

电子技术基础

绪言

电子技术是发展很迅速的学科之一。它的应用目前已广泛渗透到各种领域,成为现代先进科学技术的一个重要组成部分。

一、什么是电子技术

电子技术的特征:是它要采用电子管、离子管、半导体(也称晶体管)集成电路这一类的电子器件。

电子管和离子管是电子器件的第一代。目前,虽然在很多特殊的场合中电子管和离子管还在应用,但多数场合已由半导体器件取代。所以,我们不讨论电子管与离子管,只讨论半导体和集成电路。

电子器件与通常的电阻器、电容器、电感器、变压器、开关等元件适当地连接起来,组成电子电路。才能发挥它们的容易控制,工作灵敏,响应速度快等特点。

因此,学习电子技术,除了要了解电子器件外,还要研究电子电路。

电子电路与普通电路的区别,在于它们包含有电子器件,而这些器件的特性往往是非线性的。

分立电路:由各种单个的器件和元件连接起来的电路。

目前的分立式电子电路通常是把许多元件和器件焊接在印刷电路板上组成的。复杂的电路有成千上万个焊点,这些焊点的接触不良,往往是电子设备发生故障的一种原因,影响设备运行的可靠性。

集成电路:把许多晶体管和阻容元件等做在同一块硅晶片上,组成的电路。

集成电路是五十年代末出现的 (integrated circuit, 缩写IC)。

集成电路的出现, 既进一步缩小了体积, 减轻了重量, 降低了功耗, 又由于减少了电路中的焊点, 提高了工作的可靠性。

集成电路可分为小规模、中规模、大规模和超大规模的集成电路。目前的超大规模集成电路, 每块半导体芯片上集成有上百万个元件和器件, 而芯片的面积只有几十平方毫米, 象一片指甲那样大, 所以集成电路的出现, 使电子学来了个新的飞跃, 进入了微电子学时代。

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

随着电子技术的迅速发展, 新型的电子器件层出不穷。电子电路的种类也与日俱增。为便于理解和掌握这些电子电路, 可以把它们划分为两大类。

即: 一类叫做: 模拟电子技术
一类叫做: 数字电子技术。

电子电路中的电信号 (即工作信号) 可分为两类:

一类: 模拟信号; 另一类: 数字信号。

模拟信号: 按时间连续变化的信号, 除开数字信号以外的所有形式的信号。

例:

测温度。温度不可能发生突跳。

数字信号: 在时间上和数值上都是离散的信号。一方面它们的变化在时间上是不连续的, 总是发生在一系列离散的瞬间, 一方面, 它们的数值大小和增减变化都采用数字形式。

例:

用一个电子电路去记录从一条自动生产线上输出的零件数量。每生产一个零件时, 就给电子电路一个信号, 使之记入“1”。

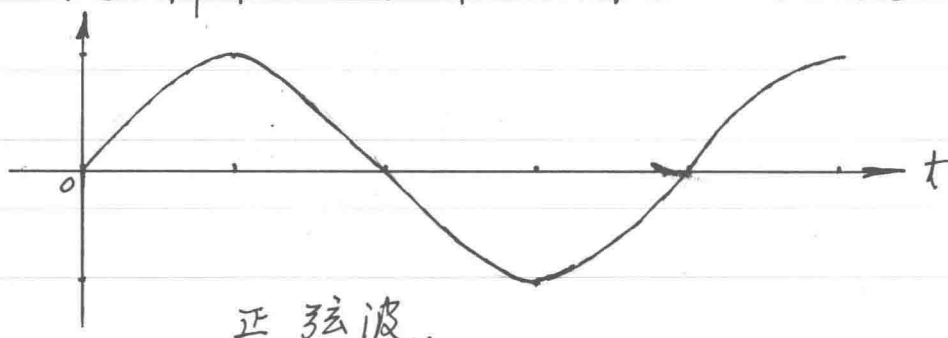
而平时加给电路的信号是零, 所以不记数。零件数目这个量就是一个数字信号, 它的变化在时间上和数量上都是不连续的。

模拟电子电路: 作用于模拟信号下的电子电路, 即处理模拟信号的电路。简称模拟电路。

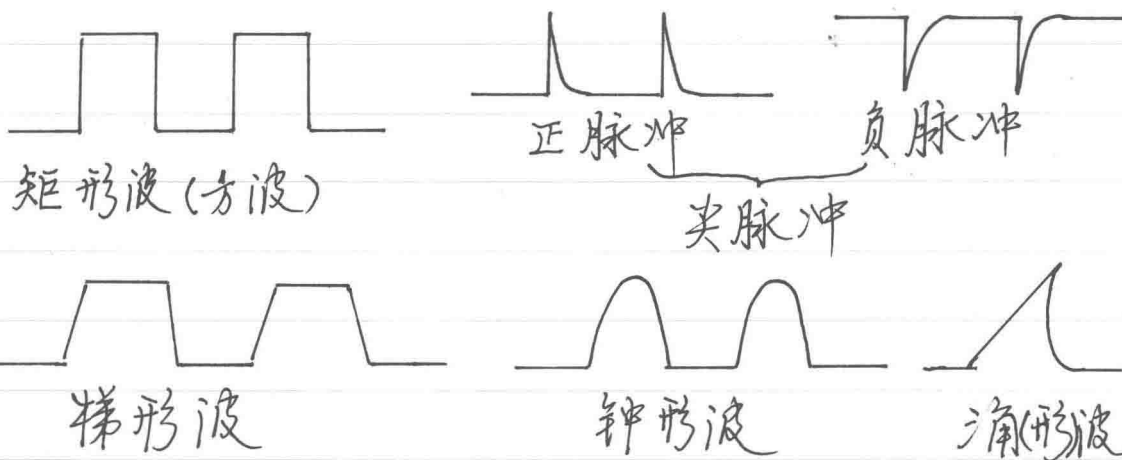
数字电子电路: 作用于数字信号下的电子电路, 即处理数字信号的电路。简称: 数字电路。

在模拟电路中, 电流和电压的波形是连续变化的。

正弦波是一种常用来分析电路作用的模拟信号的波形。



在数字电路中, 信号波形具有突然的跃变, 是脉冲式的。



二. 电子技术的应用:

电子技术的应用可归纳为四个方面。

1. 通讯:

电子技术最初应用于通讯, 并迅速发展。当代卫星通讯,

遥感, 遥测, 数字通信等方面的成就, 实际上就是把人类的视力和听力扩大了无数倍。

2. 控制:

现代化工厂可以利用电子技术使机器有条不紊地自动工作, 很多人类无法生存的环境(例: 高温, 水下, 有毒气体的环境)中, 可使机器代替人类工作, 好比使人类的双手变得无比奇妙。

3. 计算机:

人类发明的电子计算机可以帮助人们进行脑力劳动。

4. 文化生活:

电视机, 录音机, 录像机, 音响, 家庭影院, 电子玩具和教具等已成为人类生活中不可缺少的设备。

电子技术的应用几乎渗透到国民经济和人民生活的一切领域中, 并在许多方面引起了根本性的变革。

电子技术水准是现代化的重要标志。

三、怎样学习电子技术课:

本课程的性质: 一门电子技术方面入门性质的基础技术课。

本课程的任务: 获得电子技术的基本理论, 基本知识和基本技能。

培养分析问题和解决问题的能力, 为以后深入学习电子技术的某些领域, 以及为电子技术专业中的应用打好基础。

本课程的内容: 讲述电子学中最初步、最基本、最根本、最共性的东西。

学习中, 着重抓“三基”, 而不是面面俱到地讨论电子技术的各个方面。概要地说:

基本理论: 主要是指在已经学过“电路”课程的基础上, 进一步掌握电子电路的原理与分析方法。

基本知识: 要求熟悉基本的电子器件和电子电路的性质及其

主要应用。

基本技能：学习电子电路的测试技术，实验能力，运算能力和识图能力。

关于器件(管)、电路(路)、应用(用)三者的关系：

管、路、用结合，管为路用；以路为主。

就是把课程的重点放在最基本的电路上，即重点放在电子电路的分析上，对于电子器件，包括集成组件，则着重在于了解它们的外部特性和使用知识，而不深入论述内部微观的物理过程及生产工艺等，只扼要介绍常用的半导体器件。

分立元件与集成电路的关系：

分立为基础；集成是重点；分立为集成服务，以适应当前电子技术的发展趋势。

学习方法：本课程属于工程方面的基础技术课。因此，在学习中：

要充分注意它的理论性和实践性。

要注意采用工程观点，从实际出发，讲求实效，采用工程观点进行近似估算，可使分析计算复杂电子电路的工作大大简化。

要注意重视实验技术。估算是否合理，产生的误差是否可以允许，实验技术也是一种基本功。

本课程是入门性质的技术基础课程，在学习中会遇到很多基本概念和基本原理。

首先，要正确而牢固地建立基本概念，切忌似懂非懂，以致问题越积越多，只有基本概念清楚，才有可能弄清本课程的基本原理。

其次，定性分析，定量估算和安装调试，三者对于电子技术人员来说，具有同样的重要意义。所以，电子技术人员除了掌握电子技术基础理论以外，还应具有较强的实验能力。

模 拟 电 子 技 术

第一章 半导体二极管和电路分析

§1-1 半导体器件基础.

半导体器件是组成电子电路的重要元件,用半导体制成的电子器件统称为半导体器件. 半导体器件有: 半导体二极管、三极管、场效应管和半导体集成电路等. 可分为单极型半导体器件和双极型半导体器件两种.

1-1-1 本征半导体.

存在于自然界中的一切物质,按其导电能力的强弱可分为导体、绝缘体、半导体三大类.

物质的导电能力通常用电阻率的大小来衡量.

导体: 容易传导电流的物质. 金属都是导体,如银、铜、铝、铁等.

金属导体的电阻率较小,一般在 $(10^{-6} \sim 10^{-3}) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内.

绝缘体: 几乎不传导电流的物质. 如橡胶、陶瓷、石英、塑料、

玻璃等. 绝缘体的电阻率很大,一般在 $(10^8 \sim 10^{20}) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内.

半导体: 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质. 常用的半导体

材料很多,如硅、锗、硒等元素以及硫化镉、砷化镓、

碳化硅等化合物. 最常用的是硅、锗. 半导体的电阻率介于导体、绝缘体之间,一般在 $(10^{-3} \sim 10^8) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内.

纯净的硅在常温时的电阻率约为 $230000 \Omega \cdot \text{cm}$.

物质的导电性为什么有这样的差异呢? 根本原因在于物质内部原子和原子的结合方式和原子本身的结构.

原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成,而电子又分

成几层围绕原子核不停地运动。

导体：比较起来，金属材料的外层电子受原子核的束缚力很小，

(银：Ag $(+47)$ 、铜Cu $(+29)$ 、铝Al $(+13)$ 、铁Fe $(+26)$)，有大量电子能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子。在外电场作用下，带负电的自由电子作定向运动，形成电流。金属导体中，自由电子是载流子。

载流子：运载电荷的粒子。

绝缘体：绝缘体材料中，原子的外层电子受原子核的束缚力很大，很不容易挣脱出来，因此形成自由电子的机会非常少。

半导体：半导体材料的原子结构比较特殊。其外层电子不像导体那样容易挣脱，也不像绝缘体束缚得很紧，这就决定了它的导电性介于导体和绝缘体之间。

半导体之所以能够得到广泛地应用，是因为它在导电性能上具有如下两显著的特点：

1. 纯净的半导体受到加热或光照时，其电阻率都会有很大的下降，据此特性，人们制成了热敏元件和光敏元件(光敏特性，热敏特性)。
2. 在纯净的半导体中加入微量的其它特定元素(也叫“杂质”)，可以使半导体的导电能力有明显的增加。半导体中含有 $1/10^7$ 的杂质时，其电阻率会下降到原来的 $1/16$ ，而金属中含有 $1/1000$ 的杂质时，对其电阻率的影响还是微不足道的。(掺杂特性)。

利用半导体的这些特性可制造出具有不同性能的半导体器件。

半导体是晶体。

本征半导体(纯净半导体)：高度提纯、晶体结构完整的单晶体。

[完全纯净、晶格完整的半导体]

本征半导体的纯度很高，对硅的纯度一般要求在99.99999%以上。由于其含杂质极微，故本征半导体材料呈现出其本身固有的特征。

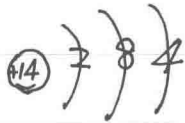
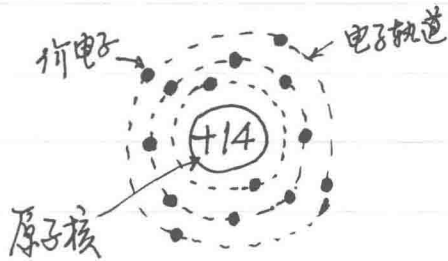
本征硅和锗：半导体硅和锗在使用时经过工艺处理做成本征半导体。

价电子：原子的最外层轨道上的电子。

元素有几个价电子就叫几价元素。

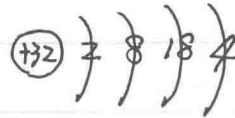
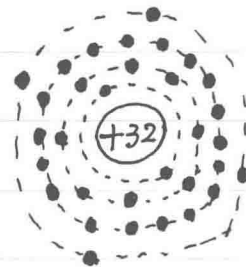
硅(Si)原子结构

(硅原子序为14)



锗(Ge)原子结构

(锗原子序为32)

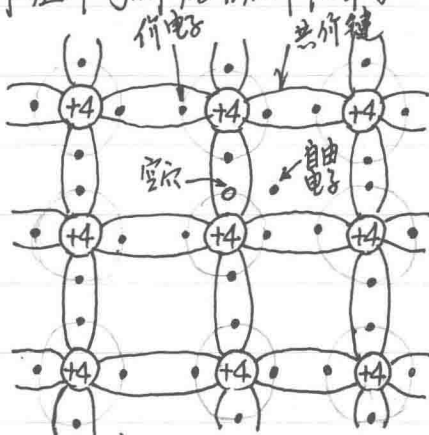


在几层上,可容纳的最多电子数为 $2n^2$ 。

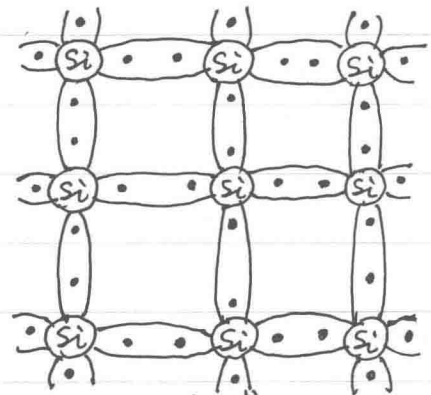
半导体材料硅和锗都是四价元素。

当把硅、锗等半导体材料制成单晶体时,其原子排列就由杂乱无章的状态,变成了非常整齐排列,组成一定形式的空间点阵。

本征半导体的晶体结构



硅单晶结构



共价键：原子外层的电子不仅受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的原子发生联系,每两个相邻原子共有一对电子。这种原子间电子共有化结构称为共价键。

束缚电子：价键内的两个电子。

共价键结构：电子对中间任何一电子，一方面围绕自身电子核运动，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。

在热力学温度零度(0K)绝对零度以下，无外界激发时，共价键中的价电子被束缚得很紧。这种情况下，本征半导体中无载流子存在，此时的本征半导体具有绝缘体的性能。

当共价键中的价电子获得足够大的能量(光、热)，就会挣脱原子核的束缚而成为自由电子——电子载流子。

当电子从共价键中挣脱出来成为自由电子后，在共价键中留下一个空位。这个空位叫做空穴。

在本征半导体内，自由电子和空穴总是成对出现的。

晶体中某处出现一个空穴，邻近共价键中具有较高能量的价电子就可以较容易地填补这个空位，而使空位由原来的位置转移到新的位置上，这样就形成了空穴运动——空穴载流子。

在本征半导体内，不仅有电子载流子，还有空穴载流子。

空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

激发：价电子在外部能量作用下，脱离共价键成为自由电子的过程。

激活能(E_g)：电子脱离共价键束缚所需要的最小能量。硅的激

活能 $E_g = 1.1 \text{ eV}$ (电子伏)，锗的激活能 $E_g = 0.68 \text{ eV}$ (电子伏)

光照和热辐射都是激活能的来源。

本征激发：本征半导体中由于热、光等原因使自由电子和空穴成对地出现的现象。

本征激发产生的电子空穴对(载流子的“产生”)，同时电子和空穴也会相遇而互相填补，并成对地消失(载流子的“复合”)。在一定的条件下，“产生”和“复合”最后达到动态平衡，即单位时间内，激发和复合的载流子数相等，载流子浓度就不再增大，一定温度下有一定的载流子浓度。 $n_i = p_i$

n_i : 空穴浓度, p_i : 电子浓度 —— 本征载流子浓度.

硅、锗的本征载流子浓度与温度的关系.

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{3/2} e^{E_g/(2kT)}$$

其中: E_g : 半导体的激活能;

T : 绝对温度;

k : 玻耳兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K)

A : 系数.

在室温 (27°C) [$27^\circ\text{C} = 300^\circ\text{K}$] 时, 硅的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$, 锗的本征载流子浓度 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$

半导体的导电能力随温度上升会显著增强, 这是半导体的一个重要特性.

当半导体上加电压时, 通过半导体的电流可看做是由两部分组成: 一部分: 自由电子定向运动形成的电子电流.

另一部分: 共有电子递补空穴所形成的空穴电流.

两者的区别:

电子电流是带负电的电子的定向运动.

空穴 (它的运动方向和电子相反) 电流是带正电的空穴的定向运动.

在同一电场作用下, 空穴和自由电子的运动方向相反, 而它们形成的电流方向相同. 半导体中的电流为电子电流和空穴电流之和.

在半导体中, 不仅有电子载流子, 而且还有空穴载流子, 这是半导体导电的一个重要特征.

本征导电: 本征半导体在外加电场作用下产生的导电现象.

载流子浓度: 单位体积 1 cm^3 中的载流子数.

1-1-2. 杂质半导体.

在纯单晶半导体中, 虽然多了一种空穴载流子, 但载流子的总数仍然很少, 电阻率仍较大, 导电能力较差, 所以本身的用处不大。

为增强半导体的导电性能, 在半导体中可以人为地掺入微量的其它适当的元素。

杂质: 被特定掺入的元素对半导体基体而言。

杂质半导体: 掺有杂质的半导体。

掺杂半导体: 在本征半导体中, 掺入微量的其它元素(杂质), 就可明显提高导电能力。

掺入不同性质的杂质, 可以获得不同导电类型的半导体。

掺杂半导体可分别制成: 电子型半导体(N型半导体)

空穴型半导体(P型半导体)

1. N型半导体(电子型半导体).

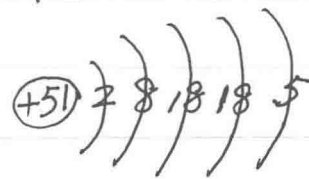
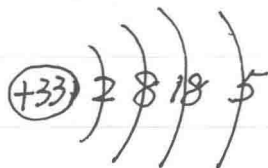
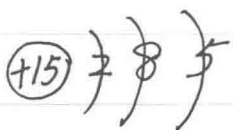
在硅(或锗)单晶体中掺入微量的五价元素(五价杂质原子)。

例: 磷、砷、锑等五价元素。

磷(P)原子结构

砷(As)

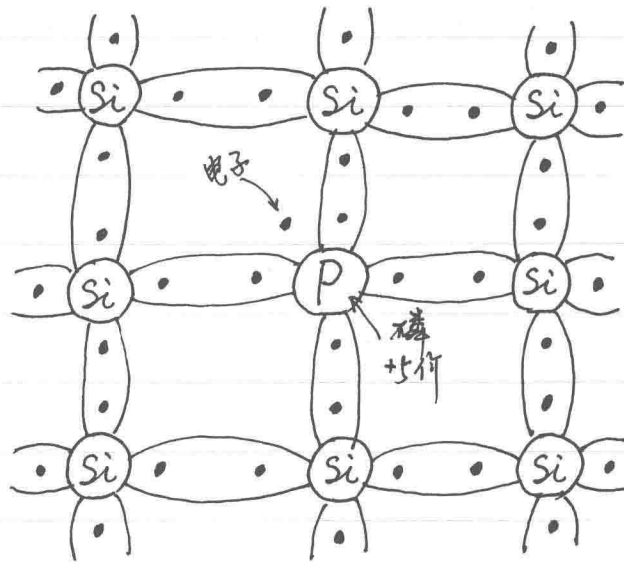
锑(Sb)



因为掺入的五价元素是微量的, 掺入后基本上不会改变本征硅的晶体结构。

硅原子和磷原子组成共价键后, 磷原子外层的五个电子中, 四个电子与相邻的四个硅原子的价电子组成共价键, 多余的一个电子受原子核的束缚很小, 因此很容易成为自由电子。这时磷原子因少了一个价电子而成为正离子。

硅中掺入磷形成自由电子(N型).



杂质电离：杂质原子施放电子而成为离子的过程。

施主杂质：施放电子的杂质。杂质原子在晶体中给出一个多余电子。

掺入磷杂质，每个原子都可能提供一个自由电子（产生电子的同时并不产生空穴），从而使硅晶体中将有较多的自由电子。这种半导体主要靠自由电子导电，半导体中离子不是载流子（离子不能作定向运动）。

电子型半导体（N型半导体）主要靠自由电子导电的半导体。

在N型半导体中，杂质原子提供的自由电子数外，尚有少量本征激发产生的电子空穴对。因杂质提供了大量额外的自由电子，从而使半导体中自由电子数远远超过空穴数。因此，N型半导体中：电子是多数载流子（简称：多子）。

空穴是少数载流子（简称：少子）。

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

$$\text{正电荷量} = \text{负电荷量}$$

—— N型半导体还是呈电中性。

2. P型半导体(空穴型半导体)

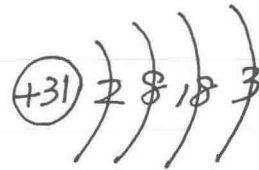
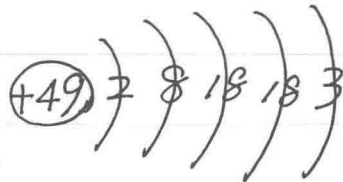
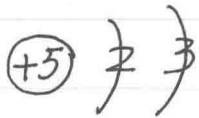
在硅(或锗)单晶体中掺入微量的三价原子。

例: 硼、铟、镓等三价元素。

硼(B)原子结构

铟(In)

镓(Ge)



硼是三价元素, 外层只有3个电子, 当它与硅原子组成共价键时, 就会形成空穴, 掺入的硼杂质, 每个原子都能提供一个空位(不是空穴, 因硼原子仍呈电中性)。与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位, 从而在电子原来所处的位置上造成带正电的空穴, 而硼原子则因获得电子变成带负电的离子。常温下每个硼原子都能引起一个空穴(与此同时并不产生电子), 从而使硅晶体中空穴载流子的数目大大增加。

受主杂质: 在晶体中可接受一个电子的杂质原子。

空穴型半导体(P型半导体)主要靠空穴导电的半导体。

P型半导体中: 空穴是多数载流子(多子)

电子是少数载流子(少子)

负离子数 + 自由电子数 = 空穴数

—— P型半导体呈电中性。

1-1-3 PN结

漂移: 在电场作用时, 载流子所作的定向运动。

漂移电流: 载流子漂移运动所形成的电流。

扩散运动: 在电中性的半导体中, 同一种载流子浓度有差别时, 载流子从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动。

扩散电流：由载流子扩散运动形成电流。

在半导体中只有存在载流子的浓度差别时才会引起扩散运动，而浓度差又只能在电中性的半导体内才能建立。

在本征半导体中掺杂，目的不仅在于改变其导电性，更主要的是为了制成PN结。

在一块半导体单晶芯片上，用掺杂的方法制成具有P型和N型两区域，它们的交界处就形成了PN结。

PN结的形成：

当P型半导体和N型半导体联结为一体时，在交界的地方就必然要发生由于浓度不均匀分布而引起的电子和空穴的扩散运动。

—— P区的多子(空穴)向N区扩散；N区的多子(电子)向P区扩散。

随着扩散运动的进行，P区的空穴减少，出现带负电荷的离子区(用 $\ominus$ 表示)；N区的电子减少，出现带正电荷的离子区(用 $\oplus$ 表示)。

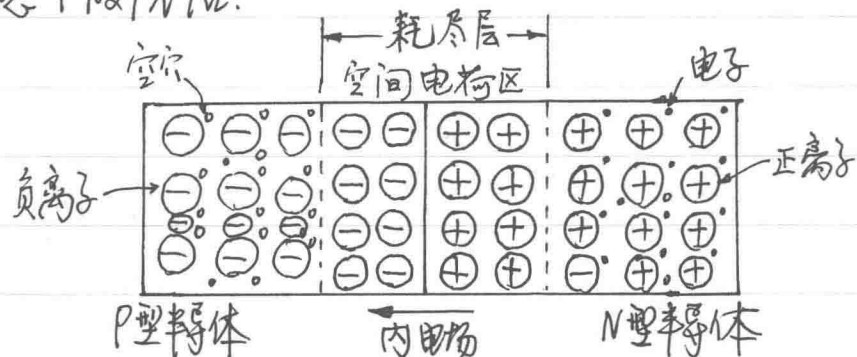
扩散的结果，破坏了P区和N区交界面附近的电中性条件，在交界面的两边便产生了内部电场，其方向正好和扩散运动的方向相反。

内电场是阻碍多子扩散运动的，只有获得足够能量的多子，才能克服势垒越过交界面。

扩散运动的结果建立了它的对立面。

—— 阻止多子继续扩散的内电场。

平衡状态下的PN结：



空间电荷区(耗尽区, 耗尽层, 势垒层, 阻挡层): 动态平衡时, 在界面附近产生的缺少载流子的区域。

势垒: PN结中建立的内电场和电位差。

PN结的形成, 是载流子在半导体内的扩散运动和漂移运动达到动态平衡的结果。

动态平衡: 指单位时间内, 有多少多子扩散到对方区域, 同时对方区域就有同样数量的少子漂移回来。载流子的扩散和漂移时刻都在进行着, 但从宏观上看, 通过PN结的载流子数均为零。即由于扩散电流和漂移电流方向相反, 流过PN结的净电流为零。

随着多子扩散运动的进行, 出现了内电场及少子的漂移运动。漂移使空间电荷区变窄, 电场减弱, 使扩散容易进行。

在动态平衡状态, 单位时间内扩散的载流子数与漂移的载流子数相等。即: 扩散电流 = 漂移电流。

在无外加电场或其他激发因素(如光的照射)作用时, PN结中没有电流通过。

在空间电荷区内载流子极少, 所以空间电荷区内的电阻率很高。

PN结的内电场 e_{in} 所建立的电位差 U_{ho} 的大小与半导体材料、掺杂浓度及环境温度有关。

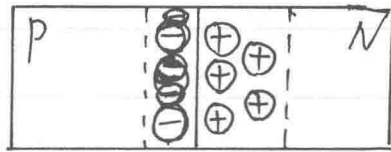
在室温下, 硅材料的PN结 $U_{ho} \approx 0.6 \sim 0.8V$ 。

锗材料的PN结 $U_{ho} \approx 0.1 \sim 0.3V$ 。

对称结: PN结在分界面两边的宽度相等。

非对称结: PN结在分界面两边的宽度不相等。

P区掺杂浓度高于N区时, PN结用 P^+N 表示, 在分界面的宽度:



实际使用的PN结均为非对称结。

1-1-4 PN结的伏安特点.

PN结的伏安特性: PN结两端的外加电压与流过它的电流间的关系曲线。

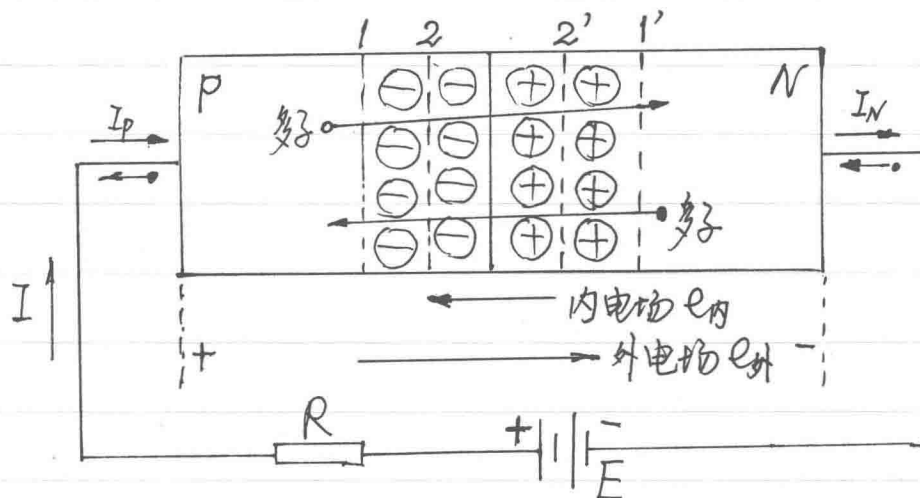
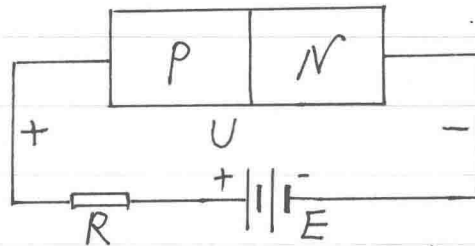
PN结具有一种特殊性能——单向导电性。

即: 加上不同极性的外电压时, 通过PN结的电流明显不同。

1. PN结的正向偏置(正偏)。

PN结加上正向电压(E): 外电源正极接P区, 负极接N区。

即: P区电势高于N区——外加正向偏置电压。



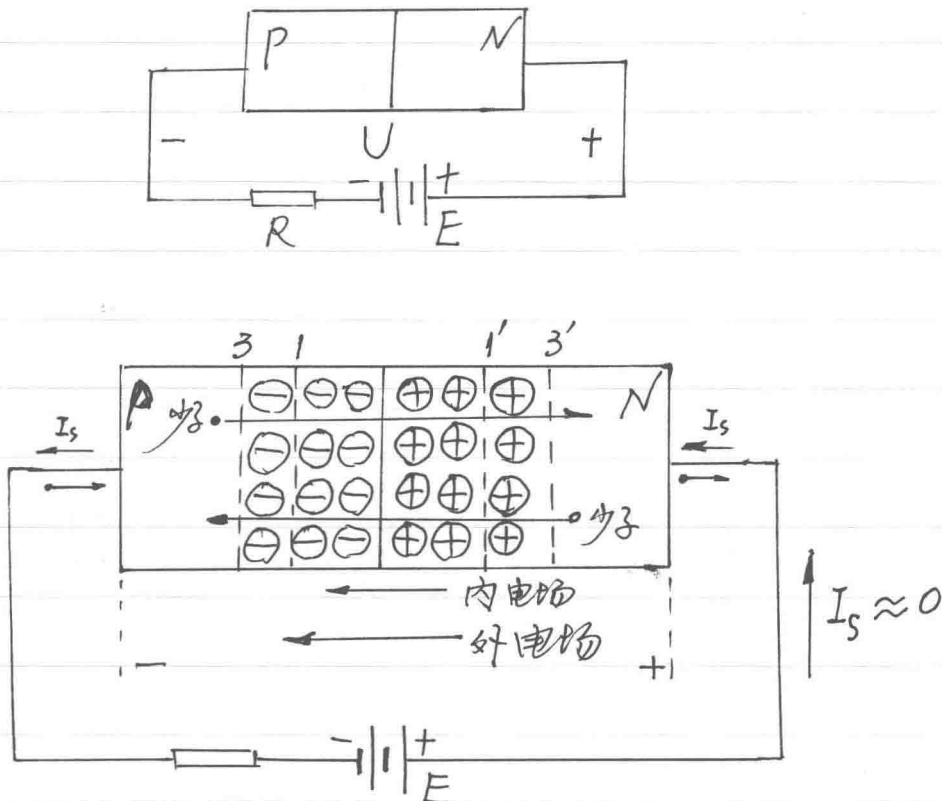
外加电场与内部电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷层变薄,由“1-1'”变到“2-2'”,多子的扩散运动得到加强,形成较大的扩散电流。至于漂移电流本来就是少子的运动,而少子的数量又很少,故对总电流的影响可以忽略。

PN结正向偏置时呈现了很小的电阻,即PN结导通,电路中形成较大的正向电流。

外电源源源不断地向半导体提供电荷,从而在外电路获得了持续不断的电流。

2. PN结的反向偏置(反偏)

PN结加反向偏置电压(E): 外电源正极接N区, 负极接P区。P区电位低于N区电位。



外加反向电压时,外加电场与内部电场方向一致,内电场增强,使空间电荷区展宽,由“1-1'”变到“3-3'”,多子的扩散运动难以进行,扩散电流大大减小,而漂移电流则基本不变,少子漂移占