

晶体管电路基础

北方交通大学电信系
《晶体管电路基础》编写组

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以通俗易懂的语言，由浅入深，比较详细地讨论了晶体管电路的工作原理和基本电路的设计方法。并结合交通运输部门的通信、信号设备，进行了具体分析。本书还结合各章的特点，提供了电路的实际测量方法和一定数量的实用电路，供读者实践中参考。

本书共分七章，包括：晶体管的基本工作原理；晶体管低频放大器；低频功率放大器；谐振放大器；晶体管振荡器；直流放大器；晶体管直流稳压电源。

本书主要供从事有关业务的工人阅读，也可供有关技术人员参考。

晶 体 管 电 路 基 础

北方交通大学电信系

《晶体管电路基础》编写组

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

国防出版社印刷厂印

开本：850×1168¹/₃₂ 印张：20³/₄ 字数：516千

1973年12月 第1版

1973年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—57,000册 定价(科二)：1.70元

前 言

为了适应电子工业发展的需要和广大交通运输部门的工人、技术人员学习晶体管电路知识的要求,为了配合教育革命的实践,我们在学校党委的领导和关怀下,通过调查研究和校办工厂的亲身实践,收集了一些资料,编写了这本《晶体管电路基础》。

在编写过程中,我们力求以较通俗的语言,阐明基本理论和物理概念,介绍各种晶体管电路(放大、振荡和电源)的工作原理和基本设计方法,并结合交通运输部门的通信、信号设备,进行具体分析。本书主要供从事有关业务的工人阅读,也可供技术人员和大专院校有关专业的同志参考。

本书在编写的过程中,虽然通过一段现场及学校教学的实践,反复做了修改,但是,由于我们的政治思想水平和业务水平都不高,书中必然会存在不少的问题,敬请读者批评指正,以便进一步修订提高。

北方交通大学
电 信 系 《晶体管电路基础》编写组

一九七二年十一月

目 录

第一章 晶体管的基本工作原理

1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 什么是半导体	1
1.1.2 P型和N型半导体	5
1.2 PN结——晶体管的基本结构	7
1.2.1 从一个现象谈起	7
1.2.2 PN结的形成	8
1.2.3 PN结的单向导电性	9
1.3 晶体二极管	10
1.3.1 晶体二极管的伏安特性	10
1.3.2 点接触型二极管	14
1.3.3 面结型二极管	16
1.4 晶体三极管的工作原理	18
1.4.1 晶体三极管的基本结构	18
1.4.2 晶体管内部载流子的运动过程	19
1.4.3 晶体三极管的放大作用	22
1.5 晶体三极管的特性曲线	24
1.5.1 三种连接方式	24
1.5.2 共发射极连接的晶体管特性曲线	26
1.6 晶体三极管的参数	31
1.6.1 晶体管的放大参数	31
1.6.2 晶体管的频率特性参数	35
1.6.3 晶体管的直流特性参数	38
1.6.4 晶体管的极限参数	40
1.6.5 晶体管的噪声系数	42
1.7 晶体管的简易测试方法	45
1.7.1 利用万用表测量晶体二极管	45
1.7.2 利用万用表测定三极管	47

第二章 晶体管低频放大器

2.1 关于放大器的基本概念	50
2.1.1 用途	50
2.1.2 关于放大器的增益	51
2.1.3 增益的〔奈批〕和〔分贝〕表示法	53
2.1.4 放大器的频响	54
2.2 放大电路的基本分析方法	55
2.2.1 从简单放大电路谈起	55
2.2.2 放大器的静态工作点	56
2.2.3 增益的计算	59
2.2.4 图解法	70
2.3 三种基本放大单元电路	75
2.3.1 单管基本放大单元电路	76
2.3.2 双管基本放大单元电路	88
2.3.3 发射极输出单元电路	96
2.4 晶体管低频等效电路	99
2.4.1 问题的提出	99
2.4.2 从晶体管特性曲线到等效电路	102
2.4.3 $\langle h \rangle$ 参数的物理意义	105
2.4.4 $\langle h \rangle$ 参数的测量	109
2.4.5 $\langle h \rangle$ 等效电路的应用	111
2.5 多级放大器	117
2.5.1 级间耦合方式	117
2.5.2 多级放大器的计算方法	121
2.5.3 多级放大器的频率响应特性	124
2.6 负反馈放大器	136
2.6.1 关于负反馈放大器的基本概念	136
2.6.2 反馈的分类	138
2.6.3 负反馈的效果	144
2.6.4 负反馈对放大器输入和输出阻抗的影响	157
2.6.5 几种负反馈放大器的基本电路	163
2.6.6 多级负反馈放大器	181
2.7 多级放大器的设计	191
2.7.1 在设计中考虑的问题	191
2.7.2 关于多级放大器级数的确定	197
2.7.3 关于采用负反馈的问题	198

2.7.4 设计举例	203
2.8 放大器的测量	213
2.8.1 直流工作点的测量	214
2.8.2 增益的测量	215
2.8.3 频响的测量	218
2.8.4 非线性失真的测量	220
2.8.5 输出和输入阻抗的测量	224

参 考 电 路

1.高输入阻抗输入级	226
2.具有自举电路的输入级	227
3.低阻抗输出级	228
4.60路发送放大器	230
5.10~252KHz 辅助放大器	232
6.2MHz 宽频放大器	233
7.高输入阻抗放大器	234
8.宽频中电平输出放大器	236
9.音频前置放大器	237

第三章 低频功率放大器

3.1 概述	239
3.2 单管变压器输出功率放大器	243
3.2.1 典型电路	243
3.2.2 基本分析方法	244
3.3 关于非线性失真问题	247
3.3.1 放大器产生非线性失真的原因	247
3.3.2 输入电路的非线性失真	249
3.3.3 输出电路的非线性失真	249
3.4 单管甲类功率放大器的设计	251
3.4.1 设计任务	251
3.4.2 电路	251
3.4.3、设计步骤	252
3.5 双管乙类推挽功率放大器	256
3.5.1 电路和工作原理	256
3.5.2 定量分析	259
3.5.3 关于非线性失真问题	265
3.5.4 电路实例	270

3.6 乙类推挽放大器的设计	270
3.6.1 设计要求	270
3.6.2 电路	270
3.6.3 设计步骤	271
3.7 无输出变压器电路	275
3.7.1 概述	275
3.7.2 电路种类和工作原理	277
3.7.3 无输出变压器电路的设计	292
3.8 功率晶体管的热设计	298
3.8.1 关于热阻的概念	298
3.8.2 P_{CM} 、 T_j 、 T_a 和 R_T 之间的关系	302
3.8.3 设计方法	303

参 考 电 路

1. 5W 无输出变压器低频功率放大器	310
2. 优质无变压器低频功率放大器	311

第四章 谐振放大器

4.1 并联谐振回路	315
4.1.1 并联谐振回路的一般特性	315
4.1.2 具有抽头的并联谐振回路	319
4.1.3 谐振回路 Q 值的讨论	324
4.2 选频放大器	327
4.2.1 选频放大器的典型电路	327
4.2.2 对选频放大器的要求	328
4.2.3 选频放大器的计算	331
4.2.4 设计举例	334
4.3 晶体管的高频运用	342
4.3.1 晶体管的电抗效应	342
4.3.2 混合 π 型等效电路	346
4.3.3 从混合 π 型到《 Y 》参数等效电路	350
4.3.4 简化的《 Y 》等效电路	353
4.3.5 最高振荡频率	360
4.4 中频放大器	362
4.4.1 中频放大器电路	362
4.4.2 中频放大器的基本分析方法	368

4.4.3 多级中频放大器	378
4.5 晶体管高频参数的测量	380
4.5.1 共发射极小信号输入导纳 y_{ie} 的测量	380
4.5.2 共发射极小信号短路互导 y_{fe} 的测量	383
4.5.3 共发射极小信号短路输出导纳 y_{oe} 的测量	386
4.5.4 特征频率 f_T 的测量	387
4.5.5 基极电阻 $r_{bb'}$ 的测量	389
4.6 陶瓷滤波器在中频放大器中的应用	392
4.6.1 陶瓷片的压电效应	392
4.6.2 二端陶瓷滤波器	393
4.6.3 三端陶瓷滤波器	396
4.6.4 四端陶瓷滤波器	398

第五章 晶体管振荡器

5.1 振荡回路中的振荡现象	401
5.2 从谐振放大器到振荡器	404
5.3 振荡条件	406
5.3.1 自激振荡条件	406
5.3.2 振荡的建立和稳定	409
5.4 晶体管振荡器电路	414
5.4.1 互感耦合振荡器电路	414
5.4.2 三点式振荡器电路	416
5.5 LC 振荡器的频率稳定问题	421
5.5.1 关于频率稳定度的概念	421
5.5.2 振荡频率的稳定过程	423
5.5.3 影响频率稳定的因素	427
5.5.4 稳定振荡频率的措施	427
5.6 频率稳定度高的 LC 振荡器	432
5.6.1 从三点式振荡器谈起	432
5.6.2 串联型电容三点式振荡器	437
5.6.3 并联型电容三点式振荡器	440
5.6.4 两种电路的比较	443
5.7 石英(晶体)稳频振荡器	444
5.7.1 石英谐振器	445
5.7.2 石英谐振器的电特性	447
5.7.3 石英稳频振荡器电路	452
5.7.4 石英谐振器的正确使用	461

5.8	RC 振荡器	464
5.8.1	RC 相移振荡器	465
5.8.2	RC 桥式振荡器	469
5.9	晶体管振荡器设计中应考虑的问题	475
5.9.1	实例讨论	475
5.9.2	设计中应考虑的问题	480
5.10	晶体管振荡器的测试	482
5.10.1	初测	483
5.10.2	频率稳定度的测量	483
5.10.3	石英谐振器的激励电平的测量	485
附 录		492

参 考 电 路

1.10KHz 低频晶体振荡器.....	497
2.10~25MHz 晶体振荡器.....	500
3.120MHz 泛音晶体振荡器	501
4.100KHz LC校正振荡器	503
5.高频率稳定度 LC 振荡器.....	505

第六章 直流放大器

6.1	直流放大器的主要问题	508
6.1.1	级间耦合方法问题	509
6.1.2	输出零点漂移问题	509
6.2	单端式直流放大器	510
6.2.1	直流放大器的级间耦合	510
6.2.2	直流放大器的零点漂移	513
6.2.3	几种抑制零点漂移的电路	518
6.3	差动放大器	520
6.3.1	差动放大器的工作原理	520
6.3.2	差动放大器典型电路的分析	526
6.3.3	差动放大电路的设计	533
6.4	差动放大电路的几种形式	536
6.4.1	采用恒流管的差动放大电路	536
6.4.2	单端差动放大电路	538
附 录		546

第七章 晶体管直流稳压电源

7.1 整流和滤波	550
7.1.1 从半波整流谈起	550
7.1.2 全波整流电路	553
7.1.3 桥式整流电路	556
7.1.4 倍压整流电路	557
7.1.5 滤波器	560
7.1.6 整流滤波电路的设计	561
7.2 硅稳压管稳压电路	563
7.2.1 硅稳压管的主要特性	564
7.2.2 硅稳压管稳压电路的分析	569
7.2.3 设计举例	578
7.3 串联型晶体管稳压电源的原理	581
7.3.1 从最简单的串联型晶体管稳压电路谈起	581
7.3.2 直流放大器在稳压电路中的应用	583
7.3.3 串联型晶体管稳压电源的基本组成	585
7.3.4 定量分析	589
7.3.5 串联型晶体管稳压电源的设计	593
7.4 提高串联型晶体管稳压电源性能的措施	597
7.4.1 提高输出电压稳定度的措施	598
7.4.2 提高输出电压温度稳定度的措施	604
7.4.3 减小波纹电压的措施	608
7.5 输出电压可调的稳压电源	608
7.5.1 输出电压可调稳压电源的主要问题	609
7.5.2 如何扩大输出电压调节范围	610
7.5.3 输出电压分档式可调稳压电源	613
7.5.4 具有饱和电抗器的可调式稳压电源	615
7.6 过载和短路保护电路	623
7.6.1 饱和电抗器的过载保护作用	623
7.6.2 限流式保护电路	624
7.6.3 切断式保护电路	627
7.7 稳压电源的测量	630
7.7.1 稳定系数 S 和输出电阻 R_o 的测量	630
7.7.2 交流输出阻抗 Z_o 的测量	632
7.7.3 波纹电压降低比的测量	632
附 录	634
附录一 本书使用符号说明	634
附录二 半导体器件型号命名方法	637
附录三 国产晶体三极管参数选录	638

第一章 晶体管的基本工作原理

《晶体管电路基础》主要是研究晶体管的基本电路问题。也就是说，解决怎样应用晶体管器件来设计、制造生产实践中需要的各种晶体管电路设备。“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”因此，应用晶体管，首先要懂得晶体管，懂得它的性质，它和它外部电路的关系，还必须深入到晶体管内部去认识它的内部矛盾规律。只有这样，才能掌握这些矛盾规律去解释晶体管外部电路所表现出来的各种现象，更好地运用晶体管。因此，在研究晶体管电路之前，首先介绍一下晶体管的基本工作原理是十分必要的。

1.1 半导体的基本知识

晶体管是用半导体材料做成的。因此，要了解晶体管，首先必须对半导体的性质有所认识。

1.1.1 什么是半导体

大家都知道，金、银、铜、铝等金属都是很好的导电材料，我们称它们为导体。而陶瓷、云母、塑料、橡胶等物质很难导电，我们称它们为绝缘体。有一类物质（如锗、硅等），它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，这就是半导体。

但是，半导体所以引起人们的极大兴趣，原因并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而在于它具有许多独特的性质。同一块半导体材料，它的导电能力在不同情况下会有非常大的差别，它一会儿象地地道道的导体，但一会儿又变得象典型的绝缘

体。比如，在纯的半导体锗中掺入极微量的其他物质（叫做杂质），它的导电能力将会有成千成万倍的增加，并且可以根据掺入杂质的多少来控制半导体的导电性能，人们正是利用半导体的这种独特性质做出了各种各样的晶体管器件。

杂质为什么对半导体会产生这样大的作用呢？“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”因此，我们必须深入到半导体内部，去找半导体内部的矛盾规律，这样才能解释半导体器件外部的导电现象。

我们先来讨论不含杂质的半导体，把它叫做本征半导体。只有认识了本征半导体，才能进一步认识杂质对半导体的巨大作用。

我们知道，一切物质都是由原子构成。以锗原子为例，如图1.1所示。

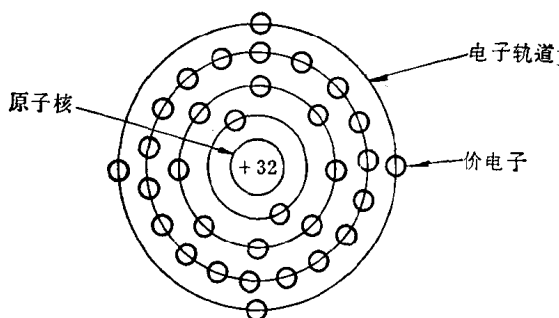


图1.1 锗原子的结构模型

一个锗原子由带正电的原子核和围绕着它的 32 个带负电的电子组成，32 个电子按一定的规律分布在四层电子轨道上。由于原子核带 32 个电子电量的正电，故正常情况下原子呈中性。靠近原子核的里面三层 28 个电子由于受原子核的束缚较大，很难有活动的余地，所以它和原子核组成一个惯性核，它的净电量是 $32 - 28 = +4$ 个电子电量（图 1.2），而最外层的四个电子，受原子核的束缚较小叫做价电子。锗和硅原子都有四个价电子，故叫做四价元素。每一元素的导电性能和化学性能都与价电子有很大

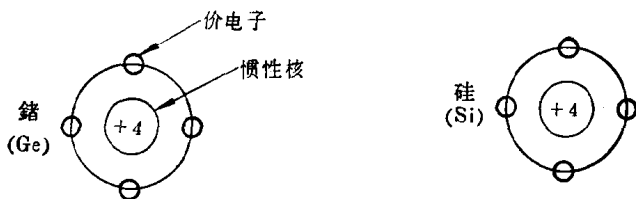


图1.2 原子结构简化图

关系。

锗和硅等半导体材料都是晶体结构，因此人们又把半导体管叫做晶体管。一块晶体由许多小的晶体粒组成。在每一晶体粒内，原子是有规律的整齐地排列着，如图 1.3 所示。

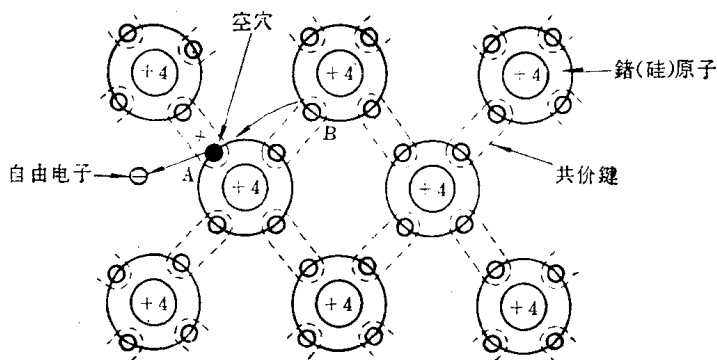


图1.3 晶体粒中原子的排列，本征激发

每个锗原子受邻近四个原子的束缚，四个价电子彼此象手拉手似的联结在一起，组成四个共价键，共价键象纽带一样地将排列整齐的原子联结起来。

应该指出，在一般情况下，晶体粒中的锗原子的排列虽然是整齐的，但从整块晶体来说，每个晶体粒的方向（叫做取向）彼此不同，故原子的排列还是无规律的，不整齐的，这叫做多晶体。一般多晶体不能用来做晶体管。因此要把多晶体加以提炼成单晶体，所谓“拉单晶”就是将多晶变成单晶体的一种工艺过程。

在绝对零度 ($0^{\circ}T = -273^{\circ}\text{C}$) 时, 由于共价键的束缚, 价电子无法摆脱这种束缚, 因此本征半导体中没有自由电子, 此时半导体相当绝缘体。但在室温状态, 由于晶体中的束缚电子受热激发获得足够的能量, 使少量价电子摆脱了束缚状态, 脱离共价键而成为自由电子, 同时在原来共价键的位置上就留下一个空位, 叫空穴 (图 1.3)。空穴由于失掉一个电子而带正电。在本征半导体中, 有一个自由电子就必然有一个空穴, 这样就形成了电子-空穴对。这种现象叫做本征激发。因此, 在室温下, 本征半导体不再是绝缘体了, 当我们在一块本征半导体两端加上电压 (图 1.4), 在电流表中就会指示电流。因为, 在外加电压的作用下, 自由电子将跑向正极, 而空穴将跑向负极^[1], 于是在电路中就形成了电流。从图 1.4 可见, 电路中形成的电流由两部分组成, 即由自由电子的移动和空穴移动 (实质上是受束缚的电子填充空穴所产生的运动) 组成, 前者叫电子型导电, 后者叫空穴型导电。

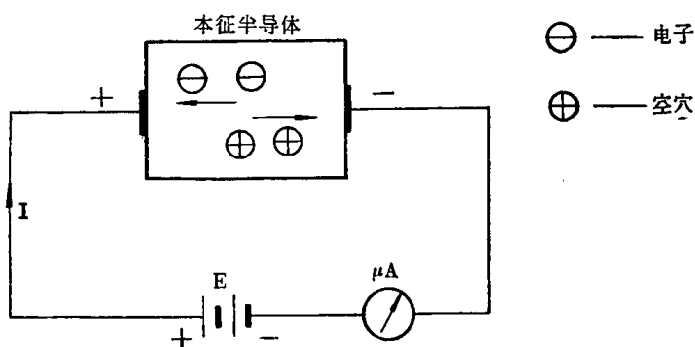


图1.4 本征半导体中电荷的移动

我们把以上讨论的问题归纳一下:

[1] 应该说明, 实际上空穴并非本身在移动, 而是空穴附近的电子在热和外加电场作用下, 脱离了原来的共价键来填充这个空穴, 从图 1.3 可见, 电子从 B 处移到 A 处去填充 A 处的空穴, 而在 B 处出现新的空穴, 这相当于空穴从 A 移动到 B。我们打个比方, 大家在礼堂开会, 前排走了一个人, 出现一个空位 (相当空穴), 后排的人就喜欢往前坐, 这样, 后排的人坐到前排的空位, 而在后排留下一个新的空位, 相当于前排的空位往后移动了, 但实际上椅子并没有移动。

(1) 本征半导体中同时存在着两种导电现象——电子型导电和空穴型导电，而流过外电路的电流是电子电流和空穴电流的代数和。

(2) 在本征半导体中，靠本征激发产生的电子-空穴对是非常少的，因此电路中流通的电流很小（常用 μA ，即 $10^{-6} A$ ，或 $m\mu A$ ，即 $10^{-9} A$ ，来计量），但它对温度却十分敏感，温度愈高，电流愈大。

(3) 由于自由电子和空穴的移动能起导电作用，就是说，它们都是载运电流的带电粒子。所以，我们把自由电子和空穴都叫做载流子。

1.1.2 P型和N型半导体

通过上述对本征半导体的讨论可知，本征半导体的导电能力是很差的，其本身用处不大。但如在本征半导体中掺入合适的其他元素，我们叫它杂质。虽然这些杂质的数量只不过是沧海之一粟，但是它却可以使半导体的导电性能有很大改变，从而为半导体的应用开辟了广阔的天地。掺杂质的半导体称为杂质半导体。

为什么杂质能有这样巨大的作用呢？

“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”实验证明，金属导体中即使掺入千分之一的杂质，对它导电性能的改变也是微不足道的，而在半导体中，只要掺入千万分之一的杂质，它的导电能力将有十几倍的增加。让我们深入到半导体内部，来看看杂质是怎样通过半导体的内因而起作用的。

若在本征半导体硅中，掺入少量五价元素，例如磷，如图1.5(a)所示。那么一个磷原子同相邻四个硅原子结成共价键外，还多余一个电子，这个电子不受共价键束缚，很容易变成自由电子。这样，磷原子掺入硅晶体的结果，在常温下就会在硅晶体中增加自由电子。因此，这种半导体主要靠电子导电，叫做电子型

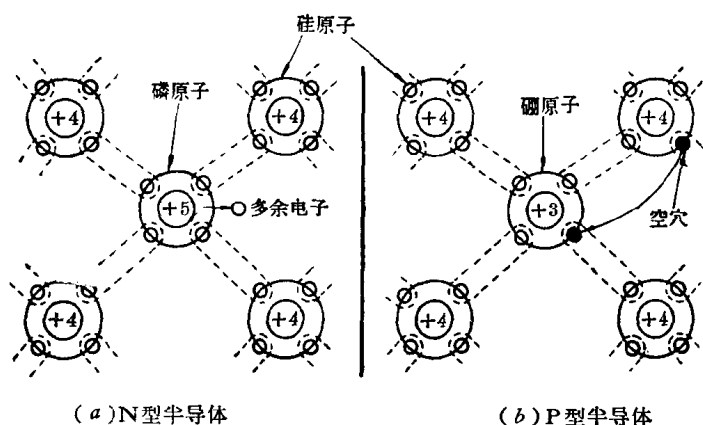


图1.5 杂质半导体

半导体，或简称N型半导体。

在N型半导体中，除掺入杂质产生的自由电子外，也还存在着本征激发所产生的电子-空穴对。因此，在N型半导体中，参与导电的除数量很多的电子外，还有少数的空穴。为便于区别，在N型半导体中，我们把电子叫多数载流子，而空穴叫少数载流子。

我们现在来看另一种情况，若在硅晶体中掺入少量三价元素，例如硼，如图1.5(b)。那么一个三价的硼原子同相邻四个硅原子结成共价键，而其中一个键上缺少一个电子，周围共价键上的电子很容易移动到这里来，于是形成一个空穴。这样，掺入硼的硅晶体中将产生大量空穴，这种半导体主要靠空穴导电，所以叫空穴型半导体，或简称P型半导体。同样，在P型半导体中也有本征激发而产生的电子-空穴对。所以在P型半导体中，与N型相反，空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。

从以上讨论可知：

(1) 两种不同杂质掺入硅（或锗）晶体，产生两种类型的半导体——N型和P型半导体。

(2) 在N型半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。在P型半导体中，则相反。

1.2 PN 结——晶体管的基本结构

单块 P 型或 N 型半导体，从外部电路反映出来的现象仅仅是电流比本征半导体增加了。因此单块半导体不能做成我们所需的晶体管器件。尽管目前晶体管的种类很多，有二极管、三极管、可控硅等等，但它们都是由最基本的结构，即一块 P 型半导体和一块 N 型半导体的结合，叫 PN 结组成。

什么叫 PN 结呢？

1.2.1 从一个现象谈起

通过图 1.6 实验，可知：电池 E 与 PN 结正向连接时（即 P 型部分接电池正极，N 型接电池负极），电路内电流 I 很大（电流方向在 PN 结中是从 P 到 N），也就是 PN 结呈现电阻很小。反之，电池极性相反，即反向连接，则电路内电流 I 很小，而且 I 的方向在 PN 结中从 N 到 P，也就是 PN 结呈现电阻很大。这个实验的结论是，PN 结具有单向导电的性能。PN 结为什么会有这种性能呢？这是由于 PN 结内部的矛盾运动所决定的。现在让我们深入到 PN 结内部来看一看 PN 结是怎样形成的，它又为什么具有单向导电的性能。

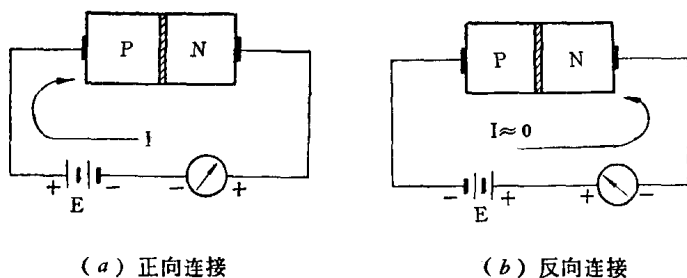


图1.6 P-N结的单向导电性