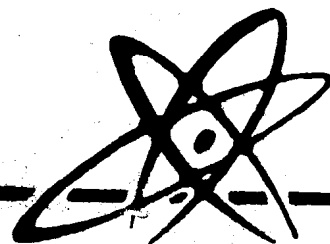


晶体管与晶体管放大电路

上册

周琼鉴 孙肖子 编

国防工业出版社



晶体管与晶体管放大电路

上册

周琼璠 孙肖子 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍晶体管与晶体管放大电路。全书分上、下两册。上册包括一至五章，介绍半导体物理知识，晶体二极管，晶体三极管，交流电压放大器，负反馈放大器，宽频带放大器等。下册包括六至十一章，介绍直流放大器，集成运算放大器，低频功率放大器，晶体管整流与稳压，场效应管与场效应管放大器，电子管与电子管放大器。

书中对基本概念、基本分析方法、实用的工程计算及调整测试方法作了较详细的讨论。内容通俗易懂，由浅入深，便于自学。

本书可作为高等院校和七·二一大学有关专业的教材，也可供从事电子线路的技术人员参考。

晶体管与晶体管放大电路

上 册

周琼鉴 孙肖子 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张24⁵/₈ 572千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数：00,001—90,000册

统一书号：15034·1901 定价：2.55元

前 言

本书是根据我们近年来的教学实践，为雷达专业的“晶体管线路”课（低频部分）而编写的。在内容上与通信、电视、仪表等专业的要求大体上是一致的。

本课程是专业基础课，为了使学员牢固地掌握本专业所必需的基本理论与基本技能，以适应科学技术迅速发展的需要，书中注意到加强基本概念、基本分析方法与基本工程运算能力的培养和训练。

理论联系实际是学习的普遍原则。本课程是一门实践性比较强的课程，为使所学理论能更好地指导实践，我们在进行各种放大器理论分析时，均从该放大器的主要指标和实际中可能遇到的问题出发，介绍工程中实用的分析计算方法以及调整测试原理，通过例题、习题介绍一些实用电子线路与实际数据。

本书力求反映现代电子技术发展的新水平，又适当照顾到现状。考虑到近年来线性集成电路有了很大发展，教材中增加了有关集成运算放大器、集成稳压电源的内容；又考虑到目前某些专业的装备和仪器中还有一部分电子管电路，本书也编了一章电子管与电子管放大器。

为了便于学员自学，本书在内容叙述上力求通俗易懂、由浅入深地阐明问题，注意数学分析与物理概念相结合。为了便于读者深入学习，我们还适当地增加了一些参考性内容，在章节标题上用符号“*”注明。对于初学者来说，可根据需要取舍。

本书是西北电讯工程学院二系电子线路教研组集体讨论与专人执笔相结合的方式编写而成的。周琼鉴同志编写了第一、二、三、五、十章，孙肖子同志编写了四、六、七、八、九、十一章。沙济彰、陆曼如同志作了全书的习题。

保铮副教授对本书的编写作了全面指导，林印心副主任在审稿中也提了许多宝贵意见。

编写中，我们参考了兄弟院校的有关教材。四机部教育局、陕西省电子局组织了三十五所、黄河机器制造厂、长岭机器厂、烽火机械厂等单位参加了上册初稿的讨论，提出了许多宝贵意见，谨借此向这些单位表示衷心感谢！

虽然经过反复的集体研究，但由于编者水平所限，在内容选择与文字叙述上定会有许多缺点和错误，恳切希望广大读者批评指正。

编 者 1978年

目 录

第一章 晶体二极管	1
§ 1-1 半导体的导电性能	2
一 什么是半导体	2
二 本征半导体	2
三 杂质半导体	6
四 半导体中的电流——漂移电流与扩散电流	8
§ 1-2 PN 结	13
一 PN 结的形成	13
二 PN 结的单向导电特性	15
§ 1-3 晶体二极管的伏安特性与主要参数	24
一 常用二极管的结构	25
二 二极管的伏安特性曲线	26
三 二极管的主要参数	29
§ 1-4 晶体二极管的测量	36
一 利用三用表 Ω 档粗测二极管	36
二 利用图示仪测量二极管	37
本章习题	37
第二章 晶体三极管	39
§ 2-1 晶体三极管的原理结构	39
§ 2-2 晶体三极管的工作原理	40
一 晶体三极管的电流分配	41
二 晶体三极管的放大原理	44
三 基区非平衡载流子的密度分布	46
§ 2-3 晶体三极管的静特性曲线	50
一 共基极特性曲线	51
二 共发射极特性曲线	54
§ 2-4 晶体三极管的主要参数	63
一 电流放大系数	63
二 极间反向电流	66
三 反向击穿电压	66
四 最大允许集电极电流	67
五 最大允许集电极耗散功率	67
§ 2-5 晶体三极管的主要类型、工艺和测量方法	68
一 晶体三极管的主要类型、工艺	68
二 晶体三极管的测量方法	72
本章习题	74
第三章 交流电压放大器	75

§ 3-1 放大器概述	75
一 用途	75
二 分类	76
三 对放大器的主要要求	77
§ 3-2 简单交流放大器电路和静态工作点的设置	78
一 简单交流放大器电路	78
二 放大器的两种状态——静态与动态	80
§ 3-3 放大器的基本分析方法——图解分析法	85
一 用图解法分析放大器的静态情况	86
二 用图解法分析放大器的动态情况	89
§ 3-4 晶体管的偏置稳定电路	96
一 温度对晶体管参数及静态工作点的影响	96
二 分压式电流负反馈偏置电路	101
* 三 稳定性分析的计算举例与偏置电路的进一步设计	110
四 其他偏置稳定电路	115
§ 3-5 晶体管的低频小信号等效电路	120
一 T型等效电路	121
二 h 参数等效电路	126
§ 3-6 放大器的基本分析方法——等效电路法	132
一 单级放大器放大倍数的分析与计算	132
二 多级放大器放大倍数的分析与计算输入阻抗及输出阻抗	137
三 其他接法的放大器	149
§ 3-7 阻容耦合放大器的频率特性	155
一 关于线性失真（频率失真与相位失真）和通频带的概念	155
二 单级 RC 放大器的频率特性分析	160
三 多级放大器的通频带	169
四 频率特性的分贝表示法	171
§ 3-8 放大器的设计与调试	175
一 放大器设计的一般原则	175
二 设计举例	187
三 放大器的调试	190
本章习题	194
第四章 负反馈在放大器中的应用	202
§ 4-1 反馈放大器概述	202
一 什么叫“反馈”	203
二 反馈放大器举例	206
§ 4-2 串联电压负反馈放大器	207
一 串联电压负反馈对三大指标（即放大倍数、输入阻抗、输出阻抗）的影响	207
二 负反馈的好处	211
三 串联电压负反馈放大器计算举例	217
§ 4-3 串联电流负反馈	223
一 闭环放大倍数 K_{vf}	224
二 输出阻抗 R_{of}	225

三 输入电阻及其他	226
四 计算举例	226
§ 4-4 并联电压负反馈	230
一 闭环放大倍数 K_{vf}	231
二 输入电阻 R_{if}	232
三 输出电阻 R_{of}	233
§ 4-5 并联电流负反馈	235
一 闭环放大倍数 K_{vf}	236
二 输出电阻 R_{of}	237
三 输入电阻 R_{if}	237
* 四 直流工作点计算与偏置电路的设计	238
§ 4-6 射极输出器	242
一 射极输出器的特点及用途	242
二 射随器的跟随范围及设计举例	246
三 进一步提高射随器的输入电阻	248
四 互补跟随器-射随器做为输出级的改进电路	253
五 两个实际问题	256
§ 4-7 反馈放大器的稳定性讨论	259
一 自激振荡的原因及其条件	259
二 多级放大器的自激振荡和反馈深度的关系	260
§ 4-8 寄生反馈及其克服办法	261
一 磁寄生耦合	261
二 寄生电容与寄生电感引起的寄生反馈	262
三 公用电源内阻引起的寄生反馈	263
四 通过地线的寄生反馈	264
本章习题	265
附注 做为输出级的射随器	273
第五章 宽频带放大器	276
§ 5-1 宽频带放大器概述	276
一 宽频带放大器的定义与用途	276
二 宽频带放大器的特点	276
三 宽频带放大器的分析方法	277
✓ § 5-2 晶体管的高频特性和高频等效电路	285
一 共基极高频T型等效电路	285
二 共射极高频混合 π 等效电路	289
§ 5-3 共射放大器的高频特性	297
一 高频增益与上限频率的分析	297
二 需要同时考虑输入、输出时常数时, 放大器上限频率的计算	304
三 共射极宽带放大器的输入阻抗与输出阻抗	306
§ 5-4 扩展放大器通频带的方法	312
一 利用负反馈扩展放大器通频带	313
二 利用复反馈提高放大器的上限频率	320
三 利用电感元件补偿放大器的高频特性	327

四 利用电抗元件补偿放大器的低频特性.....	335
§ 5-5 共基极、共集电极电路的高频特性、组合电路.....	339
一 共基极放大器的高频特性.....	339
二 共集电极电路的高频特性.....	342
三 三种电路比较.....	344
四 组合电路.....	345
§ 5-6 宽带放大器输出级.....	348
一 宽带放大器输出级的特点.....	348
二 典型RC放大器的输出振幅、振幅频带积.....	348
三 进一步提高振幅频带积的措施.....	350
§ 5-7 宽带放大器的设计、调试要点.....	352
一 宽带放大器的设计.....	352
二 宽带放大器的调试.....	360
本章习题.....	364
附注 串联电感补偿最佳补偿条件与上限频率的推导.....	367
附录.....	369
附录一 半导体器件型号命名法.....	369
附录二 部分常用晶体三极管参数举例.....	371
附录三 晶体管特性图示仪的原理与使用.....	375
本书部分习题答案.....	383

第一章 晶体二极管

内容提要

本章是研究与使用晶体管电路必备的基础知识。先从半导体材料讲起，然后着重介绍半导体器件的核心——PN结，最后介绍晶体二极管的外部特性曲线、主要参数和测试方法。

§ 1-1 介绍了本征半导体和杂质半导体的主要特点。这里特别需要弄清楚的概念是电子和空穴、N型半导体和P型半导体、载流子的漂移运动与扩散运动等的区别。

§ 1-2 讨论了PN结的形成及其单向导电特性。PN结是一切半导体器件的核心组成部分，它不仅是晶体二极管的基础，也是今后学习三极管和其他新型器件的基础。一定要从物理概念与定量关系上弄清楚PN结正向运用与反向运用两种情况下的本质区别。

§ 1-3 讨论了晶体二极管外部电流电压关系和主要参数。对于从事半导体线路工作的同志，必须很熟悉管子伏安特性在各区域的特点及各主要参数的定义、数量级，以便正确选择与使用管子。

§ 1-4 简要的介绍了二极管的测量方法。

晶体二极管和晶体三极管是现代雷达、通信等电子设备中最重要的两种半导体器件。它们和其他无线电元件（电阻、电容、电感等）按一定规律连接起来，就能够构成各种晶体管电路。因此，掌握晶体二、三极管的特性，理解它们的工作原理，是今后学习、应用和研究各种晶体管电路的重要基础。

为了适应各种实际应用场合的不同要求，二极管有许多类型，它们的结构尺寸、外形各不相同。但不论什么类型的晶体二极管，实际上都是一个用半导体制成的PN结。一个PN结最重要的特性之一是它的单向导电特性。二极管的单向导电特性可以用图 1-1 所示的实验来说明。

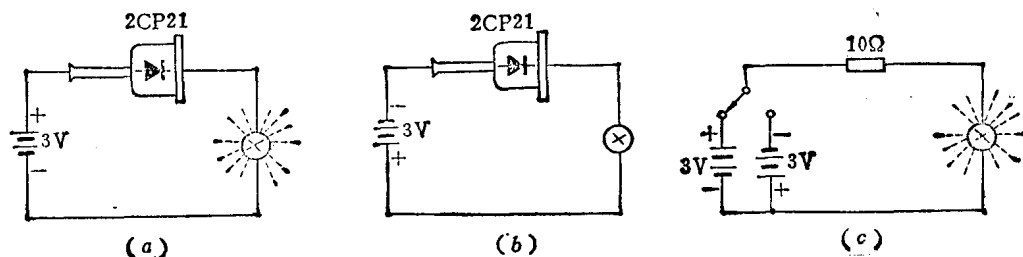


图1-1 二极管的单向导电特性

(a) 小灯泡亮；(b) 小灯泡不亮；(c) 接入电阻时小灯泡亮否与电源极性无关。

由图可见，当电池和二极管按如图 1-1(a)所示的方向连接时，小灯泡是亮的；如果把电池反接(图 1-1(b))，小灯泡就不亮。这个实验说明，二极管象一个阀门，它只允许电流从一个方向流通，而不允许电流从另一个方向流通，这就是所谓单向导电特性。若将

二极管换成电阻，如图1-1(c)所示，则不论电源极性如何接法，小灯泡总是亮的。由此可见，单向导电特性是二极管区别于一般电阻的一种特殊本质，二极管的符号“ H ”表示了二极管这一特性，箭头所指的方向表示允许电流流通的方向。

为什么二极管具有这种单向导电特性呢？这就要从管子内部的物理过程来解释。而二极管中的物理过程又是由构成它的半导体材料的特性所决定的，因此，必须从半导体材料的一些基本特性讲起，才能理解二极管为什么具有单向导电特性。

§ 1-1 半导体的导电性能

一、什么是半导体

大家知道，银、铜、铝等金属很容易导电，叫做导体；而塑料、云母、陶瓷等很难导电，所以称为绝缘体。半导体，顾名思义，就是导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物体。

物体的导电能力，一般用材料的电阻率 ρ 的大小来衡量，电阻率越大，说明这种材料的导电能力越差。一般金属的电阻率约为 $10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ；绝缘体的电阻率约为 $10^{10} \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ ；而半导体的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。例如，我们常用的几种半导体在常温（27°C）下它们的电阻率分别是：锗 $47 \Omega \cdot \text{cm}$ ，硅 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，砷化镓 $37 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体所以引起人们的较大重视，得到广泛应用，并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是由于在通常的技术条件下，半导体的导电能力会随温度、光照、或掺进一定杂质而显著变化。例如，纯硅（或纯锗）在温度等于绝对零度（即 $T = 0 \text{K} = -273^\circ\text{C}$ ）下相当于绝缘体，不能导电，但当温度升高至常温下且半导体掺进一定杂质之后，其导电能力就会急剧提高，在某些性质上甚至变得和导体相接近。

半导体的这些特点有着极其宝贵的实用价值。利用半导体的电阻率随温度或光照而强烈变化的特点，可以制成热敏电阻与光敏电阻。这类元件广泛用于工业和国防的自动控制设备中。对于晶体管来说，半导体最为宝贵的性质是，掺杂可以改变半导体的导电能力和导电类型，它是我们今天能够用半导体材料制造各种晶体管和集成电路的基本依据。例如，在纯硅中掺入百万分之一的杂质，就可以使其导电能力获得几十万倍以至几百万倍的提高。而选择不同类型的杂质元素，可以制成P型和N型两种不同导电类型的掺质半导体，利用这两种类型的半导体就可以制成二极管中的PN结。

为什么半导体具有上述这些特点呢？这就需要从它的内部导电机构上来说明。我们先来研究最简单的纯半导体，纯半导体也叫做本征半导体。

二、本征半导体

目前用来制造晶体管的半导体材料，主要是硅（Si）和锗（Ge）。下面介绍这两种本征半导体的晶体结构与导电机构。

（一）本征半导体的晶体结构

先介绍一下硅和锗的单个原子结构。我们知道，各种物质都是由原子构成的，而原子

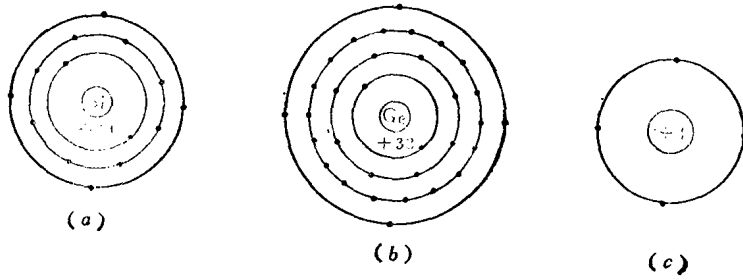


图1-2 硅原子和锗原子

(a) 硅原子；(b) 锗原子；(c) 硅和锗原子简化图。

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作不停的运动，最外层的电子称为价电子。有几个价电子就叫几价元素。硅和锗原子最外层的电子都是四个，所以硅和锗都是四价元素。如图1-2(a)、(b)所示。由于内层电子受原子核的吸引力（即束缚力）较大，同时又受到最外层价电子的屏蔽作用，因此不可能参与导电过程。只有最外层电子因受原子核束缚力较弱，在外界影响下才可能参与导电，所以有时把硅和锗原子简化为图1-2(c)，图中+4表示原子核与内层电子合在一起共带四个正电荷。

晶体管中所用的原材料硅和锗是由许多硅原子或锗原子密集组成的，它不但非常纯净^⑤，而且整个材料内部原子的排列也非常有规则，这种材料称为单晶体，这也就是“晶体管”名称的由来。图1-3是这种单晶硅的平面结构示意图。

硅和锗中的原子所以能非常有规则地排列在指定位置上，是由于它们的原子之间是依靠共价键结合起来的。所谓共价键，就是每个原子各拿出一个价电子和它相邻的一个原子共用。也就是说，每两个原子之间共用一对价电子，这对价电子中任何一个电子不仅围绕着自身的原子核运动，而且也出现在相邻原子核所属的轨道上，它既受本身原子核的吸引，又受相邻原子核的吸引，从而把两个原子牢固地束缚在一起。这种共价电子所形成的束缚作用就叫做共价键。硅和锗都是四价元素，它们的原子最外层有四个价电子，正好和四个邻近的原子组成四个共用电子对，即四个共价键，如图1-3所示。

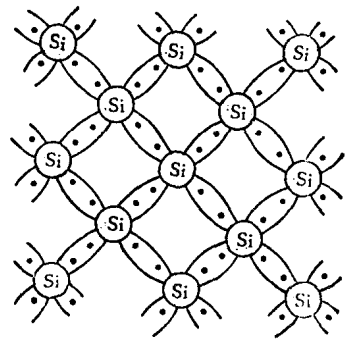


图1-3 单晶硅的平面结构示意图

应当指出，每个共价键中的电子只属于两个原子所共有，它们被束缚在这两个原子附近，不加额外能量是不能到处乱跑的，因此单晶硅或单晶锗中的共价键电子仍称作束缚电子。

(二) 本征激发

既然硅和锗的价电子是共价键中的束缚电子，它同时受到两原子的束缚力，那么本征硅或锗岂不是如同绝缘体一样不能导电吗？

原来，半导体中的价电子虽然受到两原子核一定的束缚力，但这种束缚力比绝缘体小得多。绝缘体的价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子，至少必须额外获得10个电子伏特(eV)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左右就可

^⑤ 目前制造晶体管所用的硅或锗的纯度一般在“9个9”以上，即材料中99.999999%以上是硅原子或锗原子。

以了。例如，硅为 1.1eV ，锗为 0.72eV 。价电子冲破束缚所需要获得的最起码的额外能量，称为电子的“激活能”，或“禁带宽度”^①。

因为晶体中的原子并不是静止不动的，在一定的温度下，这些原子会在它们占据的位置附近来回振动，这就是所谓“热运动”。这种热运动可以使价电子获得一定的额外能量。不过在温度很低接近于绝对零度时，原子的热振动十分微弱，价电子获得的能量总是小于禁带宽度，不能挣脱共价键的束缚。所以在这种情况下，本征硅和锗都是绝缘体^②。随着温度的升高，原子热振动增强，一部分价电子从原子热运动中获得的能量可以大于禁带宽度，从而冲破共价键的束缚而成为自由电子，使硅和锗变为能导电。当温度越高，能冲破束缚的价电子数目将越多，所以本征硅和锗的导电能力随着温度的升高而迅速增大。这种由于原子的热振动，使价电子由束缚电子变为自由电子的过程就称为热激发。此外，如果将半导体加电场（或用光照），半导体中的束缚电子也能从电场中（或入射光中）获得额外能量，脱离共价键的束缚而形成自由电子，这种激发称为电激发（或光激发）。在本征半导体中，价电子由束缚电子变为自由电子的过程，统称为本征激发。

值得注意的是，价键电子挣脱束缚而成为自由电子后，它同时在共价键中留下了一个空位子，如图 1-4 的 a 处，这个空位子有个专门的名称，叫“空穴”。空穴在晶体管中起很重要的作用，所以有必要研究一下空穴的特性。

(1) 空穴带正电荷 + q

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，整个原子是电中性的，与相邻原子形成共价键后仍然是电中性的。现在，处于空位置上的电子跑掉

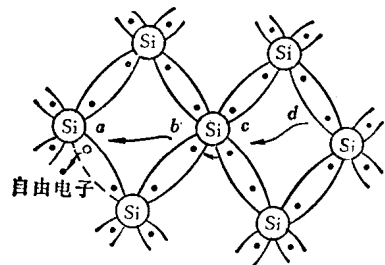
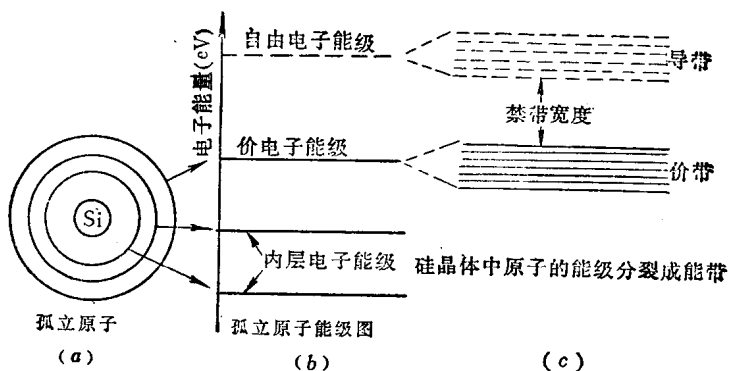


图 1-4 空穴的移动

- ① 根据量子力学的分析，孤立原子中的电子只能具有某一不连续的能量值，称为“能级”。束缚电子具有的能级较低〔愈内层的电子具有的能级愈低，见注②图 (b)〕。自由电子具有的能级较高。根据“泡利不相容原理”，每一条能级最多只能容纳两个电子，而这两个电子的自旋方向一定相反。当很多原子结合在一起时，由于它们的相互作用，所有电子的能级都分裂成一组组密集的能级带，简称“能带”〔见注②图 (c)〕。由价电子分裂的能级带称为“价带”或“满带”。内层电子不能参与导电，由它分裂的能带在能带图上通常不画。自由电子可能具有的能量范围称为“导带”或“空带”。导带与价带之间的能级差是电子不能占有的能级，称为“禁带”。可见，禁带宽度也就是价电子由束缚电子变为自由电子必须额外获得的最起码能量。



注②图

- ② 严格的说，在绝对零度时半导体才是不导电的。

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 ($+q$)。

(2) 空穴在半导体中也能自由移动

当晶体的某个共价键上出现一空位子后, 相邻共价键上的价电子在这个空位子所带正电荷吸引下很容易转移到这个空位子上来。这是因为价键电子这种转移并没有脱离共价键, 只是由一个键转移到另一个键而已, 而晶体中所有共价键的束缚电子具有的能量值很相近 (其能量差别比禁带宽度小得多), 依靠空穴的吸引力和原子的热振动使价键电子获得的额外能量就可以实现这种转移, 所以价键电子向空位子转移是十分自由的。价键电子向空位子转移也就是空位子以相反的方向从原处移到相邻的键上, 其过程如图 1-4 所示。当 b 键的价电子转移到 a 处的空位子后, a 处的空位子消失, 在 b 键处同时形成一个新的空位子, 其效果就好像是空位子从原来的位置移到相邻的 b 键上去一样。然后新的空位子又被邻近 c 键上的价电子所填充, 空位子又从 b 键移到 c 键上, ……这个过程持续下去, 就相当于这个带正电荷 ($+q$) 的空位子 (即空穴) 也可以在半导体中自由运动一样。举个通俗的例子, 好比大家坐在剧场里看节目, 如果第一排走了人, 出现一个空位子, 第二排的人向前坐, 空位子便移到第二排, 第三排的人又向前坐, 空位子又向后移, 如此下去, 就好像是空位子向后运动一样。显然, 这种空位子的移动同没有座位的人到处走动不一样, 后者好比是自由电子的运动, 而有座位的人依次填补空位的走动则好比是空穴运动一样。

空穴的运动实际上是共价键里的束缚电子 (即价键电子) 由一个键到另一键的移动。但通常情况下我们不说是价键电子的移动, 而直接说是空穴移动, 这样更有实际意义。这是因为本征半导体导电能力的强弱, 是决定于该半导体中自由电子空穴对的多少, 而不决定于价键电子的多少。价电子再多, 如果不出现空穴, 仍然不能导电。

总之, 空穴和自由电子一样, 都是“载流子”, 都能运载电荷而形成电流。两者的主要区别是: 自由电子带负电, 而空穴带正电。在本征激发下, 这两种载流子是互相依存成对出现的, 两者数量始终相等。在半导体中通常用“载流子密度”或“载流子浓度”(即单位体积内的载流子数) 来表示半导体内的载流子数目, 因此本征半导体导电机构的基本特点可描写为电子密度等于空穴密度, 即

$$n_i = p_i \quad (1-1)$$

式中 i ——本征半导体;

n_i ——本征半导体的电子密度;

p_i ——本征半导体的空穴密度。

(三) 产生与复合的动态平衡

在一定温度下, 本征半导体一方面会由于本征激发而不断地产生电子空穴对; 另一方面自由电子与空穴在运动过程中, 由于正负电荷之间的吸引力, 空穴中缺少的负电荷可能被自由电子所填入, 从而恢复一个共价键、消失一电子空穴对。前一过程通常称为“产生”; 后一过程称为“复合”。在复合过程中, 要同时放出在数值上等于禁带宽度的能量, 传给其他电子, 或者辐射出电磁波, 或者发光即放出光子。

自由电子和空穴的产生是热激发引起的, 热激发有使自由电子和空穴数量不断增加的

趋势，但这种趋势将被复合所阻止，产生与复合这对矛盾的对立统一，使半导体在一定温度下可以达到载流子数量的动态平衡。这时，虽然还不断地进行着产生与复合的过程，但在单位时间内，产生多少电子空穴对，同时也复合多少电子空穴对，所以从宏观角度看，自由电子和空穴的数目是不变的。这样一种状态，就叫做动态平衡或热平衡。

当温度升高时，晶体内原子的热振动加剧，于是热激发的作用增强，产生超过复合，原来的平衡被破坏，因而自由电子和空穴密度增加，它们之间相遇而复合的机会也就增大，最后便在一个新的载流子密度值上达到新的动态平衡。

根据理论分析和实验证明：热平衡时载流子密度 n_i 和 p_i 由下式决定：

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1-2)$$

式中 T ——绝对温度；

E_g ——物质的禁带宽度；

k ——玻耳兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/绝对温度 $= 0.86 \times 10^{-4}$ eV/K (因为 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J)。

由此可见：

(1) 本征激发所产生的载流子密度 n_i 和 p_i 是随温度的升高而基本上按指数规律增大的。因此，温度是影响晶体管工作性能的一个很重要的外部因素，这也是半导体能制成热敏电阻的根据。

(2) 本征激发所产生的载流子密度还与半导体材料的禁带宽度 E_g 有关。在常温(300 K)下，锗的 $E_g = 0.72\text{eV}$ ，硅的 $E_g = 1.1\text{eV}$ ，代入式 (1-2) 算得

$$\text{锗} \quad n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

$$\text{硅} \quad n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

可见，在同一温度下，硅的 n_i 只有锗的千分之一。

我们知道，各种金属导体中，自由电子的密度高达 $10^{22} \sim 10^{23} / \text{cm}^3$ ，相比之下，不难看出本征硅和本征锗的导电能力是很差的，而且它不能产生晶体二极管或三极管中所需要的物理过程，因此本征半导体不能直接用来制造晶体管，必须在本征硅（锗）中有选择、有控制地掺入某些杂质，才能制成晶体管。

三、杂质半导体

我们知道，制造晶体管的原材料必须是很纯净的单晶硅或单晶锗，看来半导体中含有杂质似乎是有利的，其实应当有分析地看待半导体体内的杂质。如果半导体内含有我们所不希望的杂质，或杂质过多时，的确会严重地影响半导体材料的性能，致使制造出的晶体管性能很差。但是，在高纯度的单晶硅或单晶锗中，有选择地掺入一定数量的某种杂质元素，却能使半导体的导电性能获得重大改善，并具有制造晶体管所需要的性质，这时掺入的杂质就成为是有利的了。下面就介绍两种制造晶体管最常用的杂质半导体——N型半导体和P型半导体。

(一) N型半导体

如果在本征硅或本征锗中掺入少量的磷(P)或锑(Sb)等五价元素，就得到电子性

半导体，也称为N型半导体。下面以本征硅中掺入磷为例进行讨论。

图 1-5 是在硅晶体中掺入少量磷的共价键结构示意图。按电性能的不同要求，一般是在硅中掺入万分之一到千分之一磷，重掺杂时可掺到百分之一左右，因此这种半导体中磷原子的数目比硅原子少得多，磷原子周围都是硅原子。我们知道，磷是五价元素，其原子最外层有五个价电子，其中只有四个价电子能与周围四个硅原子组成共价键，结果多出了一个价电子没有被组织进共价键，所以受磷原子核的吸引力很薄弱，因而只需少许激发能（在硅中是 0.044 eV ），便可挣脱磷原子核的束缚，成为自由电子。因此，室温下几乎所有磷原子多出的这个电子都能变为自由电子，由于磷原子能“施舍”出一个自由电子，所以称为“施主杂质”。

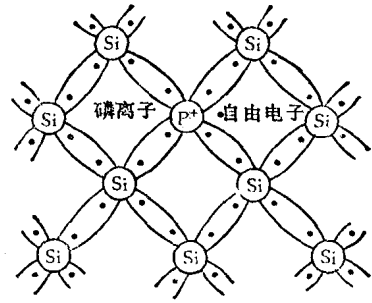


图1-5 硅中掺磷的共价键结构图

磷原子失去一个电子以后，便成为一个带正电的正离子。正离子与空穴不同，它是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，不能导电。

施主杂质的掺入，打破了本征半导体中两种载流子相等的局面，使得N型半导体中自由电子的密度 n_n 大大超过空穴密度 p_n ，即

$$n_n \gg p_n \quad (1-3)$$

这是因为，第一，在室温下，几乎每一个施主原子都能提供一个自由电子，所以自由电子的浓度基本上等于施主杂质的浓度。例如，用做硅平面管外延层的晶片，已知硅原子密度为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ ，现掺了 250 万分之一的磷，这相当于磷原子的密度 N_A 为 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。在室温下，施主磷全部电离，所以产生自由电子密度也近似为 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ ，而本征激发产生的电子空穴对密度 n_i 为 $1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。由此可见， n_n 比 n_i 大 100 多万倍。第二，在N型半导体中虽然也有本征激发产生的电子空穴对，但由于N型半导体中自由电子数目大大增加，这就使得空穴与自由电子复合的机会也大大增加。这样，在N型半导体中的空穴密度比本征半导体就小得多，在上述的例子中，空穴密度 p_n 大约只有 $1.2 \times 10^4/\text{cm}^3$ 。可见， n_n 比 p_n 要大 10^{12} 倍以上。

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”。由于这种半导体主要靠自由电子进行导电，因此我们称这种半导体为电子性半导体，或N型半导体。

应当指出，在N型半导体中，虽然自由电子数目远大于空穴数目，但整个N型半导体仍然是电中性的。在晶体的任何一个空间^①中正负电荷的数目相等，即

$$\text{自由电子数} = \text{空穴数} + \text{正离子数}$$

(二) P型半导体

如果在本征硅或锗晶体中掺入少量的硼（B）或镓（Ga）等三价元素，就得到空穴性半导体或称为P型半导体。下面以硅中掺入硼为例进行讨论。

^① 显然这个空间的尺寸不能小到只装得下一个电子，这个空间的尺寸应远大于原子间的距离，一般取边长等于30倍原子间距离，即 $30 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 的立方体为最小体积，因为根据近代物理知识，当空间的尺寸接近于原子间距离时，已不能把电子和空穴当作带电粒子看，而必须用波动的观点进行分析。

图 1-6 是硅掺入少量硼的共价键结构示意图。因为硼是少量的，其周围都是硅原子，又因为硼原子只有三个价电子，当它与周围四个硅原子进行共价键结合时，只能组成三个完整的共价键，自然有一个缺少电子的空位子，如图 1-6 中的 A 点。由于这个空位子的存在，附近硅原子共价键中的束缚电子只需取得少许激发能（硅掺硼是 0.045 eV），便能跳过去填补硼原子的空位子，使硼原子多一个电子而成为负离子，同时在附近产生一个空穴，这种现象称为受主电离。由于硼原子容易接受一个电子而在附近产生一个空穴，故称硼原子为“受主原子”，称硼为受主杂质。在常温下几乎全部硼原子都能电离成负离子，并产生相同数量的空穴。

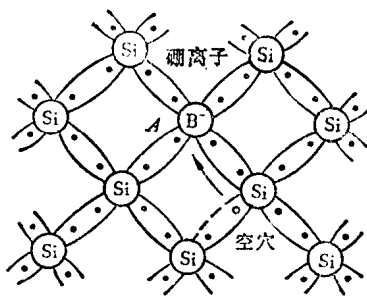


图1-6 硅掺硼的共价键结构图

由于掺入多少受主原子就能产生多少空穴，故半导体中的空穴密度大大增大，电子与它复合的机会也就大大增大，使电子密度比本征电子密度 n_i 还小。因此，在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子，空穴密度 p_p 远远大于自由电子密度 n_p （下标 p 代表 P 型半导体），即

$$p_p \gg n_p \quad (1-4)$$

但是整个 P 型半导体仍然是电中性的，即

$$\text{空穴数} = \text{自由电子数} + \text{负离子数}$$

式中，负离子是由硼原子和一电子组成的，它不能自由移动，不是载流子。

最后说明一下两种多数载流子的相互转换问题。如果在 N 型半导体中加进密度较高的受主杂质，则空穴抵消一部分电子后空穴仍占多数，则半导体就由 N 型转化为 P 型。如果再掺入密度更高的施主杂质，则电子又会重新占多数，半导体又转变为 N 型。这种现象叫做杂质的相互补偿作用。平面管、集成电路的生产中，广泛采用的多次扩散工艺（多次掺入不同杂质），就是利用这种杂质的相互补偿作用。

四、半导体中的电流——漂移电流与扩散电流

上述有关载流子的基本知识了解之后，就可以来讨论半导体电性能的一个重要问题——半导体中的电流。

我们知道，电流就是载流子的定向流动。在半导体中，载流子除了电子外，还有空穴。载流子的流动方式，除了电场作用下作漂移运动外，还会由于载流子的密度不均匀而产生扩散运动。前者形成的电流是漂移电流，后者形成的是扩散电流。现在分别介绍一下这两种电流。

（一）漂移电流

半导体中的漂移电流相当于金属中的传导电流，它是在电场作用下，载流子顺着或逆着电场方向运动而构成的电流。图 1-7 表示了这种电流。

在没有外加电场作用的情况下，自由电子和空穴在半导体中作无规则的热运动，不能构成电流。

如果在半导体两端加上电压，就会在半导体内建立起一个外加电场，见图 1-7。在场作用下，自由电子将逆着电场方向作定向漂移运动；而空穴则顺着电场方向作定向漂移运动。由于习惯上规定电流正方向就是正电荷的运动方向，即与空穴的运动方向相一致，而自由电子的运动方向与空穴相反，但自由电子带负电，所以电子电流 I_n 和空穴电流 I_p 的方向是一致的。因此，本征半导体中总的漂移电流等于这两种电流之和，即

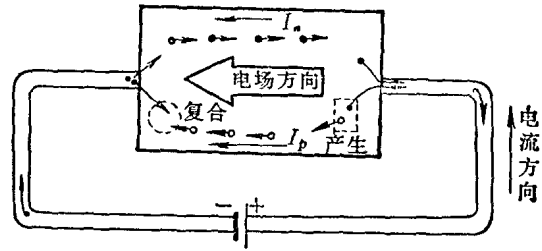


图1-7 载流子的漂移运动

$$I_t = I_n + I_p \quad (1-5)$$

首先来看一下电子漂移电流 I_n 的大小是由什么因素决定的。由图 1-7 可知，自由电子在外加电场作用下逆着电场方向作加速运动，但由于原子核的吸引力和其他电子的排斥力以及由于晶格振动而产生的散射作用等的影响，电子的速度不能无限地增大，最后将获得一个平均速度，以 \bar{v}_n 表示之。很明显，电子的平均速度 \bar{v}_n 和外加电场强度 E 成正比，即

$$\bar{v}_n = \mu_n E \quad (1-6)$$

式中， μ_n 是比例系数，称为电子迁移率，它表示在单位电场作用下电子的平均定向速度。

设电子漂移电流 I'_n 为单位截面积的电流——电流密度，则 I'_n 就是单位时间内通过单位截面积的总电子电荷，即

$$I'_n = qn\bar{v} = qn\mu_n E \quad (1-7)$$

式中 n ——载流子密度；

q ——单个电子所带的电荷， $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑。

实际应用中，习惯用电导率 σ_n 表示电场强度 E 和电流密度 I'_n 之间的关系，即

$$I'_n = \sigma_n E \quad (1-8)$$

比较式 (1-7) 和 (1-8)，得电子电导率为

$$\sigma_n = q\mu_n n \quad (1-9)$$

根据同样方法，可以导出空穴漂移电流密度 I'_p 为

$$I'_p = q\mu_p p E = \sigma_p E \quad (1-10)$$

$$\sigma_p = q\mu_p p \quad (1-11)$$

式中 σ_p ——空穴电导率；

μ_p ——空穴迁移率；

p ——空穴密度。

设半导体的截面积为 A ，且 A 内各处电流密度一样，则由式 (1-8) 和 (1-10) 代入式 (1-5) 可得通过半导体的漂移电流为

$$I = A(\sigma_n + \sigma_p)E = A\sigma E \quad (1-12)$$

式中 σ ——半导体的总电导率。

对于本征锗，在室温 (300K) 下， $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13}$ ， $\mu_n = 3900$ 厘米²/伏·秒 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)，