

邮电高等函授试用教材

电子器件与电路

上册

张志远 周任淦 编

罗 耀 光 审

内 容 提 要

本书是邮电高等函授的试用教材，也可供从事电子技术工作的技术人员参考。

全书分上、下两册。上册讲述半导体物理基础、半导体器件、放大器基础和负反馈放大器。下册讲述常用放大电路及振荡电路的工作原理、分析方法和设计原则，此外，对电子管和电子管放大器也作了一些介绍。

电 子 器 件 与 电 路

上 册

张志远 周任淦 编

罗 耀 光 审

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本：787×1092 1/32 1981年3月第一版

印张：17 12/32页数：278 1981年3月河北第一次印刷

字数：336千字 印数：1—32,500册

统一书号：15045·总2477—无6137

定价：1.75元

前 言

本书是根据一九七九年六月全国邮电高等函授教材编写会议修订的“电子器件与电路教材编写大纲”编成的教材，供全国邮电高等函授各专业试用，也可供从事电子技术工作的技术人员参考。

全书分上下两册。上册讲述半导体物理基础、半导体器件、放大器基础和负反馈放大器。下册讲述常用放大电路及振荡电路的工作原理、分析方法和设计原则，此外还专列了一章对电子管和电子管放大器作了介绍（凡在章节左上角注有•号的，表示这些章节为选修内容）。根据编写大纲的要求，本书加强了基本理论和基本分析方法的阐述，在内容上力求理论联系实际，尽量作到深入浅出、通俗易懂，以便读者自学。

我们期望，通过本书的学习，能对各种常用的电子器件与电路的物理本质和分析方法有较深入的了解。

在本书大纲的修订会议上，北京邮电学院、南京邮电学院函授部、长春邮电学院函授部和各省（市）函授科的教师，对编写大纲提出了许多宝贵意见。在本书编写当中，北京邮电函授学院的许多同志给予了大力支持和帮助，在此我们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限、时间仓促、经验不足，书中难免有谬误之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

1980年5月

目 录

第一章 半导体物理基础	(1)
第一节 半导体晶体及其特性	(1)
一、晶体的结构.....	(2)
二、晶体点阵的缺陷和位错.....	(3)
三、半导体晶体的特性.....	(7)
本节小结.....	(8)
思考题.....	(9)
第二节 半导体中电子的能级与能带	(10)
一、晶体中价电子的共有化运动.....	(10)
二、半导体中电子的能级、能带.....	(11)
本节小结.....	(17)
思考题.....	(18)
第三节 电子和空穴 杂质半导体	(18)
一、电子和空穴.....	(18)
二、杂质半导体.....	(22)
本节小结.....	(25)
思考题.....	(26)
第四节 电子分布的统计规律	(26)
一、分布函数与费米能级.....	(26)
二、半导体中的载流子分布.....	(30)
本节小结.....	(41)
思考题.....	(42)

第五节 非平衡载流子的寿命、复合中心	(42)
一、非平衡载流子	(42)
二、非平衡载流子的寿命	(43)
三、复合中心	(45)
本节小结	(46)
思考题	(47)
第六节 电子和空穴的扩散与漂移	(47)
一、漂移电流	(47)
二、扩散电流	(49)
本节小结	(50)
思考题	(50)
第七节 载流子扩散方程	(50)
一、扩散	(51)
二、产生	(51)
三、复合	(51)
第二章 半导体二极管	(56)
第一节 <i>PN</i> 结	(56)
一、 <i>PN</i> 结的制造工艺	(56)
二、 <i>PN</i> 结空间电荷区的形成	(58)
三、平衡 <i>PN</i> 结的接触电势差	(60)
四、平衡 <i>PN</i> 结接触电势差的推导	(62)
本节小结	(64)
思考题	(65)
第二节 二极管的整流特性	(65)
一、二极管的伏安特性	(65)
二、二极管整流特性的分析	(66)
三、 <i>PN</i> 结电流与电压关系	(69)

•四、电流公式的推导	(73)
本节小结	(74)
思考题	(75)
第三节 二极管的开关特性	(76)
一、二极管的开关作用	(76)
二、二极管的暂态过程分析	(77)
本节小结	(82)
思考题	(83)
第四节 二极管的分类及参数	(83)
一、二极管的分类	(83)
二、国产半导体器件型号命名方法	(84)
三、二极管的主要参数	(87)
本节小结	(89)
思考题	(89)
第三章 稳压二极管	(90)
第一节 PN 结空间电荷区的电场和宽度	(90)
一、突变结和缓变结	(90)
•二、用泊松方程求解突变结、缓变结空间电荷区的电场和宽度	(92)
第二节 PN 结击穿	(99)
一、齐纳击穿	(99)
二、雪崩击穿	(100)
三、两种电击穿机构的主要区别	(101)
四、热击穿	(102)
第三节 稳压管及其参数	(102)
一、什么是稳压管	(102)
二、具有温度补偿的稳压管	(103)

三、硅稳压管的主要参数	(105)
本章小结	(107)
思考题	(108)
第四章 半导体三极管	(109)
第一节 晶体管的基本结构	(109)
一、合金管	(109)
二、合金扩散管	(111)
三、台面管	(112)
四、平面管	(113)
第二节 晶体管的电流分配关系	(118)
一、晶体管中载流子的传输过程	(118)
二、晶体管的三种连接方式	(123)
三、晶体管的放大作用	(125)
第三节 晶体管的特性曲线	(128)
一、共基特性曲线	(128)
二、共发特性曲线	(130)
*三、共发输出特性曲线特例	(133)
第四节 晶体管的开关特性	(137)
一、晶体管的开关作用	(138)
二、晶体管的饱和区和截止区	(140)
三、晶体管的开关暂态过程	(143)
第五节 晶体管的主要参数	(149)
一、电流放大系数	(149)
二、晶体管的反向电流	(151)
三、极限参数	(154)
四、频率参数	(160)
*五、关于电流放大系数 β 的讨论	(161)

六、晶体管参数举例	(167)
七、用万用表检查晶体管	(167)
本章小结	(172)
思考题	(175)
第五章 场效应管	(176)
第一节 概述	(176)
一、场效应管的结构原理	(176)
二、场效应管的放大作用和分类	(180)
三、场效应管的特点	(181)
第二节 场效应管特性	(183)
一、场效应管的特性曲线	(183)
二、输出特性曲线的三个区域	(186)
三、漏源电流公式	(190)
*四、漏源电流公式的推导	(191)
第三节 场效应管参数和使用注意事项	(194)
一、场效应管的主要参数	(194)
二、场效应管参数举例	(198)
三、场效应管的使用注意事项	(198)
本章小结	(200)
思考题	(201)
*第六章 其它二极管	(202)
第一节 变容二极管	(202)
一、变容管特性	(202)
二、变容管的等效电路	(204)
第二节 隧道二极管	(207)
一、隧道二极管的特点	(207)
二、隧道二极管的应用	(210)

第三节	表面势垒二极管	(217)
一、	表面势垒二极管的构成	(217)
二、	表面势垒二极管的伏安特性	(220)
三、	表面势垒二极管的等效电路及参数	(222)
	本章小结	(223)
	思考题	(224)
第七章	放大器基础	(225)
第一节	放大器概述	(225)
一、	放大器的主要技术指标	(226)
二、	放大器的基本电路	(232)
三、	放大器的静态工作点	(235)
第二节	放大器的图解分析法	(238)
一、	放大器的简单分析	(238)
二、	放大器基本分析方法——图解法	(245)
第三节	放大器的等效电路分析法	(265)
一、	晶体管的 h 参数	(266)
二、	h 参数等效电路	(275)
三、	用 h 参数等效电路分析放大器	(278)
第四节	单级 RC 耦合放大器的频率特性	(285)
一、	用等效电路法来分析放大器的频率特性	(286)
二、	放大器的波特图	(303)
*三、	单级 RC 耦合放大器的瞬态特性	(311)
第五节	工作点的稳定	(320)
一、	温度对工作点的影响	(320)
二、	分压式电流负反馈偏置电路	(326)
三、	工作点稳定性的定量分析	(328)
四、	双管直接耦合偏置电路	(336)

五、其它稳定工作点的偏置电路·····	(339)
六、单级放大器的设计·····	(345)
第六节 场效应管放大器 ·····	(348)
一、场效应管的直流偏置电路及静态分析·····	(348)
二、场效应管的微变等效电路·····	(361)
三、场效应管放大电路的分析·····	(365)
四、共源阻容耦合放大电路·····	(373)
五、场效应管放大器实例·····	(379)
第七节 多级放大器 ·····	(380)
一、级间耦合方式·····	(380)
二、多级放大器的组成·····	(383)
三、对多级放大器的分析·····	(385)
四、放大器的设计、安装与调试·····	(396)
本章小结·····	(408)
思考题与习题·····	(413)
第八章 负反馈放大器 ·····	(420)
第一节 反馈放大器的基本概念 ·····	(420)
一、放大器的反馈·····	(420)
二、反馈放大器的基本关系式·····	(422)
第二节 负反馈放大器的分类 ·····	(426)
一、电流串联负反馈·····	(428)
二、电压串联负反馈·····	(429)
三、电压并联负反馈·····	(431)
四、电流并联负反馈·····	(433)
第三节 负反馈对放大器性能的影响 ·····	(435)
一、负反馈使放大器的增益下降·····	(435)
二、负反馈能提高放大器增益的稳定性·····	(436)

三、负反馈能使放大器的通频带展宽.....	(437)
四、负反馈能减小放大器的非线性失真.....	(440)
五、负反馈使噪声电平降低.....	(443)
六、负反馈对放大器输入和输出电阻的影响.....	(444)
第四节 几种常用负反馈放大器的分析.....	(446)
一、电流串联负反馈.....	(447)
二、电压串联负反馈.....	(463)
三、电压并联负反馈.....	(473)
四、电流并联负反馈.....	(483)
五、负反馈电路小结及反馈的其它问题.....	(494)
第五节 射极输出器.....	(499)
一、射极输出器电路.....	(499)
二、电路的分析、计算.....	(499)
三、射极输出器的应用.....	(503)
四、射极输出器在调试中应注意的问题.....	(510)
第六节 混合负反馈放大器.....	(511)
一、电阻桥式负反馈放大器.....	(511)
二、混合线圈负反馈放大电路.....	(513)
第七节 负反馈放大器的稳定问题.....	(516)
一、负反馈放大器自激及稳定工作的条件.....	(517)
二、负反馈放大器稳定性分析举例.....	(520)
三、防止负反馈放大器自激的方法.....	(523)
本章小结.....	(530)
思考题与习题.....	(533)

第一章 半导体物理基础

半导体器件是由半导体材料做成的，本章首先对半导体材料的结构和特点作简要介绍。半导体的能级、能带理论，是半导体晶体中电子运动规律的基本理论。本章在讲述能带理论的基础上，应用这一理论对半导体的两种载流子（电子和空穴）及两种半导体（*N*型半导体和*P*型半导体）进行了必要的分析。为了进一步了解半导体中两种载流子的运动规律，还介绍了载流子按能量分布的统计规律和费米能级。并讨论了热平衡条件下载流子的情况。这是半导体区别于其他晶体的最本质的东西。然而半导体主要是应用于偏离平衡的状态。因此，对于非平衡状态时载流子的寿命和复合中心作了介绍，分析了半导体在外加电场作用下载流子的运动规律，即电子和空穴的扩散及漂移。这些都是我们学习半导体器件所应具备的半导体物理基础知识。

第一节 半导体晶体及其特性

物体材料按其原子结构分为晶体和非晶体。从它们的导电特性上看，可以分为导体、绝缘体和半导体三种。目前用来制造半导体器件的锗、硅、砷化镓等材料，它们在结构形式上都是晶体，而在导电特性上又都是半导体。在分析半导体特性前，我们先讨论一下晶体的结构以及晶体点阵的缺陷与位错。

一、晶体的结构

晶体被定义为原子的有规则的排列。它在外观上具有一定的几何形状，有不同程度的对称性。在外力打击下，容易沿着一定平面裂开；而非晶体，原子的排列并不规则，也无确定的外形，没有对称性。打碎后所得碎片形状也各不相同。晶体外形上的这些特点可以联系到它的机械、物理性质上具有各向异性的特征。而非晶体则没有这样的特征。

由 x 射线研究的结果也证实，晶体是由离子、原子或分子（统称为微粒）有规则地排列而成的。微粒按一定规律周期地排列，在空间就形成了一个格点。这些格点的总体称为点阵，或叫晶体格子。简称为晶格。图1—1—1是立方晶体的三

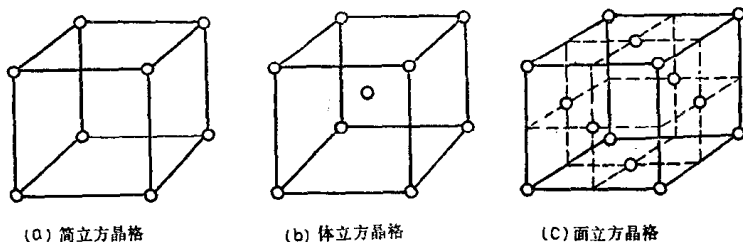


图 1-1-1 立方晶体三种常见的晶格结构

种常见的晶格结构。立方晶体正是由这些基本结构重复排列而成。

半导体硅、锗晶体具有同金刚石相同的结构。金刚石结构如图1—1—2所示。同面立方晶格相比，其内部多出了四个格点，可以把它看成是两个完全相同的面立方晶格套在一起，相互之间沿立方体对角线方向平移 $\frac{1}{4}$ 而构成的。我们知道，金刚石是由碳原子组成的，每个碳原子可以贡献出四个价电子与周围的四个碳原子形成四个共价键，使原子紧紧结合成晶体。这

个结构的一个重要特点是：每个原子有四个最邻近原子，它们正好是一个正四面体的顶角位置。

从图 1-1-1 和图 1-1-2 可以看到，沿晶格的不同方向，原子排列的周期和疏密情况是不相同的。因此沿晶体的不同方向，晶体的机械、物理特性也是不相同的。这叫做各向异性。

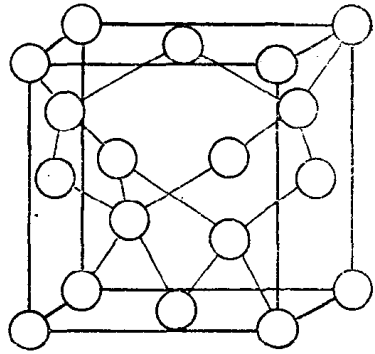


图 1-1-2 金刚石结构

晶体材料可以是“单晶”，也可以是“多晶”。当前半导体生产和科研主要使用的是单晶材料。单晶是指结构最完整的晶体材料，要求在整块材料中原子都按照周期性（即代表性的单元沿晶体的任何方向以一定的间隔进行重复）统一的晶格排列。

二、晶体点阵的缺陷和位错

实际的晶体点阵同理想的空间点阵有着很大的差别，即点阵中可能有空位形式的缺陷，也可能有杂质原子掺入了晶体。空位和杂质的数量是非常微小的，但却能引起晶格相当大的畸变。这对半导体器件的性能有着很大的影响。

图 1—1—3 表示晶体中杂质引起的畸变。图(a)表示一杂质原子代替了点阵中某一原有原子所产生的影响；图(b)表示在原来点阵中掺入某一杂质所产生的影响。

图 1—1—4 表示两种由空位而引起的晶体缺陷：图(a)表示晶体中某一原子因温度升高，振动加剧，以致脱离其平衡位置，在该点上出现空位，而在另一位置上出现填隙原子的情况。

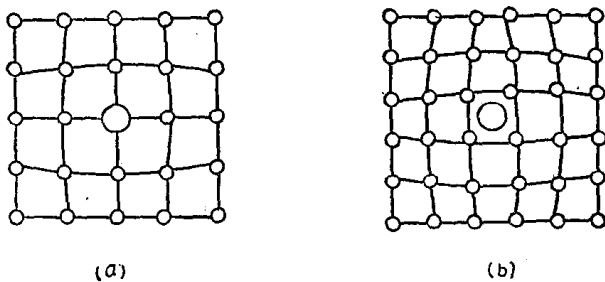


图 1-1-3 晶体中杂质原子引起的畸变

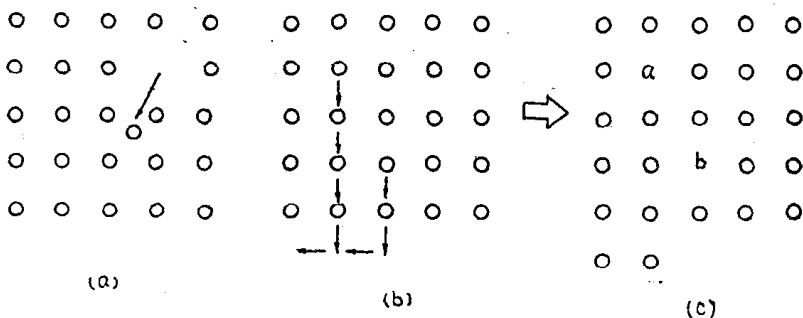


图 1-1-4 由空位引起的晶体缺陷

况。这种缺陷在半导体制备过程中将使局部杂质扩散增加，影响器件性能。但并不引起宏观的体积的变化。图(b)及图(c)表示由于晶体表面上a、b两点的原子走失而出现的空位。这种空位由于热运动可以逐步扩散到晶体内部去，从而在晶体内部出现了空位。在缺陷产生的同时，出现新的结点，因而使体积增加，密度减小。

此外，晶体在制备过程中还会产生一种缺陷叫位错。位错有两种基本类型。一种叫棱形位错，其形状如图1—1—5所示。图中每个质点的序列是垂直于图面的原子层的投影，图上破坏

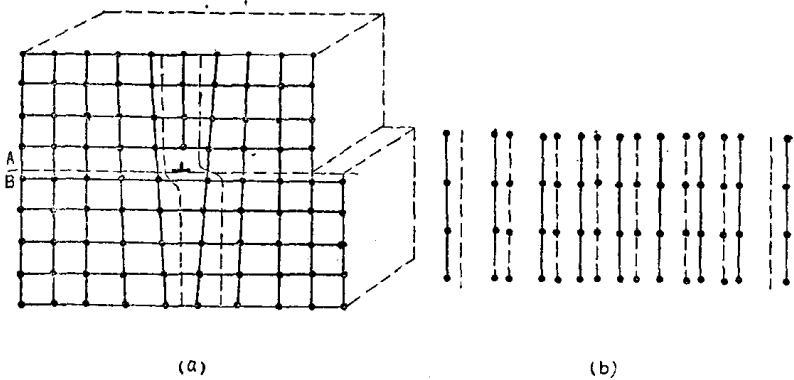
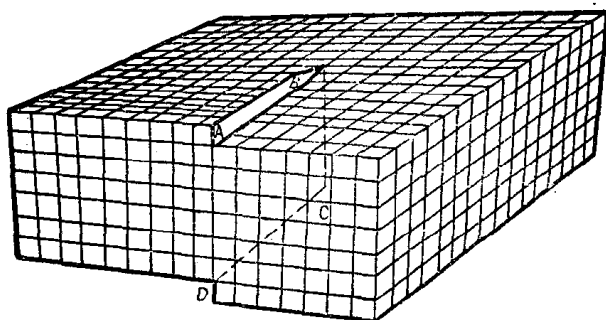


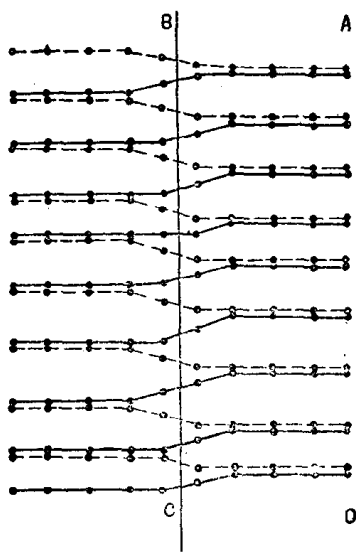
图 1-1-5 棱形位错

得很厉害的地方称为位错中心，我们用倒 T 字标出。在将晶体划分成两部分的位错面附近，畸变最大；离开位错线往两边去，畸变很快地消失。在图 (b) 上画出了晶块分界面局部区域的两个原子平面 A、B 的侧视图。实线表示上方的（压缩的）面 A，该面比下方（虚线）的面 B 多包含了一排原子。

另一种叫螺旋位错，如图 1-1-6 所示。点阵被划分为两个晶块，其中一块的一部分似乎相对于邻块滑移了一个原子间距。最大的畸变集中于图示的轴上。这个轴线附近的局部区域内原子丧失了晶格排列区，构成了螺旋位错。如果考察一下在晶块面两侧的两个相邻原子的结构图，就会更好地理解这种畸变的实质。图 (b) 中实线表示右侧晶块的原子平面，而虚线表示左侧晶块的原子平面，两层原子之间发生了上下的滑移。这种缺陷是沿一条轴线盘旋上升，故称为螺旋位错。由此可知，螺旋位错和棱位错不同，这里没有多余的原子序列。棱形位错的特点是滑移方向和位错相垂直，而螺旋位错的特点却是位错线和滑移线相平行。我们把一平方厘米面积中的位错线称为位错密度。



(a)



(b)

图 1-1-6 螺旋位错

有显著位错的半导体器件比无位错的半导体器件所能承受的反向电压要低得多。位错密度愈高，反向击穿电压愈低。因此，一般对制造晶体管的半导体材料，总是希望其位错密度小