



半导体电路

南京邮电学院、北京邮电学院 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是结合电信技术编写的，供邮电高等院校作为试用教材，也可供其它高等工科院校通信、电子计算机、自动化和无线电技术等专业作为教学参考用书。对从事通信和电子技术的工程技术人员以及中等专业学校有关专业的师生来说，也有一定的参考价值。

全书共十五章，分上、下两册。上册主要内容为小信号放大电路及其分析计算。下册主要内容为功率放大、正弦波振荡、整流和稳压电源以及调制和解调电路等非线性半导体电路，此外还附带介绍一些电子管电路。

半 导 体 电 路

上 册

南京邮电学院
北京邮电学院 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津市第一印刷厂印刷

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 1979年9月第一版

印张：19 12/32 页数：310 1979年9月天津第1次印刷

字数：510千字

印数：1—56,000册

统一书号：15045·总2329—无682

定价：2.15元

前 言

半导体电路是高等工科院校通信、电子计算机、自动化以及无线电技术等专业的一门技术基础课，本书是结合电信技术编写的，可作为邮电学院的试用教材，也可供邮电工程技术人员自学参考。

全书共十五章，分上、下两册。上册主要讲解半导体器件的基本原理和特性，以及线性半导体电路的分析计算。下册主要讲解非线性半导体电路的分析计算。

本书是在南京邮电学院《晶体管电路》讲义的基础上，由南京邮电学院和北京邮电学院教师共同修改、补充和审订的，全书由郭祥沅同志主编，参加编写的有金惠幼、钱秀珍同志。参加上册审订的有沈树雍、钱彭年、盛名环、罗宏、金惠幼、郭祥沅、钱秀珍和孙志万等同志。

在编写过程中，南京邮电学院有线基础教研室许多同志参加习题整理、抄写、校对并绘制插图，做了大量的工作。

由于时间仓促，经验不足，书中难免有谬误之处，希望读者批评指正。

邮电部人事教育局

1979年2月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	1
1-1 半导体的导电特性	1
1-1-1 什么是半导体	1
1-1-2 半导体是怎样导电的	2
1-1-3 载流子的激发和复合	4
1-1-4 P型半导体和N型半导体	5
1-1-5 漂移电流和扩散电流	9
1-2 P—N结特性	12
1-2-1 P—N结的形成	12
1-2-2 P—N结的单向导电性	14
1-2-3 P—N结的电流方程	15
1-3 半导体二极管及其特性参数	22
1-3-1 构造	23
1-3-2 半导体二极管的特性与参数	24
1-4 晶体管的工作原理和特性	33
1-4-1 晶体管的基本结构	33
1-4-2 晶体管的放大作用	35
1-4-3 为什么晶体管会有电流放大作用	40
1-4-4 晶体管的电流分配关系	43
1-4-5 基区非平衡载流子浓度分布	45
1-4-6 晶体管的特性曲线	49
1-4-7 晶体管的参数	59
1-4-8 温度对晶体管参数的影响	65
1-4-9 晶体管的种类和特点	67
本章小结	72
附录 国产半导体器件型号命名方法	74
习题	75

第二章 放大电路的基本分析方法	78
2-1 单管放大电路及其工作原理	78
2-1-1 电路组成	78
2-1-2 基本工作原理	80
2-2 放大电路的图解分析法	91
2-2-1 图解法确定静态工作点	91
2-2-2 图解法分析放大状态	94
2-2-3 交流负载线	97
2-2-4 静态工作点和工作点变动范围的正确安排	98
2-3 放大电路的计算分析法	100
2-3-1 放大倍数的计算方法和步骤	100
2-3-2 晶体管的简单等效电路	103
2-3-3 晶体管输入电阻的计算	107
2-3-4 负载电阻对放大倍数的影响	110
2-3-5 元件参数对电压放大倍数的影响	112
2-3-6 放大器输入电阻和输出电阻的计算	114
2-3-7 放大电路的增益阻抗关系	117
2-4 单管放大器的设计计算	117
2-4-1 放大器的动态范围和不失真条件	117
2-4-2 在一定动态范围要求下放大器的设计计算	119
2-5 晶体管的低频小信号等效电路	122
2-5-1 晶体管低频小信号的准确等效电路	123
2-5-2 从网络观点导出低频小信号等效电路	127
2-5-3 利用 h 参数等效电路进行放大电路的分析计算	131
2-5-4 h 参数等效电路的简化	136
2-6 工作点的稳定	140
2-6-1 静态工作点变动的原因及其影响	140
2-6-2 分压式电流负反馈偏置的放大电路	144
2-6-3 分压式电流负反馈偏置放大电路的设计计算	149
2-6-4 电源电压的变动对工作点稳定性的影响	161
2-6-5 其它工作点稳定的放大电路	162

本章小结	168
习题	171
第三章 晶体管放大单元电路	178
3-1 射极输出器 (共集放大电路)	178
3-1-1 电路组成	178
3-1-2 射极输出器的基本关系式	179
3-1-3 射极输出器在调试中应注意的一些问题	183
3-2 共基放大电路	184
3-2-1 共基放大电路的基本关系式	185
3-2-2 共基放大电路的优缺点	189
3-3 共射、共集、共基三种放大电路的性能比较	189
3-4 变量器耦合放大电路	190
3-4-1 电路组成	190
3-4-2 变量器的基本特性	191
3-4-3 具有输入变量器的放大电路	193
3-5 直接耦合双管放大单元电路	195
3-5-1 工作原理	195
3-5-2 放大倍数的计算	196
3-5-3 设计计算方法	197
3-6 复合管及其放大电路	200
3-6-1 复合管的基本特性	200
3-6-2 复合管放大器	202
3-6-3 自举放大电路	204
3-7 晶体管放大单元电路小结	207
3-8 多级放大器	210
3-8-1 级间耦合方式	210
3-8-2 多级放大器的组成	211
3-8-3 多级放大器的分析计算	212
本章小结	223
习题	224
第四章 场效应管及其放大电路	228

4-1 结型场效应管	228
4-1-1 工作原理	228
4-1-2 特性曲线	231
4-2 绝缘栅场效应管	235
4-2-1 耗尽型MOS管的工作原理	236
4-2-2 增强型MOS管的工作原理	238
4-2-3 MOS管的类型	239
4-2-4 使用时的注意事项	240
4-3 场效应管的特点	242
4-4 场效应管放大电路	243
4-4-1 场效应管的三种连接方式	243
4-4-2 场效应管放大器的偏置电路	244
4-4-3 场效应管放大器的基本分析方法	245
4-4-4 场效应管共源放大电路	251
4-4-5 场效应管源极输出器	252
※4-4-6 场效应管与晶体管混合的跟随器	254
4-5 场效应管用作压控可变电阻	258
本章小结	258
习题	259
第五章 放大器的频率特性	262
5-1 放大器的频率特性	262
5-1-1 幅频特性和相频特性	262
5-1-2 放大器的频率失真和相位失真	264
5-1-3 放大器的频带（或通频带）	268
5-1-4 放大倍数的分贝（或奈培）数	270
5-2 网络函数和频率响应	274
5-2-1 网络函数	274
5-2-2 零点、极点和自然频率	276
5-2-3 极点或自然频率的求法	276
5-2-4 频率特性或频率响应	279
5-2-5 频率特性的近似图示法	279

5-3	单级RC耦合晶体管放大器的低频段频率特性	291
5-3-1	中频段的频率特性	292
5-3-2	低频段的频率特性	293
5-4	单级场效应管放大器的低频段频率特性	311
5-5	单级RC耦合晶体管放大器的高频段频率特性	313
5-5-1	晶体管的混合 π 型等效电路	314
5-5-2	高频段的频率特性	322
5-6	场效应管放大器的高频段频率特性	325
5-6-1	场效应管高频段等效电路	325
5-6-2	共源放大器的高频特性	325
5-7	放大器的全频段频率特性	327
5-8	变量器耦合放大电路的频率特性	329
5-8-1	变量器的频率特性	330
5-8-2	输入变量器耦合放大器的频率特性	331
5-8-3	具有输出变量器的放大器的频率特性	342
5-8-4	变量器的工艺结构	342
※5-9	射极输出器的频率特性	343
5-9-1	低频段频率特性	343
5-9-2	高频段频率特性	346
5-10	RC耦合多级放大器的频率特性	348
5-10-1	中频段的电压增益	348
5-10-2	低频段的频率特性	349
5-10-3	高频段的频率特性	352
5-11	展宽频带的方法	359
5-11-1	共射放大电路的频带宽度	359
5-11-2	负反馈法展宽频带	360
5-11-3	采用电抗元件补偿高频特性	362
5-11-4	组合电路展宽频带	367
5-12	放大器的噪声	370
5-12-1	噪声、信噪比和噪声系数	370
5-12-2	放大器中噪声的来源	371

5-12-3	晶体管噪声	372
5-12-4	噪声系数	376
5-12-5	场效应管的噪声	378
5-12-6	关于低噪声放大电路的几个结论	378
5-13	小信号多级放大器的设计	379
5-13-1	多级放大器设计的一般考虑	380
5-13-2	多级放大器设计示例	383
	本章小结	391
	习题	393
第六章	负反馈放大器	398
6-1	负反馈放大器的基本原理	398
6-1-1	负反馈放大器的方框组成	398
6-1-2	电压串联负反馈放大器的基本关系式	400
6-1-3	负反馈对放大器特性的改善	401
6-2	负反馈放大器的电路形式	409
6-2-1	负反馈放大器的四种基本形式	409
6-2-2	负反馈和正反馈的判别	412
6-2-3	负反馈放大器的输入端、输出端变量和转移增益	414
6-3	负反馈对放大器输入电阻和输出电阻的影响	419
6-3-1	负反馈对放大器输入电阻的影响	419
6-3-2	负反馈对放大器输出电阻的影响	421
6-4	负反馈放大器的特性和分析计算方法小结	423
6-5	负反馈放大器的分析计算方法	424
6-5-1	直接电路分析法和方框图法	424
6-5-2	反馈网络对基本放大器的负载作用	425
6-5-3	负反馈放大器的分析计算步骤	428
6-6	电流串联负反馈放大器	428
6-6-1	单级电流串联负反馈放大器	428
6-6-2	多级电流串联负反馈放大器	435
6-7	电压串联负反馈放大器的分析计算	436
6-7-1	射极输出器	436

6-7-2 两级电压串联负反馈放大器	438
6-8 电压并联负反馈放大器	442
6-8-1 单级电压并联负反馈放大器	442
6-8-2 多级电压并联负反馈放大器	446
6-9 电流并联负反馈放大器	447
※6-10 混合负反馈放大器	448
6-11 负反馈放大器的自激及其防止	455
6-11-1 自激的概念	455
6-11-2 自激的条件	457
6-11-3 防止负反馈放大器自激的方法	458
本章小结	466
习题	467
第七章 直流放大器	475
7-1 直流放大器出现的问题	475
7-1-1 级间耦合	475
7-1-2 零点漂移	478
7-2 差动放大器的工作原理	480
7-2-1 工作原理	480
7-2-2 差动增益	482
7-2-3 共模增益及共模抑制比	483
7-3 差动放大器的其它形式	486
7-3-1 单端输入、双端输出差动放大器	486
7-3-2 单端输入、单端输出差动放大器	488
7-3-3 比较放大器	490
7-4 差动放大器性能的改进	492
7-4-1 采用恒流源的差动放大器	492
7-4-2 采用“共模负反馈”的差动放大器	494
7-5 差动放大器的失调和零点漂移	497
7-5-1 输入失调电压、输入失调电流和放大器调零	498
7-5-2 差动放大器的零点漂移	499
本章小结	503

习题	505
第八章 集成运算放大器	507
8-1 集成电路的类型和特点	507
8-1-1 集成电路的主要类型	507
8-1-2 数字集成电路和模拟集成电路	509
8-1-3 模拟集成电路的主要分类	510
8-2 运算放大器的工作原理	511
8-2-1 基本放大电路	511
8-2-2 利用运算放大器实现数学运算	515
8-2-3 运算精度与电路参数的关系	520
8-3 运算放大器的内部电路	523
8-3-1 运算放大器内部电路的特点和方框组成	523
8-3-2 BG301线性组件的电路及工作原理	525
8-3-3 线性组件中常用的单元电路	527
8-3-4 5G24组件的工作原理	538
8-4 运算放大器的主要技术指标和它们的测试方法	542
8-4-1 输入失调电压 U_{os}	542
8-4-2 输入失调电流 I_{os}	543
8-4-3 输入偏置电流 I_B	544
8-4-4 电压放大倍数 K_u	544
8-4-5 输入电阻 R_i	545
8-4-6 输出电阻 R_o	546
8-4-7 共模抑制比CMRR	546
8-5 运算放大器的校正电路	548
8-5-1 利用开环增益频率特性判断放大器的稳定性	549
8-5-2 校正(或补偿)方法	550
本章小结	556
习题	557
第九章 窄带放大器	560
9-1 LC并联谐振电路的基本特性	562
9-1-1 固有并联谐振频率	563

9-1-2	谐振电阻和电路的品质因数	563
9-1-3	谐振曲线和通用谐振方程	564
9-1-4	有载时电路的品质因数和通用谐振方程	566
9-2	LC调谐放大器	567
9-2-1	调谐放大器的主要技术要求	567
9-2-2	简单的LC调谐放大器	570
9-2-3	采用部分接入电路的LC调谐放大器	575
9-2-4	多级LC单调谐放大器	582
9-2-5	双调谐电路放大器	583
9-2-6	LC调谐放大器的稳定性与中和电路	585
※9-2-7	利用Y参数分析调谐放大器的中和电路	588
※9-3	RC选频放大器	594
9-3-1	双T型选频网络	594
9-3-2	RC选频放大器的组成和特性	597
本章小结		602
习题		605

注：有※的节或小节是选学内容

第一章 半导体二极管和三极管

半导体电路中的关键元件是半导体二极管和三极管。要掌握和运用半导体电路技术，就必须对半导体器件的基本特性有所了解。

本章主要介绍半导体材料和半导体器件的基本结构，P—N结的特性，三极管电流放大原理以及二、三极管的特性和参数。

1—1 半导体的导电特性

半导体二极管、三极管、集成电路、可控硅整流器等半导体器件，都是由半导体材料做成的。下面介绍半导体材料的一些基本特性。

1—1—1 什么是半导体

在生产实践和日常生活中，我们知道有些物质，例如银、铜、铝、铁等很容易导电，叫做导体。另一些物质，例如塑料、有机玻璃、橡皮等很不容易导电，叫做绝缘体。而半导体，顾名思义，它的导电性能则介于导体和绝缘体之间。锗和硅（其化学符号分别是Ge和Si）是两种主要的半导体材料。

为什么有的物质容易导电，有的物质不容易导电呢？根本原因在于事物内部的特性，在于物质内部的原子结构，看其内部运载电荷的粒子（简称载流子）有多少。

原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的，电子分几层围绕原子核不停地在运动。原子核对内层电子的吸引力较大，对外层电子的吸引力较小。

金属导体的外层电子受原子核的束缚力很小，因此有大量电子

能够挣脱束缚而成为自由电子。这些自由电子成为载流子，它们在外电场的作用下作定向运动就形成了电流。由于金属的载流子很多，所以导电性能很好。

绝缘体中，原子的外层电子受原子核的束缚力很大，不容易挣脱出来。由于载流子很少，所以绝缘体导电性能很差。

半导体的原子结构比较特殊。载流子数目比导体少得多，但比绝缘体则多很多，所以导电性能介于导体和绝缘体之间。

1—1—2 半导体是怎样导电的

半导体的原子结构有什么特殊的地方呢？我们来看半导体材料硅和锗的原子结构，它们有一个共同特点就是最外层电子都是四个。通常把原子外层电子叫价电子，有几个价电子就叫几价元素。硅和锗都是四价元素。它们的示意图如图1—1—1所示，图中内圈里面的+4是表示除最外层四个价电子外，原子核与内层电子合在一起共带四个正电荷，这样，整个原子是电中性的。

当硅、锗半导体材料制成纯单晶体（一般称为本征半导体）时，它的原子排列就由杂乱无章的状态变成了非常整齐的状态。图1—1—2为硅和锗晶体二维的结构示意图。由原子理论知道，硅和锗原子的外层电子有八个才处于稳定状态。现在硅和锗的原子只有四

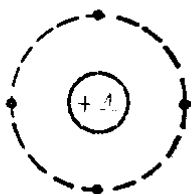


图1—1—1 硅原子和锗原子

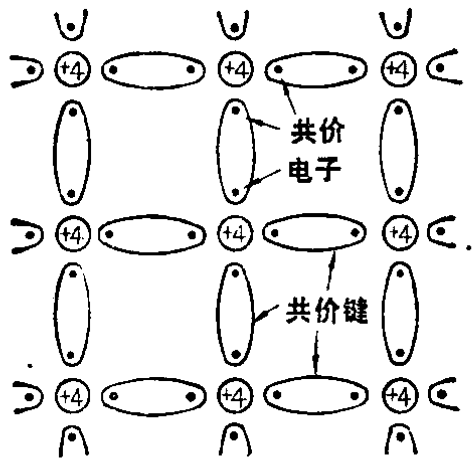


图1—1—2 硅和锗晶体结构示意图

个外层电子，因此在组成单晶体时，每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子以组成稳定状态。这样，每相邻两个原子都共用一对价电子，形成了共价电子对。图中电子边上的联线，称为共价键，表明这个电子是相邻两个原子所共有的。这样的组合叫做共价键结构。

在半导体硅、锗的共价键结构中，外层共价电子所受到的束缚力并不很大。在室温下，由于热能转化为电子的动能，其中少数共价电子就可能挣脱价键束缚而成为自由电子（简称电子），形成带负电的载流子。

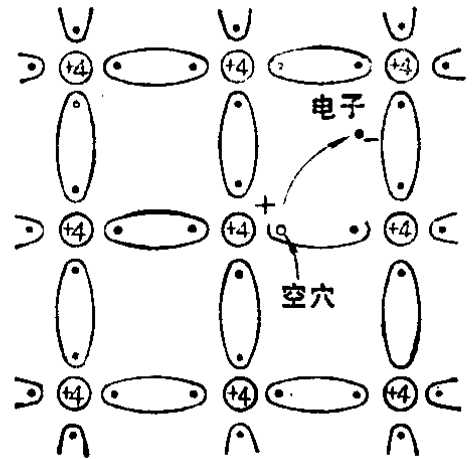


图1—1—3 激发产生电子空穴对

值得注意的是，共价电子在挣脱束缚成为带负电的自由电子后，共价键拆掉一根，留下一个空位，一般把它叫做空穴（图1—1—3）。空穴具有什么特性呢？

1.空穴带正电荷

我们知道半导体是由带负电荷的电子和带正电荷的原子核所组成的。因为这些正负电荷互相中和，所以不但整个半导体是电中性的，在价键完整的原子附近也是中性的。现在空穴所在的地方，失去了一个带负电的共价电子，破坏了局部的电中性，从而使得空穴带正电，并且它所带电荷大小刚好与电子电荷相等。

2.空穴可以在半导体内移动

当出现一个空穴后，它附近的共价电子就有了活动的余地，可以很容易地过来填补这个空位子，例如从B跑一个共价电子到A处的空穴位子上，正负电荷恰好中和，A处的空穴消失。但由于在B处失去了一个共价电子，在B处出现了一个空穴。这就相当于空穴从A移动到B去了。同样，如果又从C跑了一个电子到B去，再从

D跑一个到C去，依此等等，于是空穴就从B再跑到C，再跑到D等等，而在半导体内自由移动，如图1—1—4所示。以上分析表明，空穴的运动实质上还是一种电子运动的结果，不过不是自由电子的运动，而是共价电子从一处到另一处填补空穴位置的运动。由于这种共价电子的运动无论从效果上还是现象上，都好像是一个带正电荷的空穴按照共价电子运动相反的方向在运动，所以一般把这种共价电子的运动称为“空穴”运动，以与带负电荷的自由电子运动相区别。

由此可知，半导体中除了有带负电荷的电子载流子外，还有一种带正电荷的空穴载流子。当半导体处于外加电压作用下时（图1—1—5），其中的电子将跑向正极，空穴则跑向负极，而在电路中形成了电流。可见在半导体中，电子和空穴这两种载流子都参加导电，这是半导体的一个重要特性，与导体中只有一种电子载流子参加导电的情况有很大区别。

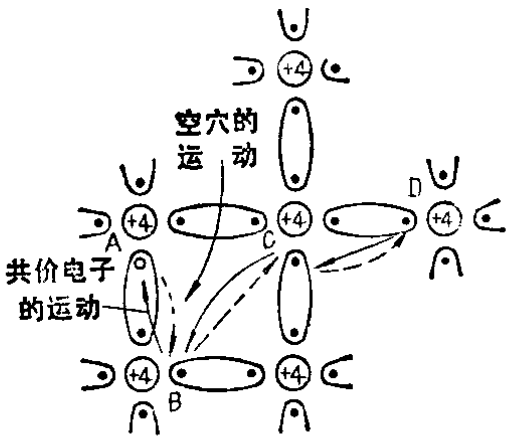


图1—1—4 空穴的运动

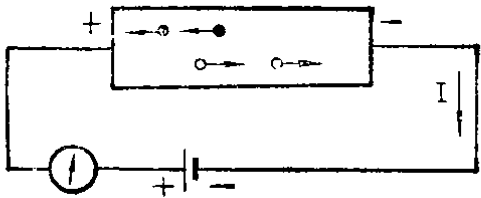


图1—1—5 半导体中的电流

1—1—3 载流子的激发和复合

在一定温度下，由于热能的作用，半导体中要不断产生自由电子，同时则出现数量相等的空穴。因为电子和空穴总是相伴而生，成对出现的，常称为电子——空穴对。这种由热能产生电子——空

穴对的现象，叫做热激发。自由电子和空穴在运动中又可能重新结合而消失，这叫复合，是与热激发相反的过程。电子——空穴对又激发、又复合，形成半导体内不断进行着的一对矛盾的运动。在一定温度下，这种矛盾运动达到相对平衡。这时，在半导体中热激发和复合虽然继续不断地进行，但电子——空穴对则维持一定的数目。这种状态叫做热平衡。通常我们把每1立方厘米(cm^3)体积中的载流子数目叫做载流子浓度，单位为个数/ cm^3 或 cm^{-3} 。在热平衡时，电子浓度 $\bar{n}$ 应等于空穴浓度 $\bar{p}$ ，即

$$\bar{n} = \bar{p} = n_i \quad (\text{cm}^{-3})$$

式中 n_i 称为本征载流子浓度。在室温(300°K)下，硅和锗的本征载流子浓度为：

$$\text{硅: } n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{锗: } n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

硅晶体的本征载流子浓度约为锗晶体的千分之一，这主要是由于在价电子挣脱共价键所需要的能量上，硅要比锗大得多。由热激发而破坏了的共价键，通常只占整个晶体中的极小一部分。例如硅的原子浓度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ，那么在室温下，大约每 3×10^{12} 个硅原子才有一个价电子挣脱共价键。而在室温下，金属中所有的价电子几乎都成了自由电子，由于这个原因，所以半导体的导电性能比金属差。

纯半导体的导电能力与温度有关。温度改变，热平衡被破坏，电子、空穴对的激发与复合进入新的动态平衡，得到另一个本征载流子浓度值。理论和实验都表明 n_i 随温度的提高而迅速增大，基本按指数规律上升。因此纯半导体的导电能力（反映为导电率）随温度提高而急剧增大。热敏电阻元件就是根据这个原理制成的。

1—1—4 P型半导体和N型半导体

上面分析的是本征半导体，它本身并没有多大用处。可是它具有一个很重要的性质，就是如果向本征半导体有目的地掺入某些杂