。人们利用半导体的这种特性，可以制成供自动控制的热敏元器件和光敏元器件（如热敏电阻、光敏电阻和光电管等）。

2. 半导体的电阻率受半导体中杂质的影响很大。例如在金属导体中掺予千分之一的杂质，电阻率的变化是微不足道的。但如果在纯硅半导体中加百万分之一的杂质（如硼），硅的电阻率就会从原来的 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右，即导电能力增加了约20万倍。

半导体一般分为本征半导体和杂质半导体两种类型，下面分别讨论这两类半导体的原子结构和导电性能。

二、半导体的类型及其导电特性

（一）本征半导体

不含杂质（或含杂质质量少于 10^{-9} ）的半导体，叫做本征半导体。

我们知道，一切物质都是由原子构成，而原子又是由原子核和核外电子组成的。图1—1是锗和硅原子的结构模型，由图可见锗原子由带正电的原子核和围绕着它的32个（硅为14个）带负电的电子组成。32个（或14个）电子按一定的规律分布在四层（或三层）电子轨道上。由于原子核带32个（或14个）电子电量的正电，

在正常情况下原子呈中性。靠近原子核的里面三层(或二层)28个(或10个)电子由于受原子核的束缚较大,很少有离开运动轨道的可能,所以它和原子核组成了一个惯性核,它的净电量是 $32 - 28 = +4$ 个(或 $14 - 10 = +4$ 个)电子电量,如图1—2所示。

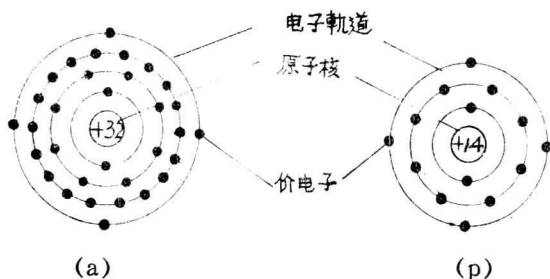


图1-1 锆(a)和硅(b)原子的结构模型

故而最外层的四个电子,受原子核的束缚较小叫做价电子。由于原子有几个价电子就叫几价元素,锆和硅最外层电子都是四个,所以都是四价元素。每一元素的导电性能和化学性能都与价电子有很大关系。

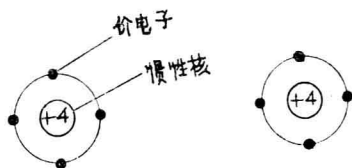


图1—2 锆和硅原子结构简化图

硅,锆等半导体材料被制成单晶体时,构成晶体的原子是按一定的规律排列着的。原子之间的距离不仅很小而且是相等的。每个原子外层的四个价电子,不仅受自身原子核的束缚,还受周围相邻四个原子的影响,每两个相邻的原子之间共有一对电子,即每一个电子不仅围绕自身原子核运动,而且有时也出现在相邻原子所属的轨道上,两个价电子属于两个原子所共有,这种现象叫做共有化运动。共有化运动将使两个原子紧紧连结成一个“整体”,电子对起了键(联接)的作用,故称之为共

价键。原子的这样组合则叫共价键结构，如图1—3所示。

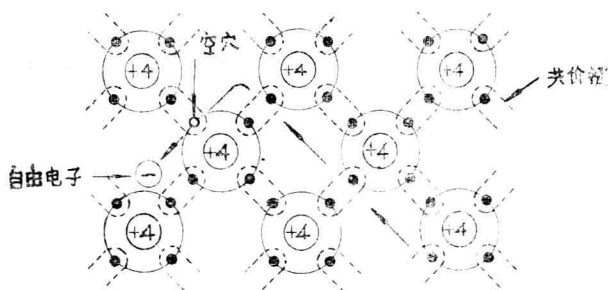


图 1 — 3 锗(硅)原子在晶体中的共价键排列

硅，锗共价键结构中的外层共有电子所受的束缚力，虽不象在绝缘体里那样紧，但在绝对零度($0^{\circ}\text{K} \approx -273^{\circ}\text{C}$)时，由于共价键的束缚，价电子无法摆脱这种束缚，因此本征半导体中极少自由电子，这时半导体相当于绝缘体。然而，在室温下，少数价电子受外界影响，有可能获得足够的能量，摆脱束缚状态，脱离共价键成为自由电子。

价电子受激摆脱束缚成为自由电子后，同时在原来共价键的位置上留下一个缺少负电子电量($-q$)的空位，这个空位叫做空穴。与这空穴相应的共价键出现了未被抵消的正电荷，这相当带正电，其电量等于一个电子电量($+q$)。在共有化运动中，邻近的价电子很容易转移到这个空位置上，于是这个空位置消失了。同时，转移到这个空位置的价电子的原位置上，又出现一个新的空穴。新的空穴又会被其相邻的价电子填补，又出现另外新的空穴。这样过程不断持续下去，其效果就相当于空穴在晶体中移动了。这就是半导体中“空穴运动”的物理过程(参见图1—3)。

在本征半导体中，受激产生一个自由电子，必然相伴产生

一个空穴，电子和空穴是成对产生的，这种现象，称为本征激发。因此，在室温下，本征半导体不再是绝缘体了。当我们在—块本征半导体两端加上电压后，电路中就会出现电流，如图1—4所示。在外加电压产生的电场作用下，电子将跑向正极，而空穴将跑向负极，于是形成电流。可见，电路中的电流是由两部分组成的：一部分是由自由电子定向运动形成的电子电流；另一部分是价电子依次递补空穴所形成的空穴运动电流——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，而空穴电流是带正电的空穴的定向运动。所以，在本征半导体中，不仅有电子载流子，而且还有与自由电子同数量的空穴载流子，这是本征半导体导电的一个重要特征。

在本征半导体中，受激后自由电子和空穴总是相伴产生，成对出现的。因此称为电子—空穴对。自由电子在运动中，填补空穴，作为电子和空穴的重新结合而消失，这种现象，称为复合。在一定的温度下，当电子—空穴对产生与复合相当，达到动态平衡时，电子——空穴对维持一定的数量。

在本征半导体中，靠本征激发产生的电子——空穴对的数量是非常小的，本征半导体的导电性能很差。但它对温度却十分敏感，随着环境温度的升高，由热激发产生的电子——空穴对的数目按指数律增加，这就是晶体管工作性能受温度影响很大的重要原因，也是半导体能制成热敏电阻的根据。

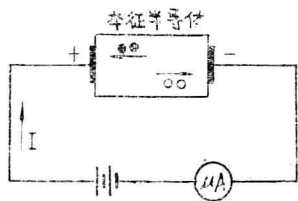


图 1—4 本征半导体中
电荷的移动

(二) 杂质半导体—N型半导体和P型半导体

由上面分析可知，本征半导体的导电能力是很差的。但如果在本征半导体中有目的地掺入少量某些杂质，却可以使半导体的导电性能有很大改变，从而为半导体的应用开辟了广阔的天地。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。杂质半导体分为N型半导体和P型半导体两种，下面分别进行讨论。

1. N型半导体

在本征半导体硅中，掺入少量的五价元素，例如磷P(或砷As、锑Sb等)，则其中一些硅原子的位置被磷原子所代替，磷原子的五个价电子中有四个和硅原子的四个价电子组成共价键，这就多出一个受原子核束缚很弱的束缚电子，它很容易受激发成为自由电子。这样，掺入硅中的每一个磷原子都可提供一个自由电子，如图1—5(a)所示。因此在这样的半导体中，

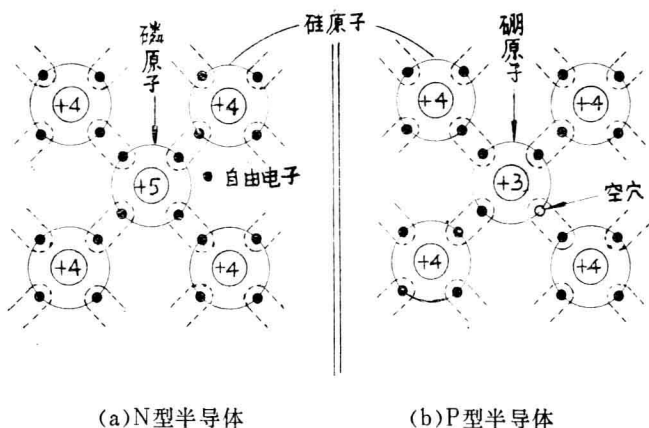


图 1—5 杂质半导体