

晶体管高频电路

谢沅清 籍义忠编著

上 册

人民邮电出版社

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：787×1092^{1/32}

1979年9月第一版

印张：15^{28/32} 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

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。

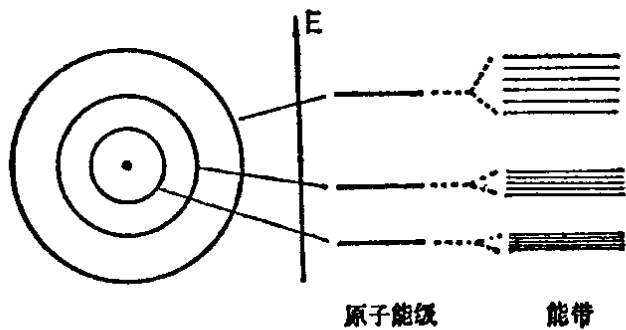


图 1-1 原子能级图

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

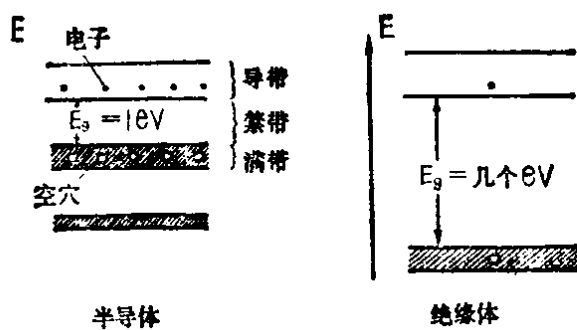


图 1-2 半导体和绝缘体能级图比较

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，下面我们以锗为例来说明掺入杂质后的情况。

1. N 型半导体

半导体锗、硅等是四价元素，其原子的最外层有四个电子，称为价电子，且与相邻原子组成共价键。这就是说，四个价电子正好填满了满带。当在锗中掺入一定量的五价元素如磷、砷，锑等以后，锗晶格中某些锗原子被五价原子所取代。五价原子最外层有五个价电子，其中四个电子各与相邻的锗原子的电子组成共价键，填满了满带，但还剩下一个多余的电子松弛地附着在原核附近。当它获得一个较小的能量时，很容易跃入导带中。这就使这个失掉电子的杂质原子带正电，处在原位置上振动，成为一个不能移动的正离子。因为五价杂质的每个原子可以提供一個电子进入导带参与导电作用，故被称为施主杂质。含有施主杂质的半导体，导带中的电子数增加，导电机能主要由带负电的电子承担，因此称为 N 型*半导体。N 型半导体二维结构示意图如图 1-3(a) 所示。

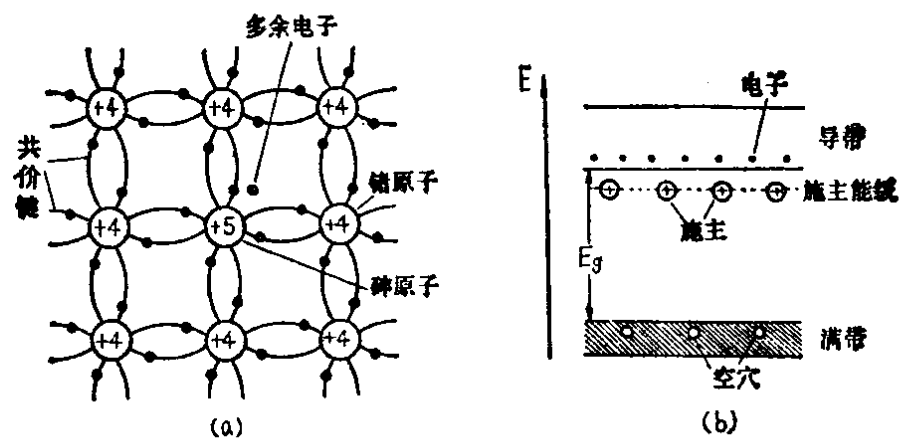


图 1-3 N 型半导体二维结构示意图与能带图

* N 是英文“Negative(负)”的第一个字母，意思是象征由带负电荷的载流子导电。

根据施主杂质中的多余电子需要获得一个较小的能量（电离能）才能被激发到导带中，但是它又比满带中的电子跃入导带所需要的能量小得多的事实，说明施主杂质束缚多余电子的能级比导带的能级低，而比满带的能级高得多，它处于禁带中靠近导带底下面的位置，如图 1-3(b)所示。因为施主杂质与锗、硅等是不同种类的元素，它们的能级位置处于半导体的禁带中是完全可以的。在锗中，禁带宽 E_g 约为 0.7 电子伏，施主电离能约为 0.01 电子伏左右。通常在室温下，所有施主原子已被电离，多余电子都被激发到导带中去。

2. P 型半导体

如果在锗中掺入三价元素如硼、砷、铟等，则晶格中的某些锗原子将被三价元素所替换。三价元素最外层有三个价电子，和相邻的四个锗原子形成共价键时缺少一个电子。因此在三价元素周围产生一个空位（空穴）。这就使邻近锗原子的一个价电子只要受到很小能量的激励就容易跃入这个空位中。锗的价电子填充了这个空位后产生了两个结果，一是三价杂质元素的原子因外层多附着了一个电子而形成一个不能移动的负离子，二是锗原子外层失去一个价电子而使原来的满带中出现一个空穴，如图 1-4(a)所示。这种由于三价杂质掺入半导体后，它具有接收满带电子而使满带中产生空穴的作用，故称为受主杂质。受主杂质的掺入，增加了满带中空穴的数目。由于是利用荷正电的空穴，加强了半导体导电能力，所以含有受主杂质的半导体称为 P 型*半导体。

根据满带中的电子需要一个较小能量激励就能跃入受主杂

* P 字是英文“Positive(正)”一字的头一个字母，借以表明这种半导体是由具有带正电荷性质的空穴产生导电作用的。

质的空位中去，而它比跃入导带中所需的能量小得多的事实，说明受主杂质能接收电子的空位能级比满带顶的能级高一些，而比导带底的能级低得多，它应处于半导体的禁带内靠近满带顶的地方，如图 1-4(b)所示。

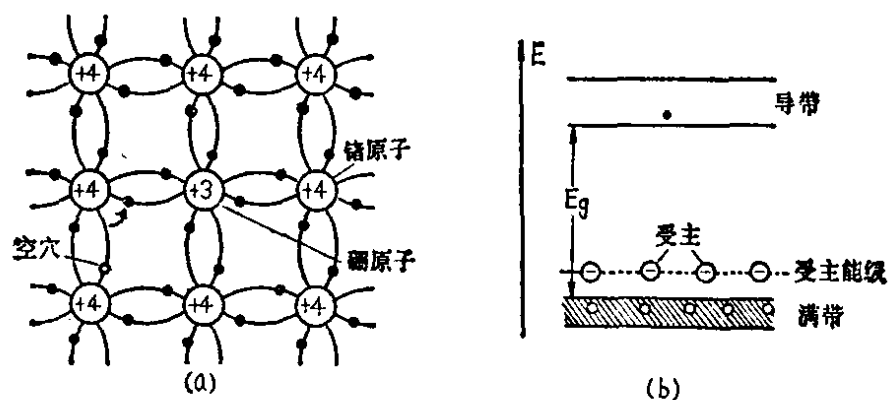


图 1-4 PN 半导体二维结构示意图及能带图

受主杂质能级与满带顶的能量差，根据杂质元素不同差别较大，例如在锗中，杂质镉为 0.0112 电子伏。

以上讨论的是一个纯净理想的半导体掺入单一杂质的情况，实际的半导体不可能那样纯，本身会含有这样或那样的杂质，同时晶格也存在着缺陷。这些都会形成受主或施主的电离中心，影响着半导体的导电性能。但是当我们所掺的杂质作用远大于这些影响时，半导体的内部情况可近似地认为如上讨论的那样。

四、半导体中载流子的分布规律

晶体管的导电特性与制成晶体管的半导体内部载流子数目的多少以及这些载流子所具有的能量有关。导带中的电子或满带中的空穴数目多少，是由不同能级上电子与空穴的分布几率以及不同能带范围内能级的数目所共同决定。下面首先介绍不同能级上电子的分布几率。

费米-狄拉克统计理论指出，如果某一能级的能量为 E ，该能级被电子占据的几率为

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{KT}} + 1} \quad (1-1)$$

式中 $f(E)$ 称为费米分布函数，其中 K 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度。 E_F 在统计理论中称为费米能级，其值大小与半导体本身结构、所含杂质情况以及温度有关。由式(1-1)可知，当 $E = E_F$ 时， $f(E) = \frac{1}{2}$ ，故费米能级是指电子占据几率为 $\frac{1}{2}$ 的那个能级。

在能量较高的能级上，若达到下列条件

$$E - E_F \gg KT,$$

则式(1-1)分母中指数项远大于 1，电子分布几率可表示为

$$f(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{KT}} = (e^{\frac{E_F}{KT}}) e^{-\frac{E}{KT}} \quad (1-2)$$

即电子占据能级的几率简单地取决于指数因子 $e^{-\frac{E}{KT}}$ ，这就是经典的波尔兹曼分布。它随着能级所具能量的增高，被电子占据的几率按指数率衰减，最后趋于零。半导体内导带中的能级，其所具能量远大于 E_F ，所以导带中电子分布的几率可按式(1-2)近似计算。

在满带内空穴分布的几率可由电子分布几率导出。因为满带中未被电子占据的能级就出现空穴，故能级被空穴占据的几率为

$$1 - f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_F-E}{KT}} + 1} \quad (1-3)$$

在较低的能级上，当满足条件