

Jingtiguan Gaopin Dianlu

晶体管高频电路

谢沅清 籍义忠编著

上册

人民邮电出版社

晶体管高频电路

上册

谢沅清 编著
籍义忠

1107565



人民邮电出版社

DL16/15

内 容 提 要

本书分上、下两册，上册包括：半导体物理基础、晶体管高频特性、等效电路、宽频带放大器、线性谐振放大器；下册是介绍非线性谐振放大器、振荡器、变频器、调幅器、检波器、调频器、鉴频器以及锁相电路等。

本书内容以理论叙述和必要的数学推导为主，并力求用物理概念来加以说明，使数学表达形式与物理概念密切结合起来。

书中还提供了必要的工程实用公式和一些经验数据，以供实际应用。

晶 体 管 高 频 电 路

上 册

谢沅清 籍义忠 编著

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街 27 号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：787×1092¹/₃₂

1979年9月第一版

印张：15²⁸/₃₂ 页数：254

1979年9月北京第一次印刷

字数：364千字

印数：1—71,000册

统一书号：15045·总 2298-无 668

定价：1.60 元

前 言

晶体管电路方面的书国内虽已出版了不少，但目前还没有见到适合通信技术需要的高频电路理论读物。本书是根据笔者从事晶体管电路的教学和实践工作中积累的一些资料和经验，加以充实和系统化而成，希望能够填补这方面的不足。

本书是讲高频电路的，但“高频”电路和“低频”电路之间很难划一个非常明确的界线。习惯上有两种分法：一种是以电路的工作频率分，将音频以下的电路划为低频电路；而将音频以上的电路划为高频电路。另一种划分方法是按使用管子的内部电抗分量在电路中所发生影响的大小来区分。当管子内部等效电抗对电路的工作特性不产生显著影响时则划为低频电路，否则划为高频电路。本书所介绍的电路，基本是指后一种高频电路。

对于高频电路，特别是非线性高频电路，影响电路工作特性的因素很多，要作出准确的定量分析，往往难免要得出冗长的数学表示式。这些繁杂的数学结果，很难切合工程实际应用。另外，由于晶体管参数本身的离散性很大，以及高频寄生参数难以准确估计等原因，即使我们不厌其烦地应用这些结果进行精确的计算，但其所得结果，与实际情况仍是有不少差别的。

综合上述情况，在写本书时，试图用下述方法以达到比较好一些的效果。

1. 在讲述等效电路及数学分析的同时力求从物理概念上

进行说明。

2. 对于一些决定电路特性的主要数量关系, 则加以必要的推导, 并给出其结果, 以便于实际应用。

3. 对于一些较繁的数学关系, 根据需要有选择地进行推导, 并给出其结果, 以便借助“数学语言”, 用以说明电路参数与工作特性之间的关系。但在设计举例时, 并不引用这些冗长的数学公式, 而是另外推荐一系列经验数据作为估算的参考, 以供实用。这些经验数据是综合理论分析和实验结果得出的。

4. 通过定性分析, 介绍一些为实现某种预想结果, 如何调整电路参数的方法。

虽然我们所介绍的一些经验数据和调整电路的方法, 大部分来自实践。但由于我们的实践经验不足, 这些经验数据和调整方法很可能存在片面性, 甚至会有错误。

本书分上、下两册, 上册的主要内容是介绍晶体管高频特性、等效电路、宽频带放大器、线性谐振放大器。下册主要内容是介绍非线性谐振放大器、振荡器、倍频器、变频器、调幅器、检波器、调频器、鉴频器、锁相电路等。另外还介绍已调波通过电子电路的失真和几个有关电子电路的特殊测试问题。

本书力求偏重讲述基本原理和基本分析方法, 在部分章节中, 为使计算方便对等效电路作了某些技巧性的简化, 另外, 由于电路的“花样”是很多的, 不可能面面俱到。故本书仅对其具有代表性的基本形式给予分析。我们认为, 只要掌握了基本工作原理和基本分析方法, 是有可能做到触类旁通的。但由于作者水平有限, 可能做得很不够, 只是“抛砖引玉”而已。

每一章末, 附有若干复习题和思考题, 供读者参考。

在编写本书过程中, 赵学泉、梅邨、梁郭泰、邵庆庆、李兆凤、盛立东等同志, 阅读了部分原稿, 提出了一些有益的意

见；罗秉锋、邵庆庆，赵学泉、盛立东等同志还协助完成了个别实验，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中一定有错误或不尽确切之处，请广大读者予以批评指正。

作者

目 录

第一章 半导体物理基础	1
第一节 半导体内的电子状态	1
一、原子能级与晶体内能带的形成	1
二、导带、满带和空穴的形成	3
三、N型半导体与P型半导体	4
四、半导体中载流子的分布规律	7
五、本征激发与杂质激发	11
第二节 PN 结	14
一、势垒形成的物理过程	14
二、非平衡载流子的复合与扩散	17
三、PN 结的伏安特性	20
四、PN 结的温度特性	25
第三节 PN 结的电容效应	27
一、PN 结电容效应的物理解释	27
二、势垒电容与外加电压的关系	30
三、PN 结的交流阻抗和扩散电容的求取	35
第四节 晶体三极管	39
一、面结型 PNP 晶体三极管直流偏压下的电流	40
二、空穴在基区的运动与分布和基区传输系数	42
三、晶体管各极电流的分配	49
第二章 晶体管小信号等效电路	53
第一节 小信号作用下晶体三极管的分析	54
一、小信号作用下晶体管电流电压的关系	54

二、晶体管共基极短路电流放大系数 (α)	65
第二节 混合 π 等效电路	76
一、导纳参数的简化	76
二、混合 π 等效电路的导出	79
三、等效电路中各元件的物理意义及其主要应用特性	84
四、共发射极短路电流放大系数 (β)	89
五、混合 π 参数的近似求法	101
第三节 高频 T 型等效电路	102
第四节 晶体管高频 Y 参数	104
一、Y 参数等效电路的导出	105
二、Y 参数的物理意义	107
第五节 晶体管 H 参数及其等效电路	112
一、低频共发射极 H 参数与混合 π 参数的关系	112
二、高频共基极 H 参数等效电路	115
附 录 晶体管的四端网络分析法	121
第三章 共发射极放大器的高频特性	129
第一节 共发射极放大器及其等效电路	129
一、电路的基本形式	129
二、等效电路及其简化	130
第二节 负载为纯电阻, 且集电结电容的容抗远大于 负载电阻时的放大系数	133
一、放大级的放大系数 $\dot{K}$	134
二、放大级的放大系数 ($\dot{A}$)	138
第三节 负载为下级共射极放大级, 且集电结电容容 抗远大于负载阻抗时的放大系数	140
第四节 容性负载情况下的放大系数	146
一、应用“密勒效应”简化等效电路	147
二、放大系数 $\dot{K}$	149

附 录 低通型一阶基本网络的传输特性	153
第四章 共基极宽频带放大器	157
第一节 共基极宽频带放大器基本电路	157
第二节 传输线变压器	159
一、传输线变压器的工作原理	159
二、4:1 阻抗变换器	167
第三节 共基极传输线变压器耦合放大器的频率特 性	179
一、高频等效电路	180
二、高频特性的分析	182
三、低频特性的分析	188
四、放大器的增益	189
第四节 频率特性的图解法	190
一、基本概念	191
二、幅-频特性的特征与极点值的关系	192
三、升峰点频率和截止频率在复平面上的位置	193
四、极点虚、实部变化时幅频特性的变化	195
第五节 共基极传输线变压器耦合放大器计算举例	198
第五章 扩展放大器通频带的电路	203
第一节 单级串联负反馈电路	203
一、纯电阻串联负反馈	204
二、容性阻抗串联负反馈	211
第二节 单级并联反馈电路	215
一、纯电阻并联负反馈	216
二、感性阻抗并联负反馈	229
第三节 两级串联负反馈电路-“负反馈对”(一)	232
一、等效电路及其简化	233
二、高频特性的分析	236

三、零频放大系数的简化计算式	244
四、工程设计原则	245
五、设计举例	249
第四节 两级并联负反馈电路-负反馈对(二)	251
一、等效电路及其简化	252
二、高频特性的分析	255
三、零频放大系数的简化计算式	261
四、自激问题的讨论	262
五、工程设计原则	264
六、设计举例	267
第五节 共射-共基混合连接放大器	271
一、电路简述	271
二、高频特性	272
第六节 共射-共集混合连接放大器	274
一、等效电路	274
二、高频特性	278
第七节 高频补偿电路	280
一、简单电感补偿电路	281
二、复杂补偿电路	285
附 录 电压串联“负反馈对”采用PNP、NPN管配 合时和采用同一导电型管时,直流工作状 态的比较	287
第六章 放大器的时间特性	290
第一节 分析时间特性的激励信号	290
第二节 单级共射阻容耦合放大级的时间特性	292
一、中间时间阶段特性	293
二、短时间特性	293
三、长时间特性	297

第三节 多级放大器的时间特性	304
一、短时间特性	305
二、长时间特性	309
第四节 瞬态(时间)特性与稳态(频率)特性的关 系	309
第五节 减小瞬态失真的方法	314
一、单级串联负反馈电路	314
二、集电极电感补偿电路	316
三、瞬态特性和传输函数极点的关系	321
四、去耦滤波器补偿长时间特性	322
第六节 测试瞬态特性的激励信号	325
附 录 拉氏变换的基本概念介绍	328
第七章 宽频带放大器的几个特殊问题	335
第一节 弱信号输入级的噪声问题	335
一、器件内部噪声产生的原因	336
二、噪声带宽 Δf	341
三、噪声电路分析	344
四、噪声系数	347
五、晶体三极管的噪声系数	349
六、多级放大器的噪声系数	356
七、提高放大器输出信噪比的方法	357
第二节 放大器的阻抗匹配	361
一、阻抗匹配的目的	361
二、阻抗匹配原理	362
三、几种宽频带放大器的阻抗匹配	363
第三节 大信号输出级的输出能力	370
一、低阻抗负载输出级	370
二、高阻抗负载输出级	375
三、提高输出级输出能力的方法	377

第四节 自动增益控制	383
一、自动增益控制系统工作原理	383
二、可变衰减器的特点	384
三、对 AGC 中直流放大器的要求	393
四、自动增益控制系统实际电路介绍	394
第八章 LC 振荡回路	399
第一节 单振荡回路	399
一、串联振荡回路	400
二、并联振荡回路	415
三、通用谐振曲线	421
四、单振荡回路的时间特性	423
第二节 耦合振荡回路	425
一、电感耦合双回路的 Y 参数	425
二、电感耦合双回路的频率特性	430
三、电容耦合的耦合回路	444
第三节 振荡回路和信号源及负载的连接	447
一、部分接入法的本质是提高回路 Q 值	449
二、最大功率传输条件	451
三、信号源获得指定负载的条件	454
第九章 线性谐振放大器	457
第一节 线性谐振放大器的分析	457
一、电路简述	457
二、中和	460
三、放大系数	466
四、极限工作频率	468
五、中和不完善时的放大特性	472
六、产生自激振荡的条件	475
第二节 减小线性谐振放大器寄生反馈不良作用和 消除自激的方法	480

一、降低放大级增益	480
二、采用共射-共基串接电路	483
三、采用共集-共基连接电路	484
第三节 线性谐振放大器的自动增益控制	485
一、自动增益控制电路介绍	486
二、自动增益控制原理	487
第四节 线性谐振放大器的估算方法	490
第五节 调整和测试线性谐振放大器时应注意的几个问题	493

第一章 半导体物理基础

本章概括地介绍了半导体物理学中的一些基本知识，它对于学习和理解晶体管内部物理过程及其高频下的性能是必不可少的。这里首先根据能带理论简述了本征半导体、N型半导体、P型半导体内部载流子的情况，而后介绍了P型和N型半导体所构成的PN结所具有的特性。PN结不仅是构成晶体二极管的基本结构，也是构成晶体三极管的基础。本章最后对晶体三极管内部物理过程进行了分析。

第一节 半导体内的电子状态

一、原子能级与晶体内能带的形成

任何物质的原子都是由一个带正电的原子核和若干带负电的电子组成。电子受原子核的吸引而围绕着核作旋转运动。量子力学指出，原子中电子的能量只容许取一些特定的值，其中每个能量值称为一个能级。电子由于各自所具有的能量不同，而分别运动在核周围不同的“轨道”上。因此每一个轨道对应着一个原子能级，最内层轨道上的电子本身具有的能量最小，所处的能级最低；最外层电子能量最大，所处的能级最高。故对电子而言，原子能级由内向外逐渐升高。应当指出的是这里所指的轨道与经典原子学说中的轨道不同，量子化的电子轨道是指电子出现在这里的几率最多。例如，所谓内层轨道是指能量

较低电子出现几率最多的核附近区域；而外层轨道是指能量较高的电子出现几率最多的外围区域。

半导体和其它固体一样，是由相同原子周期地重复排列而成，组成所谓的晶格。当原子相互接近时，轨道之间会有不同程度的交迭，当然最外层轨道交迭得最多。交迭轨道上的电子再不会局限于一个原子，而会由一个原子转移到相邻的另一个原子上，产生了所谓的电子共有化运动。这样，共有化电子有可能在整个晶体内运动。由于轨道的交迭程度不同，电子共有化程度也不同。一般说来，内层轨道电子与在单个原子内的运动差不多，而外层轨道电子，共有化特征显著。如果把每个原子的电子轨道由内向外依次标为 $1S$ 、 $2S$ 、 $2P$ 、 $3S$ ……等能级。每个原子的同层轨道称为相似轨道，电子的共有化运动只能在相似轨道上进行。因为相似轨道处于相同的能级上。例如，一个原子 $3S$ 轨道上的电子只能转移到相邻原子的 $3S$ 轨道上。

以上叙述是在原子能级的基础上进行的。实际上，由 N 个原子组成晶体时，由于相互之间的影响，原来能量相等的 N 个相同能级，转换为 N 个共有化运动状态后，能量彼此不再相等，而分散在有一定宽度的能带里，能带里含有的能级数等于原子个数 N 。能带的宽窄由晶体性质决定，与原子数 N 无关。

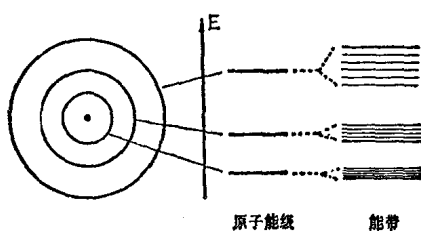


图 1-1 原子能级图

N 增加，共有化能级数增加，这增加了能带内能级的密集程度。由于实际晶体中原子数 N 是很大的，所以能带中的能级通常认为是连续的。能带的宽窄也直接

反映出共有化程度的大小。原子的外层轨道重迭多，共有化特

点显著,分散后的能带较宽;内层轨道相互重叠很少,原子运动的特点是主要的,分裂的能带就窄。图 1-1 给出了原子能级与电子轨道的对应关系以及它分裂成能带的示意图。由图上可以看出能带由低到高逐渐变宽。在两个能带之间一般不存在着能级,我们称这个范围为禁带。禁带宽度也是由晶体性质决定的。

二、导带、满带和空穴的形成

根据量子力学中的泡利定理,原子中每个能级上最多只能容纳两个自旋方向相反的电子。电子占据能级依次是由低向高,即低能级的能带先被电子占满,而后向较高能级的能带填充。在最高能级的能带中,根据原子含有电子数的不同,有的被完全充满,有的处于半充满状态,有的完全空着。被电子完全充满的能带称为满带,完全空着的能带称为空带。在固体中,凡是具有电子的能带都被电子充满,那么它就不能导电。因为外加电场并不会改变满带的分布情况,绝缘体就是这样。另外,如果除去满带以外,还有虽含有电子但未被充满的能带,那么它就可以具有一定的导电性,金属导体就属于这种情况。因此,导体和绝缘体的区别在于有无虽含有电子但未被充满的能带存在。

半导体在绝对温度为零时,较低的能带被占满,而上面的能带完全空着。所以在这种极限情况下和绝缘体一样,是完全不导电的。半导体和绝缘体的区别在于最上面的满带与空带之间的间隔——禁带的宽度 E_g 不同;绝缘体的禁带宽, E_g 大约为几个电子伏,而半导体的禁带窄, E_g 大约在 1 个电子伏左右。半导体在有限温度下,会有部分电子由于热运动,从最高的满带中被激发到上面的空带中去,使原来空着的能带获得一定的导电性。所以又称满带上面的空带为导带。绝缘体由于

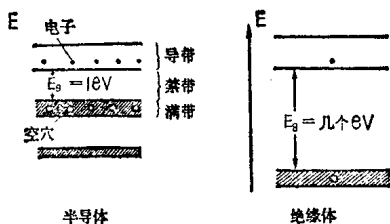


图 1-2 半导体和绝缘体能级图比较

禁带宽度大，在有限温度下被激发到空带中的电子数目很少，以致所引起的导电性实际上可以略去。半导体和绝缘体在有限温度下被激发的示意图如图1-2所示。

当满带中的电子由于热运动而跃迁到导带中后，在满带中就有一些“位置”(能级)空了出来。这样由于满带不再是被电子充满，而具有一些“空位”存在，满带中邻近的某些电子来填充这些“空位”时，又在电子原来所在的位置上留下“空位”，这新的“空位”又能为另一电子来补充，这种电荷的转移，使满带也获得一定的导电性。我们引用了“空穴”这一概念来描述上述满带中“空位”的导电作用，即认为满带中的导电是由于带正电荷的空穴移动的结果。

半导体在有限温度下，满带中有一定数量的电子被激发到导带中去，同时在满带中留下了同等数量的空穴，它们的共同特点是都能传导电流，因此我们通常把导带中的电子和满带中的空穴统称为半导体的载流子。

三、N 型半导体与 P 型半导体

在有限温度下，半导体满带中的电子被激发到导带中去所产生的电子、空穴对的导电性能，称为本征导电。半导体的本征导电对实际应用价值是不大的。但当半导体内掺入某种杂质后，其导电性能即有重大变化，下面我们以前面为例来说明掺入杂质后的情况。