

高等学校试用教材

低 频 电 子 线 路

上 册

北方交通大学电信系编

人 民 铁 道 出 版 社

1 9 7 9 年 • 北 京

内 容 简 介

本书是根据全国高等学校工科基础课教材编写大纲讨论会制订的《低频电子线路》教材编写大纲编写的。全书分上、下两册。上册包括半导体器件、小信号低频放大器分析和负反馈放大器等三章。

本书可作为无线电类专业试用教材，也可供从事电子电路研究和设计生产人员参考。

高等学校试用教材 低频电子线路

北方交通大学电信系编

人民铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：21 字数：526 千

1979年7月第1版 1979年7月第1次印刷

印数：0001—21,000册

统一书号：15043·4056 定价：2.15 元

前 言

本书是根据全国高等学校工科基础课教材编写大纲讨论会制订的无线电类专业用《低频电子线路》教材编写大纲编写的。全书分上、下两册。上册包括半导体器件、小信号低频放大器分析和负反馈放大器三章；下册包括低频功率放大器、低频放大器的设计、直流放大器、运算放大器、稳压电源和电子管放大器六章。

上、下两册教学时数为140~150学时。讲授内容各校可根据实际情况加以取舍。

本书由北方交通大学蒋焕文（主编）、贺允东、孙肇燾、孙续、徐启明和宣家荣等同志编写。

本书由成都电讯工程学院（主审）廖长英、王明止、叶正华三同志初审。清华大学、华中工学院、南京工学院、北京邮电学院、西安交通大学、西北电讯工程学院和华南工学院的同志参加了审稿会议，他们对初稿提出了宝贵意见，对此，我们表示感谢。

本书编写过程中，曾得清华大学童诗白同志、北京航空学院周宁华同志和北京无线电器件厂易明铎同志等的帮助并提供资料，亦在此表示感谢。

由于我们水平有限，编写时间也比较仓促，书中还存在不少问题和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编 者

一九七八年十二月

目 录

第一章 半导体器件	1
第一节 半导体的基础知识	1
一、晶体的能带	1
二、本征半导体	7
三、杂质半导体	10
四、载流子在半导体中的运动	13
第二节 晶体二极管	22
一、PN结的基本原理	22
二、PN结电流的分析	25
三、晶体二极管的伏安特性	32
四、晶体二极管的电阻	35
五、PN结的稳压特性	36
六、晶体二极管的电容和变容二极管	37
七、晶体二极管的参数和类型	40
第三节 晶体三极管	42
一、晶体三极管的工作原理	42
二、共发射极放大器	48
三、晶体三极管的静态特性曲线	51
四、晶体三极管的参数	56
五、晶体三极管低频 h 参数微变量等效电路	60
六、晶体三极管的高频运用	65
第四节 场效应晶体管	79
一、结型场效应管的工作原理	80
二、绝缘栅型场效应管的工作原理	84
三、场效应管的微变量参数和等效电路	87
四、场效应管的直流参数	89
五、场效应管和晶体管的比较	90
本章小结	93
附录	94
参考资料	98
习题	99
第二章 小信号放大器的分析	107
第一节 放大器的用途、工作原理与主要指标	107
一、用途	107
二、简单放大电路	108
三、关于放大器的增益	109
四、增益的[分贝]表示法	111

五、频率响应	112
六、非线性失真	113
第二节 放大器的基本分析方法	114
一、图解法	115
二、晶体管放大电路的三种组态	118
三、用 h 等效电路分析晶体管放大器	119
四、三种组态(连接方式)中频放大特性比较	122
五、简化共发 h 等效电路的应用	124
第三节 晶体三极管的偏置和温度稳定性	127
一、工作点的选择和温度影响	128
二、利用电流负反馈稳定工作点	130
三、工作点稳定性的定量分析	134
四、分压式电流反馈偏置电路的设计要点	139
五、提高工作点稳定性的其他电路	141
第四节 RC 晶体管单级放大器的低频响应	146
一、线性系统响应的一般分析方法	146
二、单级共发放大器低频响应的分析	163
三、低频截止频率和电路元件的确定	166
第五节 RC 晶体管单级放大器的高频响应	168
一、单级共发放大器的高频响应	169
二、单向近似模型及其应用	172
三、单级共发放大器的增益带宽积	176
第六节 放大器的时域响应	178
一、单位阶跃电压和阶跃响应	178
二、放大器的阶跃响应	179
第七节 场效应管放大器	182
一、场效应管的偏置	182
二、单级共源放大器的中频特性和低频响应	190
三、单级共源放大器的高频响应	194
第八节 多级放大器	197
一、级间耦合方式	198
二、 RC (耦合)场效应管多级放大器的增益和带宽的计算	200
三、多个主导极点对放大器带宽、频响和阶跃响应的影响	204
四、多级 RC 耦合共发放大器的计算	210
五、多级放大器的增益带宽乘积	216
本章小结	216
参考资料	217
习题	217
第三章 负反馈放大器	226
第一节 引言	226
第二节 反馈的基本概念	226
一、关于反馈的基本概念	226
二、基本反馈方程式	228

第三节 反馈的分类	230
一、串联电流反馈	230
二、串联电压反馈	232
三、并联电流反馈	233
四、并联电压反馈	234
第四节 负反馈的效果	235
一、负反馈能使增益稳定性得到提高	235
二、“等效衰减网络”的概念	237
三、负反馈对非线性失真的改善	239
四、关于负反馈减小放大器噪声的问题	241
五、负反馈对频响的改善	242
第五节 负反馈对放大器输入和输出阻抗的影响	242
一、负反馈放大器的输入阻抗	243
二、负反馈放大器的输出阻抗	244
第六节 反馈放大器的分析方法	247
一、方框图分析方法的一般规则和步骤	248
二、串联电流反馈放大器的计算	258
三、串联电压反馈放大器的计算	261
四、并联电流反馈放大器的计算	263
第七节 反馈放大器的稳定性和频域及时域响应	265
一、关于放大器的稳定性问题	265
二、单极点反馈放大器的增益函数	268
三、双极点反馈放大器的增益函数	269
四、三极点反馈放大器的增益函数	275
五、根轨迹和闭环主导极点	278
六、实例计算	280
第八节 反馈放大器的稳定性分析	286
一、从环路增益函数的波特图谈起	286
二、奈奎斯特准则	289
三、根轨迹法	295
四、保证反馈放大器稳定工作的考虑	304
第九节 跟随器	308
一、射极输出器的跟随特性	308
二、射极输出器的高频响应	312
参考资料	317
习题	318
符号说明	327

第一章 半导体器件

用半导体制成的器件，统称为半导体器件。大家熟知的有晶体二极管和三极管、场效应晶体管 and 集成电路等。

晶体管电路是用一些半导体器件组成的电路，如用晶体二极管可组成整流和检波电路，用晶体三极管可组成低频和高频放大器等。因此，学习晶体管电路，首先要掌握半导体器件的工作原理。

本章主要介绍晶体二极管、晶体三极管和场效应晶体管，重点叙述它们的基本原理和特性。

为了了解这些半导体器件的原理，应该首先了解半导体的一些基础知识。

第一节 半导体的基础知识

本节着重叙述半导体的导电性能，作为以后各节的共同理论基础。

无线电技术发展的早期，曾经在接收机中用矿石作检波器，矿石就是一种未经提炼的半导体。真空管问世以后，这种用天然矿石做的检波器，很快就被淘汰了。1930年以后，量子力学的建立，才对半导体的导电机构有了认识。第二次世界大战期间，雷达使用硅和锗的检波器，解决了高频信号的检波。从此以后，对半导体的研究就迅速地发展起来。

大家都知道，半导体的命名，是因为它的导电能力介乎导体和绝缘体之间。金、银、铜和铝等金属是良好的导体，陶瓷、云母和塑料等属于绝缘体，而常用的半导体有锗（Ge）和硅（Si）等。三者的导电率分别是

金属： $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 以上

绝缘体： $10^{-22} \sim 10^{-14} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$

半导体： $10^{-9} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$

半导体在现代之所以得到广泛的应用，不在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间，而是因为它具有一系列特殊的性能：

（1）半导体的导电率可以随加入的杂质作明显的改变。例如，纯锗中掺入1亿分之一的杂质（称作掺杂）， 30°C 时，其导电率将增加到12倍。正因为掺杂可以改变和控制半导体的导电率，才能用它制成各种晶体管。

（2）温度可以明显地改变半导体的导电率，利用这种热敏效应可以制成热敏元件。

（3）光照不仅可以改变半导体的导电率，还可以产生电动势，这就是半导体的光电效应。利用光电效应，可制成光敏电阻和光电池。光电池已在空间技术中得到广泛的应用，而且为人类利用太阳能提供了广阔的前景。

一、晶体的能带

在量子力学基础上发展起来的能带理论，是研究半导体的理论基础。下面我们将定性地

介绍能带理论的主要概念。

(一) 原子中电子的能级

任何元素的原子都是由原子核和绕核运动的电子组成,电子在核周围形成一系列半径逐渐增大的壳层。原子核带正电荷,其数值与电子的负电荷相等,整个原子保持电中性。原子核的质量比电子大几千到几十万倍,但它的体积很小,半径约为 10^{-12}cm ,电子壳层的伸展范围约为 10^{-8}cm 。不同的原子,主要表现在原子核的质量和电子数量的不同。例如,半导体硅的原子序数是14,原子核有14个正电荷,核外有14个电子;锗的原子序数是32,原子核有32个正电荷,核外有32个电子。

在原子中,原子核与绕核电子的运动,服从微观的特殊规律,其中主要的是电子能量的量子化和泡利不相容原理。

1. 量子化原理

由原子物理学可知,原子中的电子绕核运动时,它的能量只能取一系列不连续的特定值,这称为电子能量的量子化。

如果将电子刚好脱离原子核束缚,成为自由电子时的能量取作能量的零值,则原子中电子可以取的能量特定值是

$$E_n = -\frac{mq^4Z^2}{8h^2\varepsilon_0^2n^2} \quad (1-1)$$

式中, m ——电子的质量 ($m=9.109\times 10^{-31}\text{kg}$);

q ——电子的电荷量 ($q=1.602\times 10^{-19}\text{C}$);

Z ——原子序数;

h ——普朗克常数 ($h=6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$);

n ——主量子数,可取1、2、3、…等正整数,每一个 n 值对应电子可取的一个能量值;

ε_0 ——真空的介电常数 ($\varepsilon_0=8.849\times 10^{-12}\text{F/m}$)。

以最简单的氢原子为例, $Z=1$, 式(1-1)是

$$E_n = -\frac{mq^4}{8h^2\varepsilon_0^2n^2} \quad (1-2)$$

当 $n=1$ 时, $E_1=-13.6\text{eV}$ 。1eV(电子伏特)是1个电子经1V电位差增加的能量, $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ 。 E_1 是负值,表示电子在这种运动状态时的能量低于刚挣脱核束缚的自由电子的能量(数值为零)。将 $n=2、3、\dots$ 代入式(1-2),可以算出 $E_2、E_3\dots$ 。当 $n\rightarrow\infty$ 时,自由电子的 $E_\infty=0$ 。

$n=1、2、3、\dots$ 时的特定能量值,称为能级。图1-1表示氢原子的电子能级图。电子只能处在这些不连续的能级 $E_1、E_2、\dots$ 上,而不能处于能级 $E_1\sim E_2$ (或 $E_2\sim E_3$ 等)之间。

根据能量最小原理,在正常状态下,氢原子的电子处在最低能级 E_1 上,这称为基态。当电子从外界得到足够的能量时(如热、光、电、磁等的作用),可以从低能级跃迁到高能级(图1-1箭头A),这称为激发。处在高能级的电子是不稳定的,在一定条件下,可以放出能量,重新回到低能级(图1-1箭头B)。电子得到足够的能量挣脱原子核,称为电离(图1-1箭头C)。

需要说明, 电子的绕核运动, 不能简单地比作太阳系中行星的绕太阳运动。行星绕太阳运动有明确的轨道, 但是, 所谓电子绕核的轨道, 实际上是指电子出现几率最大之处。

2. 泡利 (Pauli) 不相容原理

由原子理论可知, 原子中电子的运动状态由 4 个量子数确定: (1) 主量子数 n , 主要决定电子的能量; (2) 副量子数 l , 决定轨道动量矩; (3) 磁量子数 m , 决定轨道动量矩在空间的方位; (4) 自旋磁量子数 m_s , 决定电子自旋动量矩在外磁场方向的投影。

泡利不相容原理说明, 在原子系统中, 不可能有 4 个量子数相同的两个或两个以上的电子。电子的能级主要由主量子数 n 确定 (副量子数 l 对能级的影响较小, 磁量子数 m 的影响更小), 当 n 、 l 和 m 确定后, 电子的能级就确定了。因此, 在同一能级中, 最多只能容纳两个自旋方向相反的电子。

上述 4 个量子数的取值为: $n = 1, 2, 3, \dots$; $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$; $m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$; $m_s = \pm \frac{1}{2}$ 。

主量子数相同的电子属于同一壳层, 不同的壳层用 K 、 L 、 M 、 N 、 $\dots$ 表示 (相应于 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$)。每一壳层按副量子数 l 的不同又分为分层, 分别用 s 、 p 、 d 、 f 、 $\dots$ 表示 (相当于 $l = 0, 1, 2, 3, \dots$)。因此, 原子中每壳层和分层的电子数示于表 1-1。

原子中每壳层和分层的电子数

表 1-1

壳层	K			L			M			N			
n	1			2			3			4			
l	0	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	3
分层	s	s	p	s	p	d	s	p	d	s	p	d	f
m	0	0	$0, \pm 1$	0	$0, \pm 1$	$0, \pm 1, \pm 2$	0	$0, \pm 1$	$0, \pm 1, \pm 2$	0	$0, \pm 1$	$0, \pm 1, \pm 2$	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$
电子数	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	6	10	14
	2	8		18			32						

$n = 1$ 的第一层 (K 层) 只有一个能级 ($l = 0, m = 0$), 因此, 最多只能容纳 2 个电子。 $n = 2$ 的第二层 (L 层) 有一个 $2s$ 能级 ($l = 0, m = 0$) 和三个 $2p$ 能级 ($l = 1, m = -1, 0, 1$), 最多可容纳 8 个电子。同样, d 分层和 f 分层最多可容纳 10 个和 14 个电子。半导体硅有 14 个电子, 它们依次填满第一层和第二层, 在第三层还有 4 个电子, 分别处于 $3s$ 和 $3p$ 分层上。这种电子配置表示为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ 。硅在最外层 (第三层) 的 4 个电子是价电子, 硅是 IV 族元素。锗有 32 个电子, 其电子配置为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$, 第四层有 4 个价电子, 也是 IV 族元素。硅和锗还有一个共同点: p 分层可以有 6 个电子, 但是只容纳了 2 个电子, p 分层未填满。

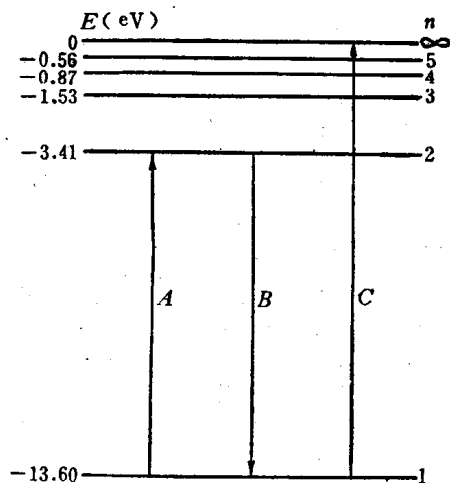


图 1-1 氢原子的电子能级

(二) 半导体的晶体结构

我们知道，固体材料分为两类：晶体和非晶体。食盐和半导体硅、锗等都是晶体；玻璃、橡胶等是非晶体。从外观看，晶体有一定的几何外形；非晶体无一定的形状。外观上的差异是由其微观结构不同引起的。在晶体中，质点（原子、分子或离子）的排列有一定的规律；非晶体的质点排列没有规律。

晶体中质点在空间的对称排列称晶体点阵或晶体格子（简称晶格）。晶格的最小单元称晶胞。晶胞中的质点是对称排列的，但晶胞之间的排列可能是不规则的，这种晶体称多晶（如铜、铁等许多金属）。如果晶体中的所有质点都是对称排列的，则称为单晶。自然界虽然也有天然的单晶，但多数情况需经过加工，才能制成单晶。用来制造晶体管的硅、锗半导体材料，必须是单晶。用单晶炉将多晶半导体材料提炼成单晶的过程，称拉单晶。

硅和锗具有金刚石结构（图1—2）。图中每个小球代表一个原子。每个原子与邻近的4个原子相结合，它们正好处在一个正四面体的顶角上（图中虚线）。

(三) 晶体中电子的共有化运动

在晶体中，原子间的距离很近，电子不仅受到自己原子的作用，还受到相邻原子的作用，产生了轨道的交叠。这样，晶体中的一些电子就不再局限于一定的原子，可以由一个原子转移到相邻的原子上去。这些电子将为整个晶体所共有。这一特征，称电子的共有化运动。

虽然晶体中的电子都兼有绕核运转的原子运动和共有化运动，但只有最外层的价电子才有显著的共有化运动，因为价电子离核最远，受核作用最弱，容易受邻近原子的影响。至于内层电子，受核作用较强，共有化运动不显著，基本保持单原子中所处的状态。

正是由于上述共有化运动，晶体的各原子才能紧紧地组成一个整体。在硅或锗晶体中，两相邻原子各有一个价电子为两原子所共有。两个价电子组成共价键（图1—3）。图中两小黑点代表共有化电子，不得到外界的能量，它们不能挣脱共价键。

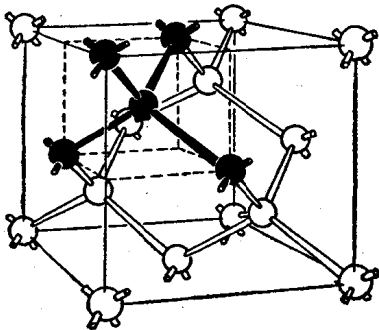


图1—2 金刚石结构



图1—3 共价键

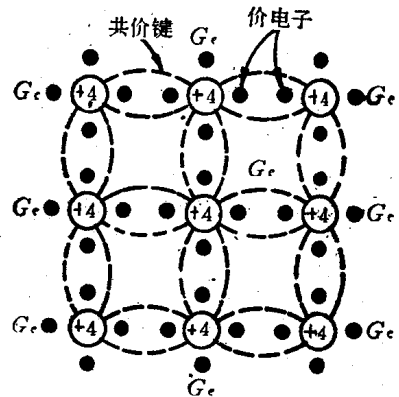


图1—4 锗晶体的结构平面示意图

图1—4表示了锗晶体的结构平面示意图。每个原子通过共价键与邻近的4个原子结合在一起，组成排列整齐的晶体。每个原子与相邻原子间的距离相同，约 $2.41 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ，而8个原子组成一个晶胞。

(四) 半导体能带的形成

晶体中电子的共有化运动，使电子的能量状态发生了变化。在原子间距 d 很大时，价电

子处于自己的能级 E_n 上〔图 1—5 (a)〕；而当 N 个原子组成晶体时，电子轨道交叠，电子可以在整个晶体中运动，原来属于 N 个孤立原子的相同电子能级，分裂成了 N 个能级。这些能级靠得很近，称为能带〔图 1—5 (b)〕。

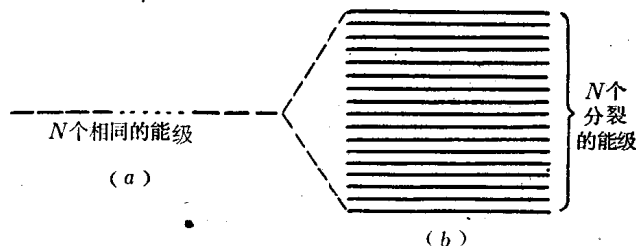


图 1—5 N 个原子组成晶体的能级变化
(a) N 个孤立原子的能级；(b) 组成晶体后的能带。

现在来讨论有 N 个原子的锗晶体的能带形成。前已述及，孤立锗原子的两个最外分层 $4s$ 和 $4p$ ，各有两个电子， $4p$ 分层未填满。对 N 个原子， $4p$ 分层共空出 $4N$ 个状态(图 1—6)。随着原子间距的减小， $4s$ 和 $4p$ 能级分裂成能带，并且逐渐展宽。当原子间距 $d = d_2$ 时(图 1—6)，两个能带重叠成一个； $d = d_1$ 时，又开始分成两个能带。锗晶体的实际原子间距为 d_0 ，这时仍然是两个能带。上下两能带各有 $4N$ 个状态。在无外界激发时，下面的能带 ($4N$ 个状态) 被 N 个原子的 $4N$ 个价电子填满，称满带或价带；上面的能带，完全空着，称空带。满带和空带之间不存在能级，这个能量区域称禁带。在 $T = 300^\circ\text{K}$ 时，锗的禁带宽度 $E_g = 0.72\text{eV}$ ；硅的 $E_g = 1.1\text{eV}$ 。

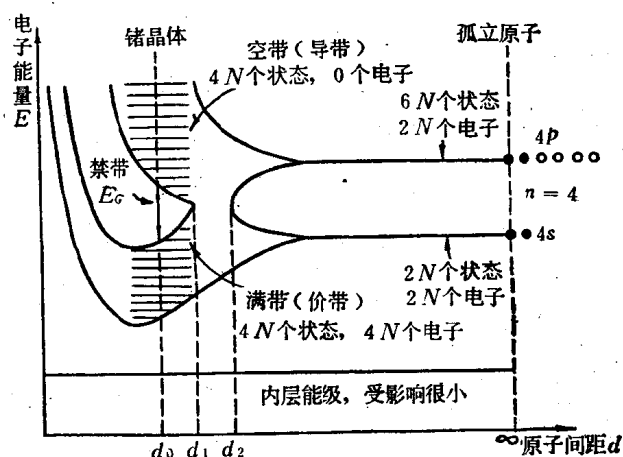


图 1—6 锗晶体能带的形成〔1〕
●——电子；○——空着的状态。

能带宽窄同共有化程度有关。外层电子共有化程度较强，能带较宽；内层电子共有化程度较弱，能带较窄。各层电子的能级分裂如图 1—7 所示。在图 1—6 中，为简化计，未画出 $n = 3$ 等层能级的分裂。以后，可只画空带和满带(图 1—8)。

晶体能带中的相邻能级差别很小，可认为是连续的。例如，锗晶体原子密度的数量级为 $10^{22}/\text{cm}^3$ ，空带的状态的数量级也将为 $10^{22}/\text{cm}^3$ ，设空带的宽度为数 eV ，则空带中相邻能级的差别约为 10^{-21}eV ，它是非常微小的。

〔1〕图中只画出最外层能级的分裂，内层能级分裂很少。

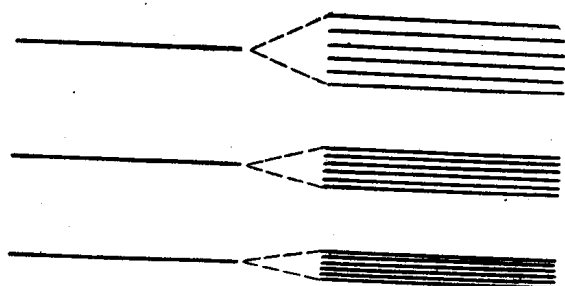


图 1—7 外层电子能带宽，内层电子能带窄

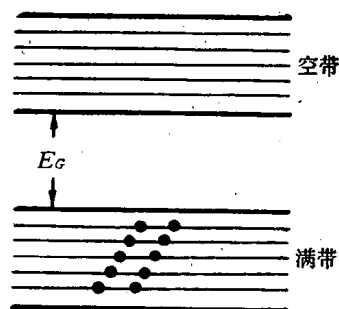


图 1—8 空带和满带

(五) 半导体、绝缘体和导体的区别

用能带理论可以说明三者的区别。无外电场时，晶体中的电子（不论满带中或空带中的），无宏观定向运动，因此无宏观电流。外加电场时，只要它不太大，满带中的电子不能跃入空带，满带仍然被占满，其中任何电子的能量，都不会发生变化，因而不能产生宏观电流。对于空带，由于相邻能级差别极小，在外加电场时，空带的电子（在一定条件下，空带中会有电子）只需从外电场吸取很小的能量，就能从低能级跃迁到高能级。这一能量的变化过程，是由电子沿外加电场反方向的运动过程来实现的，它是一种定向运动，因而产生了定向的宏观电流。空带中的电子具有导电性，所以空带也称导带。

对于半导体，满带全部被电子占满的现象，只发生在无外界能量激发时（如绝对零度）。在有光或热等外界能量激发时，满带中的电子，得到一定的能量，可以越过禁带，直接进入导带，成为导电的电子（在室温下，每 cm^3 的锗晶体中，导带大约有 2.5×10^{13} 个电子）。因此，在外电场作用下，半导体可以导电。

绝缘体的能带结构同半导体相似，只是禁带宽度 E_G 不同（图 1—9）。半导体的 E_G 约 1eV 上下，而绝缘体的 $E_G = 5 \sim 10\text{eV}$ 。热激发只能使极少量的电子跃入绝缘体的导带，在外电场作用下，绝缘体的导电能力非常微弱。

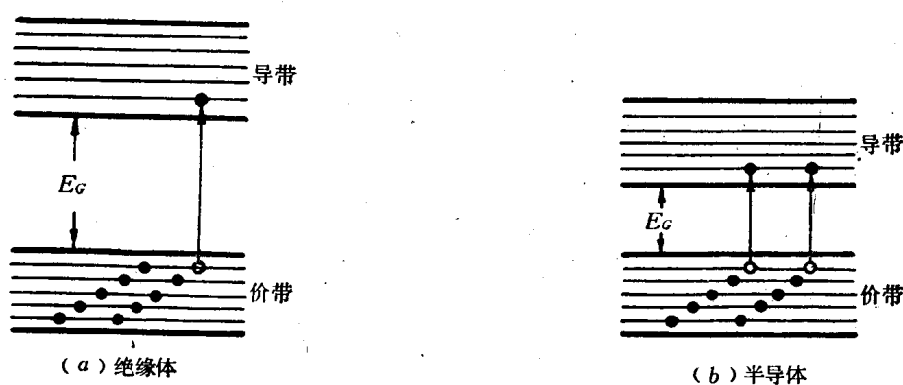


图 1—9 绝缘体和半导体的能带

导体的能带结构，或者是价带没有被电子填满（如锂和铜），或者是空带与价带重合（如钙），如图 1—10 所示。不论哪一种情况，在外电场作用下，电子极易发生能级的跃迁，大量的自由电子参与导电。金属是良好的导体，其导电率远大于半导体。

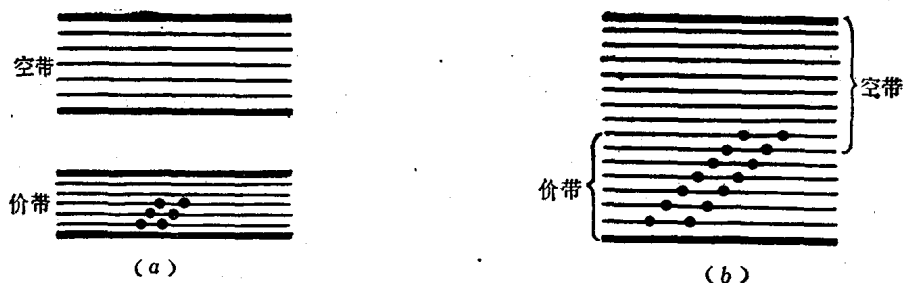


图 1—10 导体的能带
(a) 价带不满; (b) 空带与价带重合。

二、本征半导体

纯净的半导体称本征半导体。理想的锗或硅单晶（毫无杂质），属于本征半导体。

上面已经说明，在热激发下，本征半导体的价电子将要跃迁到导带中去，那么，满带中少了电子，对导电有什么影响呢？讨论如下。

（一）本征半导体中的自由电子和空穴

满带中的电子跃迁到导带后，成为可以参与导电的自由电子。满带中缺少电子后，留下的空位，称为空穴，如图 1—11(a) 所示。空穴是半导体中特有的一种粒子。它带正电，与电子的电荷量相同，这可由图 1—11(b) 看出。原子本来呈电中性，而某些原子的价电子受热激发后，脱离共价键，成为自由电子，留下的空位—空穴，就带正电（与该空穴相应的原子也成了带正电的离子）。

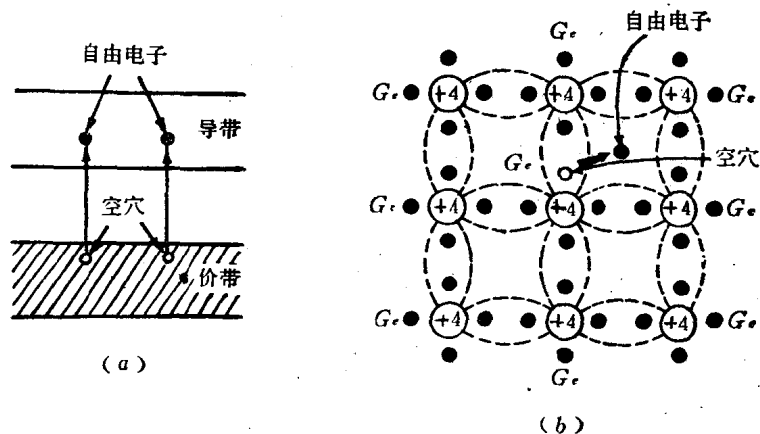


图 1—11 本征半导体中的自由电子和空穴

满带中产生了空穴后，在外电场 ε 作用下，邻近能级上的电子可以跃入，从而在该能级留下了新的空穴，其它电子又可跃入。因此，满带中的空穴在外电场作用下，也能发生运动状态的改变，产生定向的宏观电流。

• 为了进一步说明空穴导电，可观察锗晶体结构平面示意图中空穴的运动过程。设空穴首先在图 1—12(a) A 处出现。在外电场 ε 作用下，邻近原子的价电子挣脱共价键的束缚，跃入 A 处的空穴，在 B 处留下了新的空穴〔图 1—12(b)〕。这相当于空穴由 A 运动到 B。邻近原子的价电子跃入 B 处，空穴又由 B 处转移到 C 处。由此可见，在外电场 ε 作用下，空

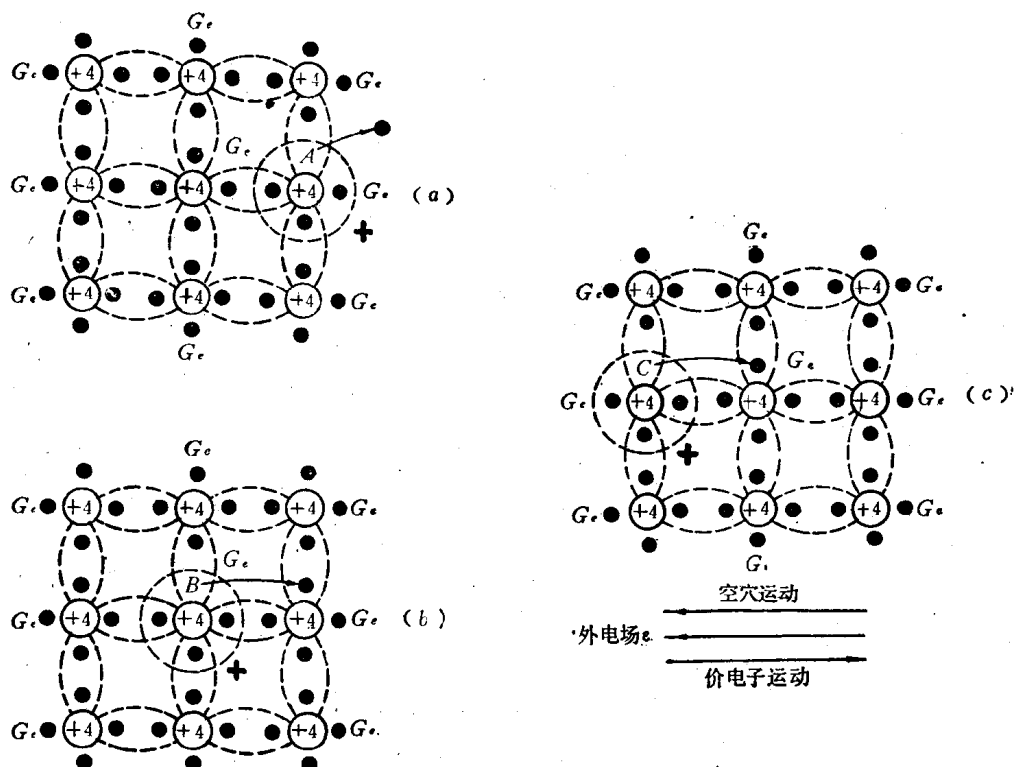


图 1—12 空穴的运动过程

穴产生了与电场方向相同的定向运动，这就是空穴导电。

综上所述，半导体有两种导电：导带中的电子导电和满带中的空穴导电。这两种能导电的粒子称为载运电流的粒子，简称载流子。

在本征半导体中，一个电子由满带跃迁到导带，满带中产生了一个空穴。这种激发称本征激发，其特征是自由电子和空穴必然成对出现，形成电子-空穴对〔图 1—11 (a)〕。设单位体积的自由电子数（称电子浓度）为 n ，单位体积的空穴数（空穴浓度）为 p ，则本征半导体有

$$\left. \begin{aligned} n &= n_i, & p &= p_i \\ n &= p = n_i = p_i \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 n_i 和 p_i ——本征半导体的电子浓度和空穴浓度。

n_i 可用下式表示：

$$n_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{G0}}{2kT}} \quad (1-4)$$

式中 A_0 ——与半导体材料有关的常数；

E_{G0} —— 0°K 时的禁带宽度（以 eV 表示），硅的 $E_{G0} = 1.21\text{eV}$ ，锗的 $E_{G0} = 0.785\text{eV}$ ；

T ——绝对温度（以 $^\circ\text{K}$ 表示）；

k ——玻兹曼常数（以 $\frac{\text{eV}}{^\circ\text{K}}$ 表示）。

由上式可以看出，本征半导体的自由电子浓度 n_i 同温度和禁带宽度有关，温度的升高和禁带宽度的减小，都有利于电子跃迁到导带。

由式 (1—4) 可以得出硅和锗的 n_i 。

$$\text{硅: } n_i = 3.87 \times 10^{16} \times T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{1.21}{2kT}}$$

$$\text{锗: } n_i = 1.76 \times 10^{16} \times T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{0.785}{2kT}}$$

300°K时, 硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 锗的 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, 硅的 n_i 较小。已知硅的原子密度为 $5.0 \times 10^{22}/\text{cm}^3$, 锗的原子密度为 $4.4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 。所以, 在 10^{12} 个硅原子中约有一个原子产生一个自由电子(占三万亿分之一), 在 10^9 个锗原子中约有一个原子产生一个自由电子(占二十亿分之一)。可见, 不论本征硅或锗, 在室温时的载流子浓度是很小的, 其导电能力较差。

温度对本征半导体的电子浓度 n_i 有很大影响, 由式(1—4)可见, n_i 基本上与温度成指数关系。例如, 锗的 n_i 在250°K时就降到300°K时的 $1/30$, 约为 $8.5 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 。图1—13是本征锗和硅的 n_i 与温度的变化关系。

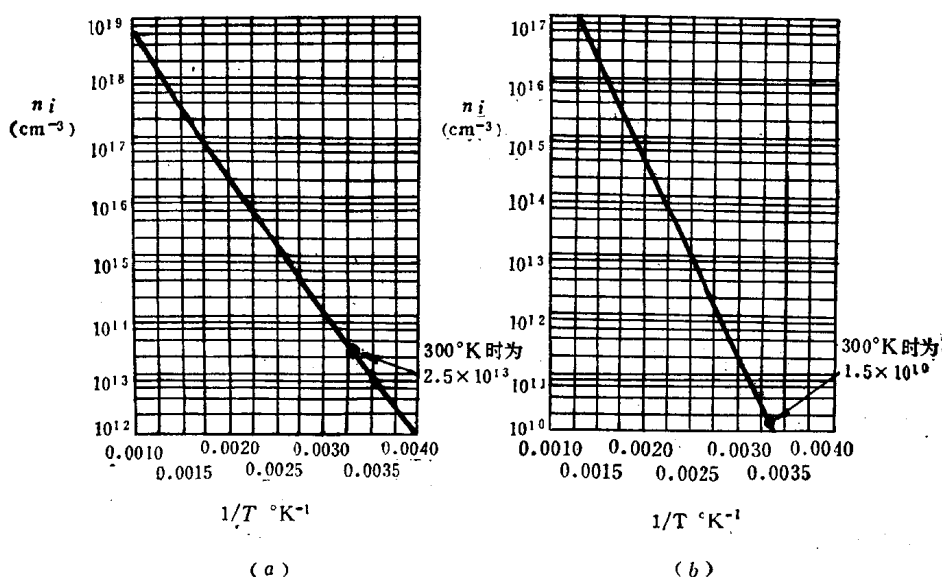


图1—13 本征半导体 n_i 与温度的关系
(a) 锗; (b) 硅。

不仅温度, 光照也可以影响 n_i 的大小。利用 n_i 随温度和光照而变的特性, 本征半导体可以制成热敏元件和光敏元件。

对于晶体管等半导体器件, 温度变化引起 n_i 变化, 会使工作不稳定, 这在晶体管电路中是特别不利的。

(二) 载流子的产生和复合

上面说的电子浓度 n_i 是动态平衡时的值。实际上, 半导体中的载流子的产生就伴随着它们的消失。这是两个相反的过程。满带中的电子跃迁到导带产生了电子空穴对, 导带中的电子受原子核的吸引还要回到满带, 与空穴“复合”, 使自由电子和空穴同时消失。

设 g 表示载流子的产生率, 它是每秒成对产生的电子或空穴浓度; R 表示载流子的复合率, 它是每秒复合的载流子浓度。起初, 产生率 g 大于复合率 R , 载流子浓度不断增加。随着它们的增加, 自由电子跌入满带和空穴复合的机会也随之增加, 载流子的产生率有所下降。动态平衡时, $g = R$, 载流子浓度 n_i 固定不变。

载流子的产生率 g 与温度有关（温度增加， g 增加），而复合率 R 与电子浓度 n_i 和空穴浓度 p_i 的乘积成正比，可写成

$$R = rn_i p_i \quad (1-5)$$

式中 r ——与半导体材料有关的常数。

动态平衡时， $g = R$ ，即

$$g = rn_i p_i \quad (1-6)$$

三、杂质半导体

本征半导体只是一种理想的半导体，因为不可能制作出完全纯净的半导体。以单晶硅为例，现在只可以做到在 10^9 个硅原子中有一个杂质原子。实际上，半导体器件往往用杂质半导体制成。在本征半导体中，人为地掺入少量其它元素（称杂质），可以制成杂质半导体。常用的杂质有磷、砷和锑等V族元素，以及硼、铝和镓等III族元素。

为什么不直接用本征半导体制造半导体器件呢？一是因为它的导电能力过低，二是因为在本征半导体中，参与导电的自由电子和空穴的浓度总是相同的，难以实现人们期望的放大等控制作用。

（一）N型半导体

在本征半导体中掺入少量的V族元素，可以构成N型半导体。设在锗晶体中掺入少量的砷原子。掺入的砷原子取代了某些锗原子的位置，如图1—14所示。砷原子有5个价电子，其中的4个同相邻的4个锗原子以共价键相结合，余下的一个不在共价键之内，砷原子对它的束缚力较弱。因此，只需得到较小的能量，这个电子就可以激发成为自由电子。由于砷原子容易给出一个自由电子，故称为“施主杂质”。

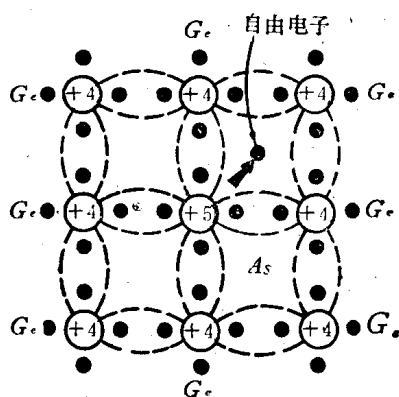


图1—14 N型半导体

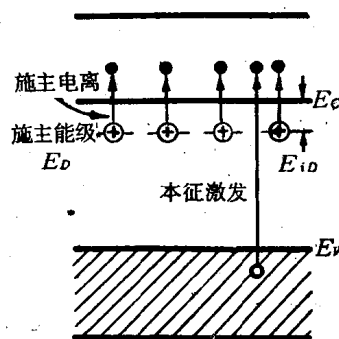


图1—15 N型半导体的能带图

砷原子对第5个价电子的束缚力比较薄弱，反映在能带图上，就是该电子的能级，非常接近于导带底，称为施主能级 E_D ，如图1—15所示。在砷原子数量很少时，各施主能级间几乎没有什么影响，施主能级处于同一能量水平。

施主能级 E_D 与导带底能级 E_C 之差，称施主电离能级 E_{iD} 。对锗中掺有砷的杂质半导体， E_{iD} 约为 0.0127eV ，比锗的禁带宽度 0.72eV 小得多。在常温下，几乎所有砷施主能级上的电子都跳到了导带，成为自由电子，留下的则是不能移动的砷施主离子。因此，这种杂质半导体的自由电子由两部分组成：施主杂质电离产生的和本征激发产生的，而只需在锗中掺

入极少量的施主杂质, 就可以使前者远远超过后者。例如, 在锗中掺入万分之一的砷原子 (即砷的浓度约为 $10^{18}/\text{cm}^3$)。设常温下砷原子已全部电离, 则由施主砷所产生的自由电子浓度也是 $10^{18}/\text{cm}^3$, 比本征半导体中因本征激发而产生的自由电子浓度 ($10^{13}/\text{cm}^3$) 大十万倍。

应注意, 掺有砷的锗, 其空穴浓度 p_n 远小于本征浓度 n_i [由式 (1—4) 决定], 因为自由电子的大量增加, 使复合率增加, 导致满带中的空穴浓度急剧减少。因此, 这种掺有 5 价元素的半导体的 $n \gg p$, 而导电率主要由自由电子决定。所以这种半导体称为电子型或 N 型半导体, 其自由电子称为多数载流子 (简称多子), 空穴称为少数载流子 (简称少子)。一般说, 在杂质半导体中, 多子对于导电性能起决定性作用, 由多子引起的导电现象, 称杂质导电。

N 型半导体的电子浓度 n_n 和空穴浓度 p_n 也是某一温度时的动态平衡值。在杂质浓度远小于晶体的原子密度时, N 型半导体的载流子产生率 g 和常数 r (式 1—5) 可认为与杂质浓度无关。因此, 在动态平衡时

$$g = r n_n p_n \quad (1-7)$$

合并式 (1—6) 和 (1—7), 可得

$$n_n p_n = n_i p_i = n_i^2$$

或

$$n_n p_n = n_i^2 \quad (1-8)$$

上式的意义是, 在 N 型半导体中, 电子浓度 n_n 大于本征浓度 n_i , 空穴浓度 p_n 小于本征浓度 n_i , 两者的乘积等于 n_i^2 。这个公式很有用, 可由它计算杂质半导体的少子浓度。

设施主杂质浓度为 N_D , 室温时杂质原子全部电离, 则电子浓度 $n_n \approx N_D$, 式 (1—8) 可近似为

$$N_D p_n \approx n_i^2 \quad (1-9)$$

在 300°K 时, 已知锗的 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$, 设锗中掺入的砷原子浓度占锗原子浓度的万分之一, 则 $n_n \approx N_D = 4.4 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 由 (1—9) 式可算出空穴浓度 p_n 。

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{6.25 \times 10^{26}}{4.4 \times 10^{18}} = 1.4 \times 10^8/\text{cm}^3$$

由 p_n 和 n_n 的值可知, n_n 是 p_n 的三百亿倍。由此可见, N 型半导体不仅导电能力大为增加, 并且导电机构发生了很大的变化, 自由电子浓度不再等于而是大大超过了空穴浓度。

在 N 型半导体中, 单位体积的负电荷数等于正电荷数, 即

$$n_n = p_n + N_D \quad (1-10)$$

整个晶体呈电中性。

(二) P 型半导体

在本征半导体中掺入少量的 III 族元素, 可以构成 P 型半导体。III 族元素有 3 个价电子。设在锗中掺入少量铟, 则这些铟原子的 3 个价电子只能和相邻的 3 个锗原子作共价结合, 与第 4 个相邻锗原子组成的共价键不完整, 产生了缺少一个价电子的空位。这个空位极易接受其它锗原子共价键中的电子, 使铟原子成为不能移动的负离子, 而原来的共价键则因缺少一个电子, 形成了空穴 (图 1—16)。由于锗原子的价电子容易跳到铟原子的空位上, 铟原子起着接受电子的作用, 故称为“受主杂质”。

反映在图 1—17 所示的能带图中, 铟的受主能级 E_A 非常接近满带顶 E_V , 也即, 受主电

[1] 更严格的推导可参考(美)R.D. 密特布洛克著、尚辰化译:《面结型晶体管导论》, P.72, 国防工业出版社, 1966年。