

电子线路分析基础

上册

华北电力学院 张瑞华 李士琨

电力工业出版社

电子线路分析基础

上册

华北电力学院 张瑞华 李士琨

电力工业出版社

内 容 提 要

本书分上、下两册。上册包括：常用半导体器件、低频电压放大器、功率放大器、直接耦合直流放大器、线性集成电路和集成运算放大器、调制式直流放大器、直流稳压电源。下册包括：正弦波振荡器、可控硅的应用、分立元件脉冲数字电路、集成数字电路。

本书着重阐述常用电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法。书中收集了工业自动化仪表中的大量典型电路，并对它们进行了详细的分析，各章还配有小结、思考题和练习题。

本书可供从事电子技术的工程技术人员学习之用，也可作为高等院校有关专业的教学参考用书。

前 言

本书是在多年教学实践的基础上编写而成的。全书分上下两册，共十一章。

本书在着重阐述常用电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法的基础上，对工业自动化仪表中的大量典型电路进行了较详细的分析，可供从事电子技术的工程技术人员学习之用，也可作为高等院校有关专业的教学参考用书。

在编写本书的过程中，我们力求使内容深入浅出，基本概念清楚，对基本电路和常用电路既作定性分析，又介绍了工程计算方法或设计方法。书中每章都有小结、思考题和练习题，可供读者学习中参考。

考虑到调制式放大器和分立元件脉冲数字电路方面的内容在实际工作中有着较广泛的应用，书中仍以一定篇幅作了较详细的讨论。至于集成数字电路方面的内容，限于本书的篇幅，仅作了一般的介绍，读者可在此基础上再深入学习有关著作。

本书第二、三两章由李士琨同志编写，其余九章是由张瑞华同志编写的。张瑞华同志还担负了第二、三两章的统稿工作。

大连水产学院的蒋志凯同志对全书进行了认真细致的审阅工作，提出了许多宝贵意见。华北电力试验研究所的胡树松同志对本书前三章也提出了不少有价值的意见。在此，谨向他们表示衷心的感谢。

我们对在本书编写和出版过程中给予热情帮助和支持的同志们表示深切的谢意。

限于编者的水平，加上编写时间仓促，书中的缺点和错误一定不少，敬请广大读者给予批评指正。

编 者

一九八〇年四月于华北电力学院

目 录

前 言

第一章 常用半导体器件	1
第一节 半导体的电特性	1
一、本征半导体(1) 二、P型和N型半导体(5)	
小结(7) 思考题(8)	
第二节 晶体管的基础——PN结	8
一、PN结的形成(9) 二、PN结的单向导电性(10)	
小结(13) 思考题(14)	
第三节 晶体二极管	14
一、晶体二极管的构造(14) 二、晶体二极管的伏安特	
性(16) 三、晶体二极管的参数(19) 四、晶体二极管极性和性能	
的简易测试(22) 小结(24) 思考题和练习题(25) 附录(26)	
第四节 硅稳压二极管	28
一、工作原理(28) 二、主要参数(29) 小结(33)	
思考题(33)	
第五节 晶体三极管	34
一、晶体管的结构(34) 二、晶体管的电流放大作用(36)	
三、晶体管的特性曲线(41) 四、晶体管的参数(50) 五、温	
度变化对晶体管参数的影响(60) 六、利用万用表检查晶体	
管(62) 小结(64) 思考题和练习题(66) 附录(68)	
第六节 场效应晶体管	70
一、场效应管的工作原理和特性曲线(70) 二、场效应管的	
主要参数(86) 三、使用场效应管的注意事项(90)	
四、场效应管的优缺点(91) 小结(92) 思考题和练习题(94)	
第二章 低频电压放大器	97
第一节 共发射极基本放大电路的工作原理	97
一、电路组成和各元件的作用(98) 二、无输入信号时放大	
器的工作情况(100) 三、输入交流信号时的工作情况(100)	
四、不设偏置电路或静态工作点不合适时放大器产生失真(102)	
小结(104) 思考题和练习题(104)	

第二节 用图解法分析放大电路	105
一、图解法的具体步骤(105)	
二、图解法的应用(108)	
三、电路参数对放大器放大倍数的影响(109)	
四、放大器的波形失真(112)	
五、接入负载电阻 R_L 时放大器的工作情况(113)	
小结(117)	
思考题和练习题(118)	
第三节 用计算法分析放大电路	119
一、晶体管的交流等效电路(119)	
二、用计算法分析放大电路(121)	
小结(124)	
思考题和练习题(125)	
第四节 放大器中常用的基本放大电路	125
一、温度对晶体管参数的影响(126)	
二、静态工作点稳定的典型电路(128)	
三、具有交流电流负反馈的放大电路(135)	
四、双管直接耦合放大电路(139)	
五、电压负反馈放大电路(143)	
六、共基极放大电路(145)	
七、利用热敏元件进行温度补偿的放大电路(147)	
八、不稳定系数(148)	
小结(150)	
思考题和练习题(151)	
第五节 多级放大器	153
一、放大器的耦合问题(153)	
二、放大器的输入电阻和输出电阻(155)	
三、多级放大器的电压放大倍数(160)	
四、放大器的频率特性(165)	
小结(180)	
思考题和练习题(182)	
第六节 放大器的负反馈	183
一、基本概念(183)	
二、负反馈对放大器性能的影响(187)	
三、射极输出器(205)	
四、负反馈放大器的自激振荡(217)	
小结(217)	
思考题和练习题(218)	
第七节 场效应管放大器	220
一、共源极场效应管放大电路(220)	
二、源极输出器(227)	
三、共源极场效应管基本放大电路的设计方法(229)	
小结(231)	
思考题和练习题(231)	
第八节 电路举例	233
第三章 功率放大器	237
第一节 概述	237
一、功率放大器的特点(237)	
二、单管功率放大器的基本工作情况(240)	
三、如何增大放大器的输出功率(243)	
第二节 采用输出变压器的单管功率放大器	246
一、变压器工作原理的简单介绍(246)	
二、采用输出变压器的单管甲类功率放大器(250)	
三、单管甲类功率放大器的设计(254)	

第三节	双管推挽功率放大器	256
一、	乙类推挽功率放大器的原理(257)	
二、	加入偏置电路以避免交越失真(259)	
三、	乙类推挽功率放大器的输出功率和效率(259)	
四、	乙类推挽功率放大器的管耗(261)	
五、	晶体管的耐压(262)	
六、	电路举例(263)	
第四节	无耦合变压器的功率放大器	264
一、	互补对称式电路(265)	
二、	电路的改进(268)	
第五节	相敏功率放大器	271
一、	相敏功率放大器的工作原理(272)	
二、	相敏功率放大器的实际电路(274)	
三、	无耦相敏功率放大器(275)	
四、	小结(276)	
五、	思考题和练习题(276)	
第四章	直接耦合直流放大器	278
第一节	直流放大器的作用	278
第二节	单管直流放大器	279
一、	电路的组成(279)	
二、	静态工作点(280)	
三、	电压放大倍数(280)	
四、	输入-输出特性(281)	
第三节	多级直流放大器的特殊问题	282
一、	多级直流放大器的级间耦合方式(282)	
二、	多级直流放大器的零点漂移(286)	
第四节	差动放大器	290
一、	基本差动放大器(290)	
二、	具有发射极公共电阻的差动放大器(长尾电路)(294)	
三、	具有恒流源的差动放大器(301)	
四、	差动放大器的转移特性(307)	
五、	单端式差动放大器(309)	
六、	场效应管差动放大器(312)	
七、	差动放大器的设计(314)	
八、	应用举例(319)	
九、	小结(323)	
十、	思考题和练习题(324)	
第五章	线性集成电路和集成运算放大器	327
第一节	集成电路器件简介	327
一、	什么是集成电路?(327)	
二、	集成电路的分类(327)	
三、	半导体集成电路的结构特点(329)	
第二节	典型线性集成电路介绍	335
一、	5G23(335)	
二、	5G24(340)	
三、	线性集成电路的主要参数(354)	
第三节	高输入电阻电路和低漂移电路	359
一、	高输入电阻电路(359)	
二、	DPF型低漂移放大电路(363)	

第四节	运算放大器的基本性能	370
一、	反相输入的运算放大器(371)	
二、	同相输入的运算放大器(376)	
第五节	线性集成电路主要参数的测试方法	381
一、	输入失调电压 U_{oi} (381)	
二、	输入失调电流 I_{oi} (382)	
三、	输入偏置电流 I_b (383)	
四、	开环电压放大倍数 K_0 (383)	
五、	共模抑制比 $CMRR$ (384)	
第六节	运算放大器的应用	385
一、	模拟运算电路(385)	
二、	信号处理电路(393)	
三、	信号转换电路(401)	
四、	其它功能电路(411)	
五、	小结(413)	
六、	思考题和练习题(416)	
第六章	调制式直流放大器	419
第一节	为什么要用调制式直流放大器?	419
一、	直接耦合直流放大器的内部矛盾(419)	
二、	调制式直流放大器的引出(419)	
三、	调制式直流放大器的组成(420)	
第二节	调制器	421
一、	调制器的基本概念(421)	
二、	几种常用的调制器(426)	
第三节	解调器	449
一、	解调器的工作原理(449)	
二、	相敏整流器——晶体管作开关元件的解调器(451)	
三、	相敏放大器——晶体管作放大元件的解调器(453)	
四、	二极管相敏整流器——环形解调器(460)	
第四节	调制式直流放大器的实例	463
一、	JF-12型放大器(463)	
二、	温度变送器中的调制式直流放大器(470)	
三、	小结(476)	
四、	思考题和练习题(478)	
第七章	直流稳压电源	482
第一节	单相整流和滤波电路	482
一、	半波整流和电容滤波电路(483)	
二、	全波整流电路(486)	
三、	桥式整流电路(489)	
四、	复式滤波器(491)	
五、	整流滤波电路参数的选择(495)	
第二节	硅稳压管稳压电路	497
一、	直流稳压电源的作用(497)	
二、	硅稳压管稳压电路的工作原理(498)	
三、	硅稳压管稳压电路的温度补偿(502)	
四、	稳压电源的稳定度和内阻(504)	
五、	硅稳压管稳压电路参数的选择(505)	

第三节 串联型晶体管稳压电源.....507

- 一、硅稳压管稳压电路的缺点(507)
- 二、串联型晶体管稳压电源的引出(508)
- 三、单管串联型晶体管稳压电源(509)
- 四、具有放大环节的串联型晶体管稳压电源(511)
- 五、具有放大环节的串联型晶体管稳压电源参数的选择(515)
- 六、提高串联型晶体管稳压电源性能的措施(520)
- 七、串联型晶体管稳压电源的短路和过载保护(526)
- 八、串联型晶体管稳压电源举例(527)
- 小结(533)
- 思考题和练习题(535)

第一章

常用半导体器件

随着我国社会主义革命和社会主义建设的蓬勃发展，晶体管电路在电厂热工仪表和自动控制系统中的应用日益广泛。晶体管是组成晶体管电路的核心元件。为了分析晶体管电路，首先必须了解晶体管。因为晶体管是由半导体材料制成的，所以为了了解晶体管，又首先必须了解半导体的电特性。

第一节 半导体的电特性

我们知道，自然界的物质，按它们的导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三类。导体的导电性能很好，如金、银、铜、铝等；绝缘体的导电性能极差，如塑料、橡胶、云母、陶瓷等；半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间，它既不象导体那样很容易导电，又不象绝缘体那样很难导电。锗（Ge）和硅（Si）是典型的半导体。

半导体所以能用来制造晶体管，并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是因为，在纯净的半导体中掺入微量的杂质就能使它的导电性能发生很大的变化。

杂质为什么能使半导体的导电性能发生很大的变化呢？我们只有深入到半导体内部去寻找这个规律性。

一、本征半导体

不含杂质的半导体叫本征半导体。只有认识了本征半导体，才能了解杂质对半导体导电性能的巨大影响。

（一）硅和锗的原子结构

半导体锗和硅与其它一切物质一样，也是由原子构成的，它

们的原子结构如图 1-1-1 所示。半导体硅原子的结构如图 1-1-1 (a) 所示。一个硅原子是由一个带正电的原子核和围绕它旋转的十四个带负电的电子组成的。十四个电子分布在三层轨道上，最内层为两个，第二层为八个，最外层为四个。硅原子核带十四个电子电量的正电。在正常情况下，因为原子核和电子的正负电量相等，整个硅原子是呈电中性的。由于里面两层的十个电子离原子核较近，所以它们受原子核正电荷的吸引力较大，不易摆脱原子核的束缚而成为自由电子。而最外层轨道上的四个电子因离原子核较远，它们受原子核的束缚力较小，很容易成为自由电子。这四个最外层的电子称为价电子。由于内层十个电子受原子核束缚力大，可把它们看成是一个比较稳定的整体，称为惯性核（或离子实）。这个惯性核带四个电子电量的正电。这样，就可把一个硅原子简化成惯性核和价电子两部分，如图 1-1-2 (a) 所示，其习惯画法如图 1-1-2 (b) 所示。对锗原子也可作同样

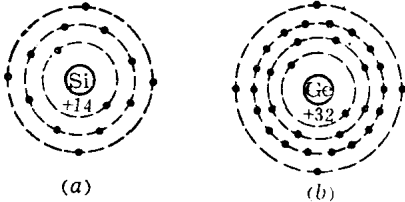


图 1-1-1 硅和锗的原子结构平面示意图
(a) 硅(Si)原子的结构；(b) 锗(Ge)原子的结构

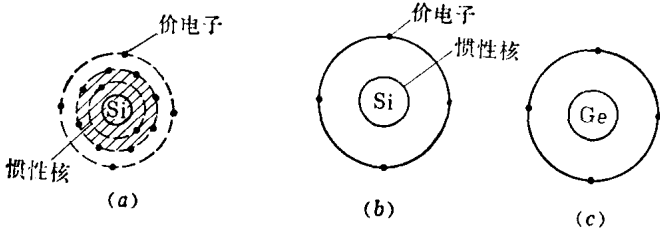


图 1-1-2 硅和锗原子结构的简化
(a) 将硅原子简化成惯性核和价电子两部分；(b) 硅原子的习惯画法；
(c) 锗原子的习惯画法

处理，把它内层的二十八个电子和原子核视为一个稳定的整体，由此形成的惯性核也带四个电子电量的正电，最外层也是四个价电子，如图1-1-2(c)所示。

硅和锗半导体材料都是晶体。图1-1-3为锗原子的晶体结构。当把硅、锗制成单晶体时，它们的原子排列就由杂乱无章的状态（叫做多晶体）变成排列非常整齐的状态（叫做单晶体）。此时，各原子之间的距离都是相等的。硅晶体的平面示意图如图1-1-4所示。这时，每个原子的价电子不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的四个原子相联系，即相邻的每两个原子共有一对价电子。电子对中的任何一个价电子，一方面围绕自身的原子核旋转，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上，价电子的这种组合方式称为共价键结构。

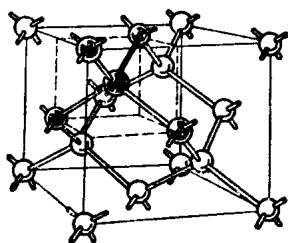


图 1-1-3 锗原子的晶体结构

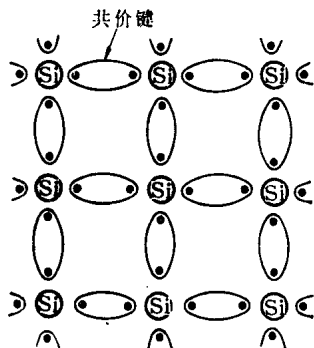


图 1-1-4 硅晶体的平面示意图

由于硅、锗半导体材料都是晶体，所以用它们制成的半导体管就叫做晶体管。

(二) 自由电子-空穴对的产生

由原子理论可知，当原子最外层的电子为八个时，其结构是比较稳定的。但是，硅和锗晶体是靠共价键结构才保证每个原子最外层的电子凑够八个的，这样它的价电子所受的束缚力就不象绝缘体那样大。

在绝对零度（ -273.15°C ）时，由于价电子无法从外界获得

能量以摆脱共价键的束缚，故此时本征半导体中没有自由电子。这时，本征半导体就相当于绝缘体。但是，在室温状态下，由于价电子获得了足够的热能，所以就会有极少数量的价电子摆脱共价键的束缚成为自由电子。当价电子脱离共价键的束缚成为自由电子后，在原来共价键的位置上就留下一个“空位”，称为空穴，如图 1-1-5 中的 A 处所示。当呈电中性的原子失去一个价电子留下一个“空位”时，该原子就带正电。这样，有空穴的原子就能吸引电子，把相邻原子共价键上的价电子吸引过来，填补这个空穴，同时在这个相邻原子中出现另一个空穴。如图 1-1-5

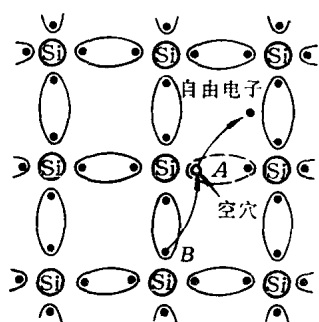


图 1-1-5 热运动产生的自由电子-空穴对

中 B 处的价电子去填补 A 处的空穴，就会在 B 处出现新的空穴，相当于空穴从 A 处移动到 B 处。可见，空穴移动的方向是和价电子依次填补空穴的移动方向相反的。由于空穴出现在某一个原子上，该原子就带一个电子电量的正电，所以可认为空穴是带正电的，空穴的运动就相当于正电荷在运动。

必须强调，空穴的运动方式和自由电子有着本质的区别。自由电

子能在晶体中自由运动，而空穴的移动是正离子吸引邻近的价电子造成的，即造成空穴移动的价电子移动只能从一个束缚状态到另一个束缚状态。

(三) 本征半导体的导电情况

在半导体中，常把可以运动的带电粒子称为载流子。在室温下，本征半导体中有两种载流子：自由电子和空穴。在本征半导体中，自由电子和空穴是成对出现的(这种现象称为本征激发)，有一个自由电子就必然出现一个空穴，故称自由电子-空穴对。因此，在室温下，本征半导体就不再是绝缘体了。当我们在一块本征半导体的两端加上一个电源 E 时，在本征半导体中就会产生

一个电场。在这个电场的作用下，自由电子将向电源的正极作定向运动，形成电子电流；空穴将向电源的负极作定向运动，形成空穴电流。由图 1-1-6 可见，在外加电源的作用下，本征半导体中流过的电流是电子电流和空穴电流之和。由于在室温下产生的自由电子-空穴对的数量是很少的，所以电路中的电流是很小的。因此，本征半导体的导电性能很差。

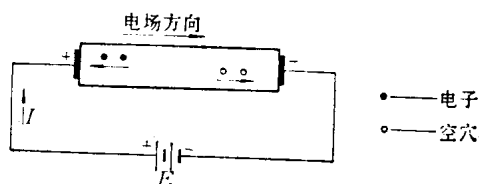


图 1-1-6 本征半导体中载流子的运动

本征半导体的一个重要特征是电子载流子和空穴载流子的数量相等。

(四) 自由电子-空穴对的复合

在室温下，自由电子和空穴都在不停地运动着。当自由电子运动到共价键上的空穴处，自由电子和空穴就会重新结合，使自由电子和空穴都消失，这种过程称为自由电子-空穴对的复合。所以，在本征半导体中，不断进行着两种相反的过程：自由电子-空穴对的不断产生和不断复合。在一定温度下，这种过程将达到动态平衡，使自由电子-空穴对保持一定数量。

二、P型和N型半导体

本征半导体的导电能力很差，用处不大。但是，如果在本征半导体中掺入有用的其它元素（称为杂质），就会使半导体的导电能力大大提高。掺入杂质（其它元素）的半导体称为杂质半导体。现在我们来讨论杂质对半导体导电能力的影响。

(一) P型半导体

如果在本征半导体硅中掺入少量的三价元素硼（B），如图 1-1-7（a）所示，由于硼原子只有三个价电子，当硼原子取代

硅晶体中的硅原子与相邻的四个硅原子组成共价键时，在一个键上就少一个电子，留出一个空穴。这样，每个掺入的硼原子都提供一个空穴，使硅晶体中产生大量空穴（其数量由掺入的硼原子数决定）。此外，在硅晶体中还有由于热作用而产生的少量的自由电子-空穴对，它们的数量比硼原子提供的空穴少得多。因此，就整个半导体而言，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。因为这种半导体主要靠空穴导电，所以叫空穴型半导体，简称P型半导体。

由于硼原子在和相邻的四个硅原子组成共价键时产生一个空穴，相邻硅原子的价电子就可能过来填补这个空穴，使硼原子的最外层多出一个电子，成为一个负离子。为突出P型半导体的主要矛盾，将P型半导体用图 1-1-7 (b) 所示的符号表示。图中以“ \circ ”表示P型半导体中的多数载流子为空穴，以“ \ominus ”表示若硼原子接受一个电子就形成带一个电子电量的负离子。在P型

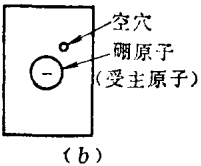
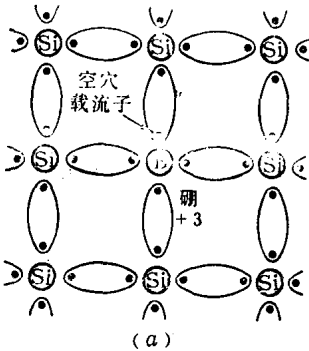


图 1-1-7 P 型半导体的示意图
(a) 硅中掺硼形成空穴(P型); (b) P 型半导体结构的简化示意图

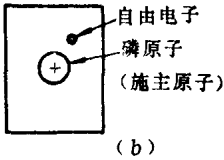
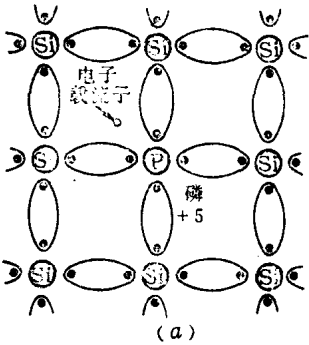


图 1-1-8 N 型半导体的示意图
(a) 硅中掺磷形成电子(N型); (b) N 型半导体结构的简化示意图

半导体中，因为掺入的杂质硼能产生空穴，接受电子，所以称为受主杂质。

(二) N型半导体

如果在本征半导体硅中掺入少量的五价元素磷(P)，如图1-1-8(a)所示，当磷原子取代硅原子组成共价键时，还多余一个价电子，它只受磷原子核的吸引，不受共价键的束缚，在室温下很容易成为自由电子。这样，每个掺入的磷原子都提供一个电子，使硅晶体中在室温下的自由电子大量增加(自由电子的数量由掺入的磷原子数决定)。此外，在硅晶体中还有由于热作用而产生的少量的自由电子-空穴对，它们的数量比磷原子提供的自由电子少得多。因此，就整个半导体而言，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。因为这种半导体主要靠自由电子导电，所以叫电子型半导体，简称N型半导体。

当磷原子在与相邻四个硅原子组成共价键，使多余的一个价电子变成自由电子后，磷原子就成为带一个电子电量的正离子。为突出N型半导体的主要矛盾，将N型半导体用图1-1-8(b)所示的符号表示。图中，以“·”表示N型半导体中的多数载流子，即自由电子，以“⊕”表示磷原子失去一个价电子后成为一个正离子。

在N型半导体中，因为掺入的杂质磷能提供自由电子，所以称为施主杂质。

小 结

1. 半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。纯净而不含杂质的半导体称为本征半导体。在室温下，本征半导体(硅或锗)中有两种载流子(自由电子和空穴)，而且它们是成对出现的。

2. 在外电场的作用下，本征半导体中的自由电子和空穴将作定向运动而形成电流。但是，在室温下，由于本征半导体中的自由电子-空穴对的数量极少，所以导电性能很差，用途不大。

3. 在室温下，本征半导体中的载流子不断地进行着两种相反

的过程：自由电子-空穴对的不断产生和不断复合。在一定温度下，这两个相反的过程达到动态平衡，使自由电子-空穴对保持一定的数量。

4. 掺入杂质元素的半导体称为杂质半导体。杂质半导体有P型和N型两种。如果在本征半导体中掺入少量的受主杂质（三价元素），便能产生大量空穴，形成P型半导体。如果在本征半导体中掺入少量的施主杂质（五价元素），便能产生大量自由电子，形成N型半导体。在P型半导体中，空穴的数量比热运动产生的自由电子多得多，即空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子，空穴对导电起主要作用。在N型半导体中，自由电子的数量比热运动产生的空穴多得多，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子，自由电子对导电起主要作用。

思 考 题

1-1-1 什么是空穴？为什么可把空穴认为是带正电的载流子？空穴的运动和自由电子的运动在本质上有什么区别？

1-1-2 P型半导体和N型半导体是怎样形成的？两种半导体中的多数和少数载流子各是什么？

1-1-3 空穴电流和电子电流的方向是否相同？为什么？

第二节 晶体管的基础——PN结

在本征半导体中掺入杂质后形成的P型或N型半导体，虽然由于载流子数量大大增加而使其导电能力大大提高，但单独的P型或N型半导体还不能用来制造各种类型的半导体器件。

如果在一块本征半导体的两边掺入不同的杂质，使一边成为P型半导体，另一边成为N型半导体，则在两种不同类型半导体的交界面处，会形成一个PN结。PN结是构成各种类型半导体器件的基础，我们必须很好地掌握它。PN结是怎样形成的呢？它有什么特性？现在我们就来讨论这些问题。