



奇妙的半导体

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY

V1.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong
xyhan5151@yahoo.com.cn www.dianzichan.com



奇妙的半导体

- 一、 半导体导电与金属导电

- 1.1.原子的能级和晶体的能带
- 1.2.半导体中电子状态和能带
- 1.3.导体半导体绝缘体能带
- 1.4.本征半导体的导电机构

- 二、 p型半导体及n型半导体

- 2.1. 杂质与杂质能级
- 2.2. 施主与受主
- 2.3. 受主杂质 受主能级
- 2.4. 杂质的补偿作用
- 2.5. 缺陷与位错能级

- 三、 金属半导体接触

- 3.1.金属和半导体的功函数
- 3.2.接触电势差
- 3.3.金属半导体接触整流理论
- 3.4.欧姆接触
- 3.5.MIS结构与电容

- 四、 半导体光电磁热压性质

- 4.1.光电效应
- 4.2.热电效应
- 4.3.磁效应
- 4.4.压阻效应



一、 半导体导电与金属导电

- 1.1.原子的能级和晶体的能带
- 1.2.半导体中电子状态和能带
- 1.3.导体半导体绝缘体能带
- 1.4.本征半导体的导电机构

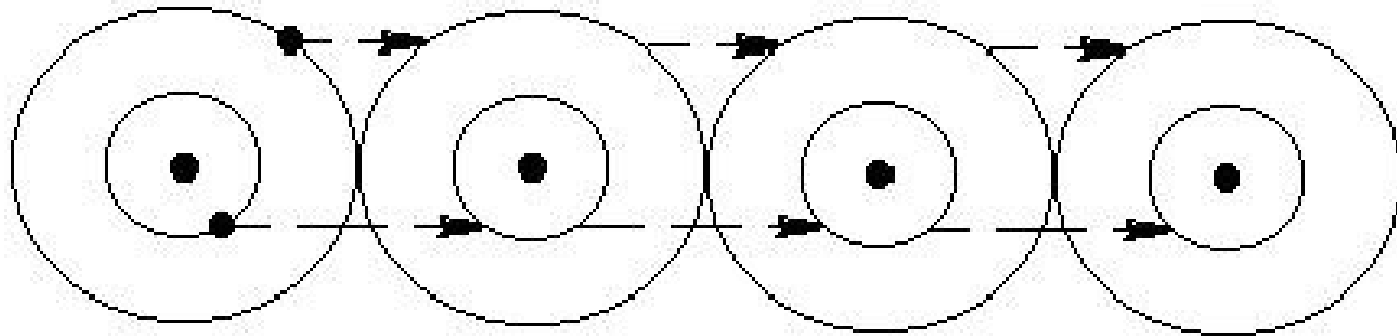


半导体导电与金属导电

- 物质按导电类型可分为导体、半导体、绝缘体。
 - 电阻率小于 $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ 的材料叫导体
 - 电阻率大于 $10^5\Omega\cdot\text{cm}$ 的叫做绝缘体
 - 电阻率在 $10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}\sim 10^5\Omega\cdot\text{cm}$ 的叫半导体
- 物质是由分子原子构成的。不同的原子相互结合，所构成的物质的特性就相差很大。
 - 氢、氧、水、“鱼虾见水为烟雾”
- 原子与原子，原子与电子，电子与电子之间的关系非常复杂。

1.1. 原子的能级和晶体的能带

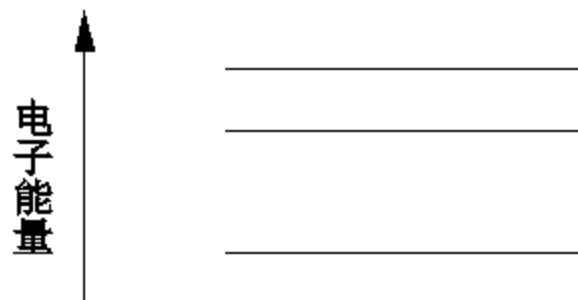
- 原子组成晶体后，由于电子壳层的交叠，电子不再完全局限在某一个原子上，可以由一个原子转移到相邻的原子上去，因而，电子将可以在整个晶体中运动。这种运动称为**电子的共有化运动**。
- 图表 1 电子共有化运动示意图



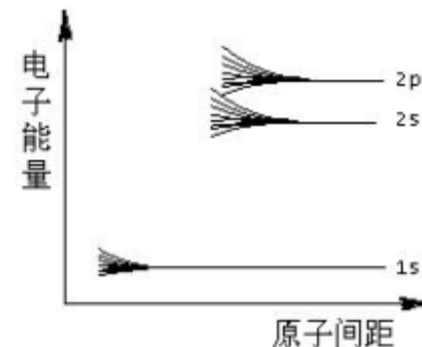
两个原子靠得越近，分裂得越厉害

- 两个原子相距很远时，如同两个孤立的原子，原子的能级如图1-2(a)所示，每个能级都有两个态与之相应。
- 当两个原子互相靠近时，每个原子的电子除受到本身原子的会场作用外，还要受到另一个原子势场的作用，其结果是每一个二度简并的能级都分裂为二个彼此相距很近的能级；
 - 两个原子靠得越近，分裂得越厉害。图1-2(b)示意地画出了八个原子互相靠近时能级分裂的情况。可以专到，每个能级都分裂为八个相距很近的能级。

图表 2 图 1-2 (a)

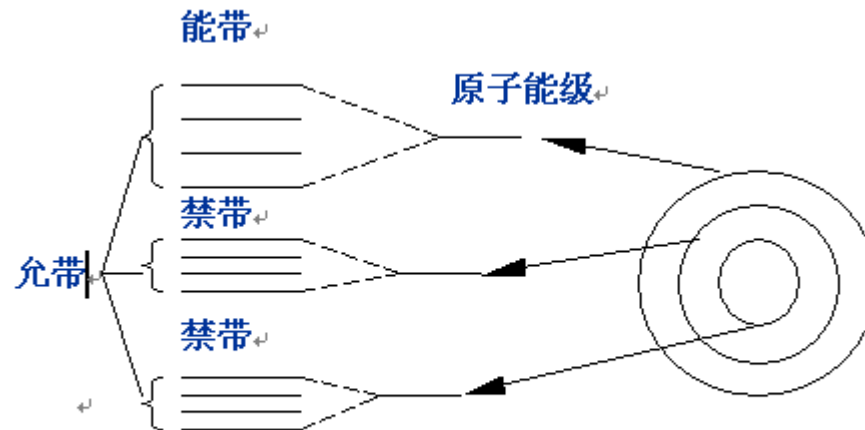


(b)



N个能级组成一个能带

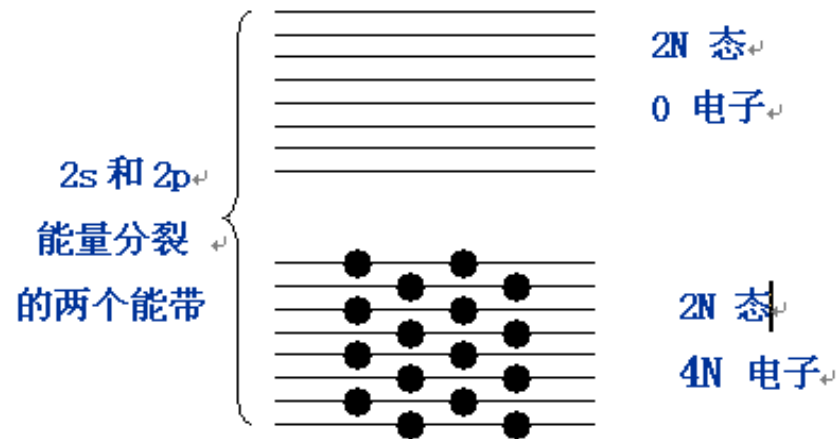
- 当N个原子互相靠近结合成晶体后，每个电子都要受那围原子势场的作用，其结果是每一个能级都分裂成N个彼此相距很近的能级，这N个能级组成一个**能带**。
- 这时电子不再属于某一个原子而是在晶体中作**共有化运动**。分裂的每一个能带都称为**允带**，允带之间没有能级称为**禁带**。图表3示意地画出了原子能级分裂为能带的情况



图表 3 原子能级分裂为能带的示意图

满带 价带 导带 禁带

- 根据电子先填充低能级的原理，下面一个能带填满了电子，它们相应于共价键中的电子，这个带通常称为满带或价带；上面一个能带是空的，没有电子，通常称为导带；中间隔以禁带。



为什么云也是分层分布？

图表 4 金刚石型结构价电子能带示意图



1.2. 半导体中电子的状态和能带

- 晶体中的电子与孤立原子中的电子不同，也和自由运动的电子不同。
 - 孤立原子中的电子是在该原子的核和其它电子的势场中运动，
 - 自由电子是在一恒定为零的势场中运动，
 - 而晶体中的电子是在严格周期性重复排列的原子间运动。
- 单电子近似认为，晶体中的某一个电子是在周期性排列且固定不动的原子核的势场以及其它大量电子的平均势场中运动。
 - 研究发现，电子在周期性势场中运动的基本特点和自由电子的运动十分相似。
 - 对于自由电子，在空间各点波函数的强度相等，故在空间各点找到电子的几率相同，这反映了电子在空间中的自由运动。
 - 而对于晶体中的电子，波函数的强度也随晶格周期性变化，所以在晶体中各点找到该电子的几率也具有周期性变化性质。
 - 组成晶体的原子的外层电子共有化运动较强，其行为与自由电子相似，常称为**准自由电子**。而内层电子的共有化运动较弱，其行为与孤立原子中的电子相似。晶体中的电子能量出现不连续，形成一系列允带和禁带。



大象有诗赞曰：

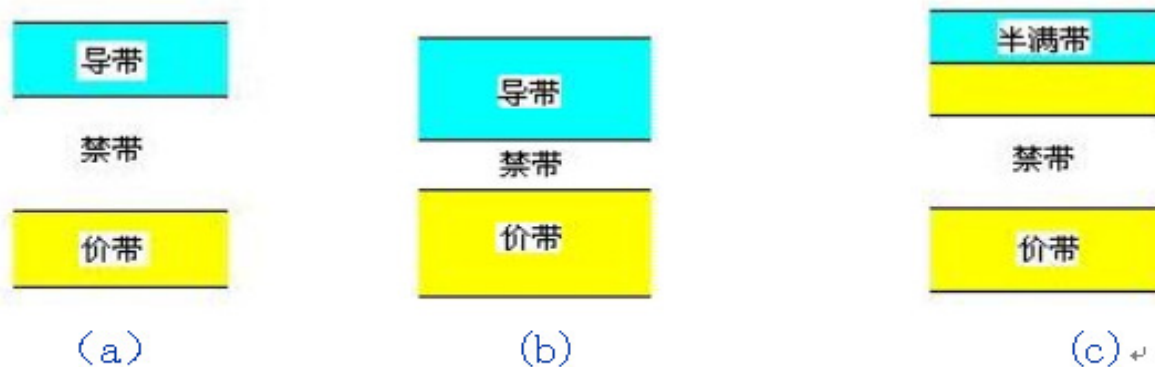
核外电子功劳大
物质稳定得靠它
若不绕核自古转
也无地球众生家

共价电子也不差
世界多样全凭它
献得一点微薄力
率众穷尽诸变化

自由电子最须赞
舍弃私核为众转
徜徉电器人脑中
遍传信息在世间

1.3. 导体、半导体、绝缘体的能带

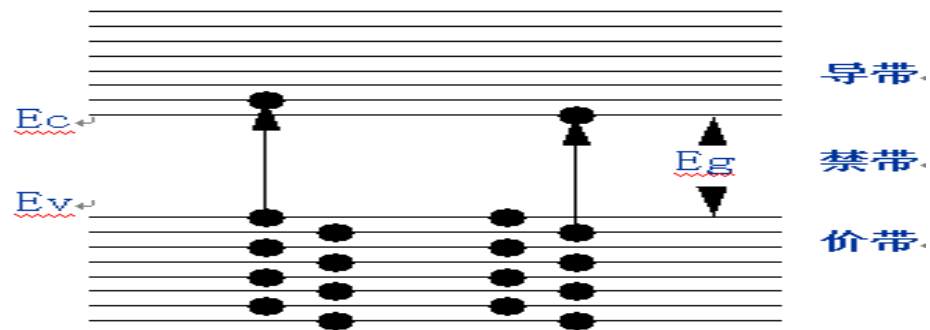
- 固体按其导电性分为导体、半导体、绝缘体的机理，可以根据电子填充能带的情况来说明。
 - 对于被电子部分占满的能带，在外电场的作用下，电子可以从外电场吸收能量跃迁到未被电子占据的能级去，形成电流，起导电作用，常称这种能带为“导带”，金属中由于组成金属的原子中的价电子占据的能带是部分占满的，如图表5(c)所示，所以金属是良好的导体。
 - 绝缘体和半导体的能带类似，如图表5(a)、(b)所示。即下面是已被价电子占满的满带(其下面还有为内层电子占满的若干满带未画出)，亦称价带，中间为禁带，上面是空带。因此，在外电场作用下并不导电，但是，这只是绝对温度为零时的情况。



图表 5 绝缘体、半导体和导体的能带示意图

一定温度下半导体的能带图

本征激发：价带电子激发成为准自由电子，也就是价带电子激发成为导带电子的过程。



图表 6 一定温度下半导体的能带图



电子与空穴

- 当外界条件发生变化时，例如温度升高或光照时，满带的少量电子可能被激发到上面的空带上去，使能带底部附近有了少量电子，因而在外电场作用下，这些电子将参与导电；
- 同时，满带中由于少了一些电子，在满带顶部附近出现了一些空的量子状态，满带变成了部分占满的能带，在外电场的作用下，仍留在满带中的电子也能够起导电作用，满带电子的这种导电作用等效于把这些空的量子状态看作带正电荷的准粒子的导电作用，常称这些空的量子状态为**空穴**。
- 空穴——由于电子运动而产生的相对效果，并没有真的空穴

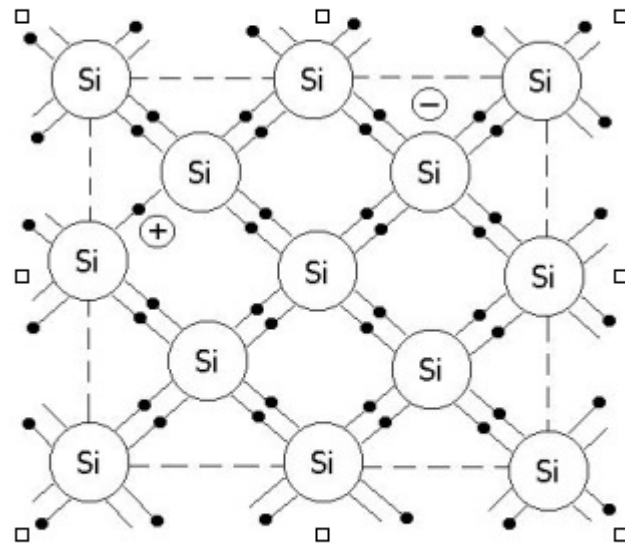


半导体与金属导体最大差别

- 在半导体中，导带的电子和价带的空穴均参与导电，这是半导体与金属导体最大差别。
- 绝缘体的禁带宽度很大，激发电子需要很大能量，在通常温度下，能激发到导带去的电子很少，所以导电性很差。
- 半导体禁带宽度比较小，数量级在1eV左右，在通常温度下已有不少电子被激发到导带中去，所以具有一定的导电能力，这是绝缘体和半导体的主要区别。
- 室温下，金刚石的禁带宽度为6—7eV，它是绝缘体；硅为1.12eV，锗为0.67eV，砷化镓为1.43eV，所以它们都是半导体。

1.4 本征半导体的导电机构

- 图7为硅共价键平面示意图。假定价带中激发一个电子到导带，价带顶出现了一个空状态，这相当于共价键上缺少一个电子而出现了个空位置，在晶格间隙出现一个导电电子。



图表 7 空穴和导电电子



半导体表现出许多奇异的特性

- 半导体中除了导带电子导电而外，价带中还有空穴参与导电。
- 对于本征半导体，导带中出现多少电子，价带就出现多少空穴，导带上电子参与导电，价带上空穴也参与导电，这就是本征半导体的导电机构。这一点是**金属导电和半导体导电的最大差异**，金属中只有电子一种荷载电流的粒子(称为载流子)，而半导体中有电子和空穴两种载流子。
- 正是由于这两种载流子的作用，使半导体表现出许多奇异的特性，可用来制造形形色色的器件。



二、p型半导体及n型半导体

- 2.1. 杂质与杂质能级
- 2.2. 施主与受主
- 2.3. 受主杂质 受主能级
- 2.4. 杂质的补偿作用
- 2.5. 缺陷与位错能级

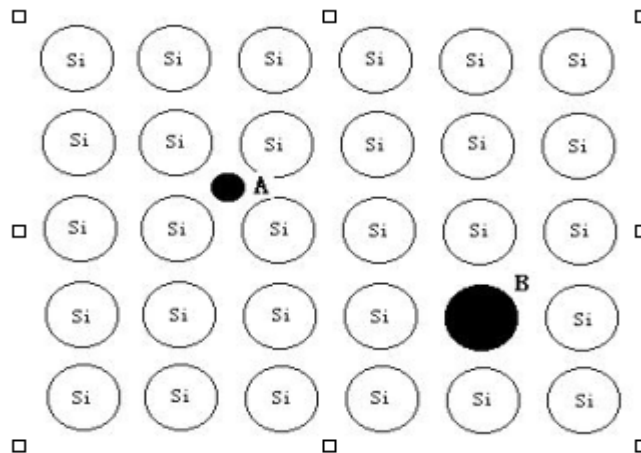


p型半导体及n型半导体

- 实际的晶体与前面分析的理想情有所偏离。
 - 首先原子并不是静止在具有严格周期性的晶格的格点位置上，而是在其平衡位置附近振动；
 - 其次，半导体材料并不是纯净的，而是含有若干杂质，即在半导体晶格中存在着与组成半导体元素不同的其它化学元素的原子；
 - 第三，实际的半导体晶格结构并不是完整无缺陷的，而是存在各种形式的缺陷。这就是说，在半导体中的某些区域，晶格中的原子周期性排列被破坏，形成了各种缺陷。
- 一般地将缺陷分为三类：
 - 点缺陷，如空位，间隙原子；
 - 线缺陷，如位错；
 - 面缺陷，如层错，多晶体中的晶粒间界等。
- 实践表明，极微量的杂质和缺陷，能够对半导体材料的物理性质和化学性质产生决定性的影响，当然也严重影响着半导体器件的质量。
 - 例如，在硅晶体中，若以 10^5 个硅原子中参入一个杂质原子的比例掺入硼原子，则纯硅晶体的电导率在室温下将增加 10^3 倍

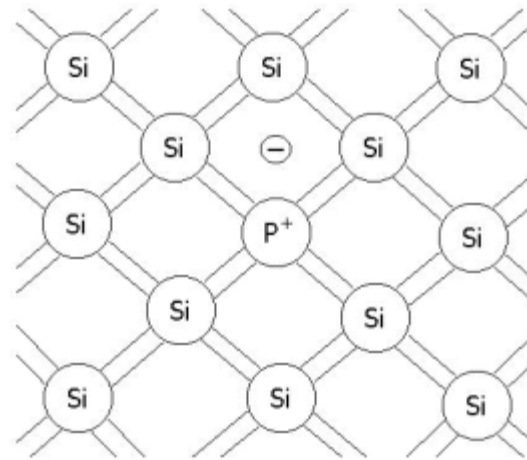
2.1. 杂质与杂质能级

- 杂质原子进入半导体硅以后。只可能以两种方式存在。
 - 一种方式是杂质原子位于晶格原子的间隙位置，常称为间隙式杂质；
 - 另一种是杂质原子取代晶格原子而位于晶格处，称为替位式杂质。
- 图表8是间隙式杂质和替位式杂质的示意图。图中A为间隙式杂质，B为替位式杂质。如硅锗是IV族元素，与III、V族元素的情况比较接近，所以III、V族元素在硅锗晶体中都是替位式杂质。



2.2. 施主与受主

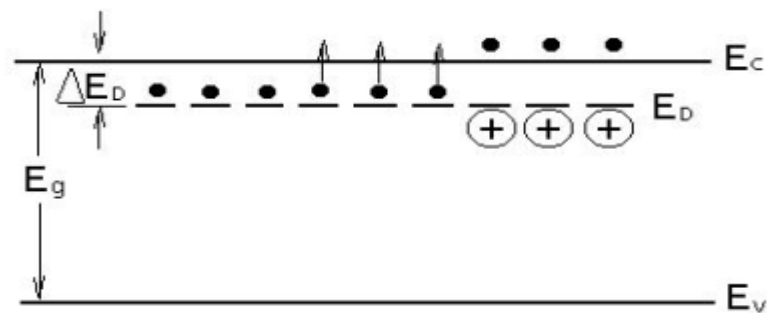
- 如图9所示，一个磷原子占据了硅原子的位置。磷原子有五个价电子，其中四个价电子与周围的四个硅原子形成共价键，还剩余一个价电子。



图表 9 硅中的施主杂质

施主电离

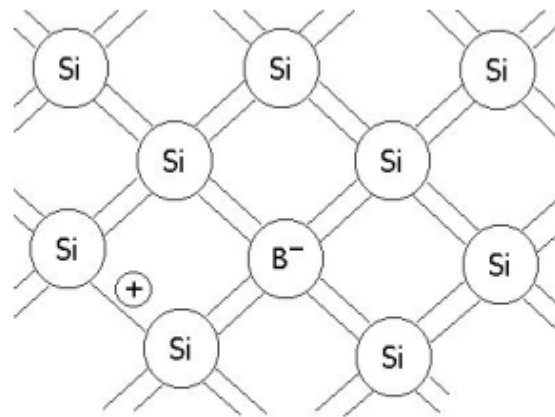
- 在纯净半导体中掺入施主杂质，杂质电离以后，导带中的导电电子增多，增强了半导体的导电能力。通常把主要依靠导带电子导电的半导体称为电子型或**n型半导体**。
- v族杂质在硅锗中电离时，能够施放电子而产生导电电子并形成正电中心，称它们为施主杂质或n型杂质。它释放电子的过程叫做**施主电离**。施主杂质未电离时是中性的，称为束缚态或中性态，电离后成为正电中心，称为离化态。



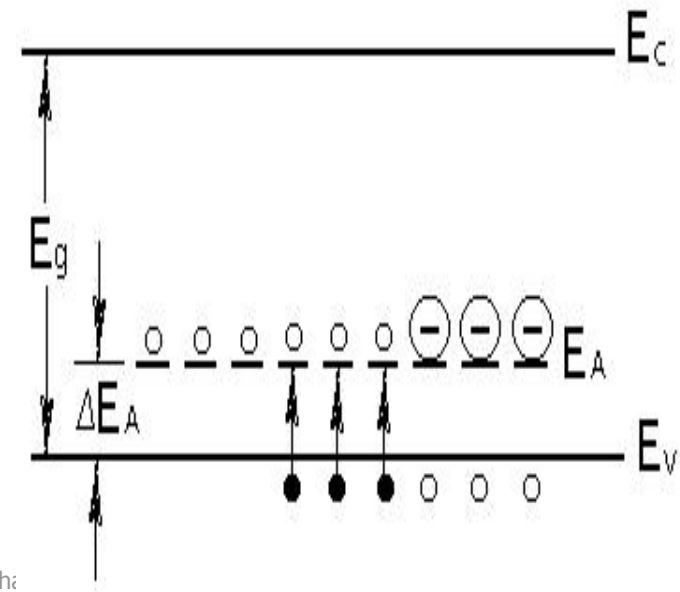
图表 10 施主能级和施主电离

2.3. 受主杂质 受主能级

- 现在以硅晶体中掺入硼为例说明III族杂质的作用。硼原子占据了硅原子的位置。硼原子有三个价电子，当它和周围的四个硅原子形成共价键时，还缺少一个电子，必须从别处的硅原子中夺取一个价电子，于是在硅晶体的共价键中产生了一个空穴。通常把主要依靠导电空穴导电的半导体称为**p型半导体**
- 而硼原子接受一个电子后，成为带负电的硼离子称为负电中心。



图表 11 硅中的受主杂质



2.4. 杂质的补偿作用

- 假如在半导体中，同时存在着施主和受主杂质，半导体究竟是n型还是p型呢？
 - 这要看那一种杂质浓度大，因为施主和受主之间有互相抵消的作用，通常称为**杂质的补偿作用**。

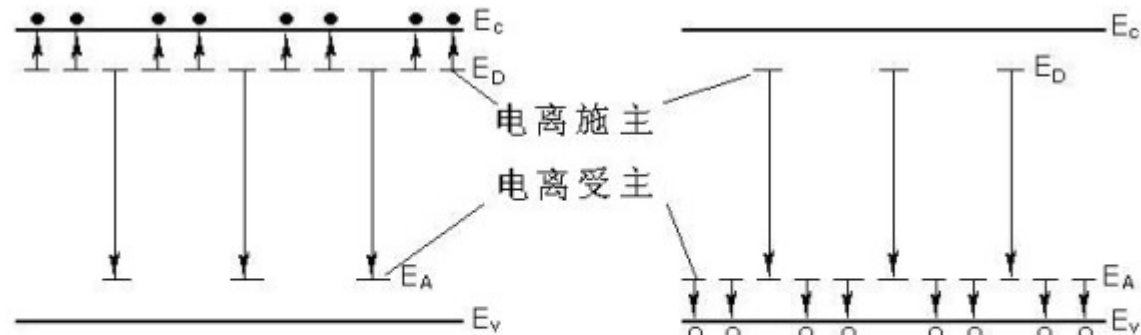


图 13 杂质的补偿作用



杂质的高度补偿

- 利用杂质补偿作用，就能根据需要用扩散或离子注入方法来改变半导体中某一区域的导电类型，以制成各种器件。
- 若控制不当，会出现 $N_D \approx N_A$ 的现象，这时，施主电子刚好够填充受主能级，虽然杂质很多，但不能向导带和价带提供电子和空穴，这种现象称为**杂质的高度补偿**。
 - 这种材料容易被误认为高纯半导体，实际上含杂质很多，性能很差，一般不能用来制造半导体器件。



2.5. 缺陷与位错

■ 1. 点缺陷

- 在一定温度下，晶格原子不仅在平衡位置附近作振动运动，而且有一部分原子会获得足够的能量，克服周围原子对它的束缚，挤入晶格原子间的间隙，形成间隙原子，原来的位置便成为空位。这时间隙原子和空位是成对出现的，称为**弗仑克耳缺陷**。若只在晶体内形成空位而无间隙原子时，称为**肖特基缺陷**。

■ 2. 位错

- 位错是半导体中的一种缺陷，它对半导体材料和器件的性能会产生严重影响。但是，目前仅仅对具有金刚石型结构的硅、锗中的位错了解得稍多一些，对于其它半导体中的位错了解很少，甚至还没有了解。

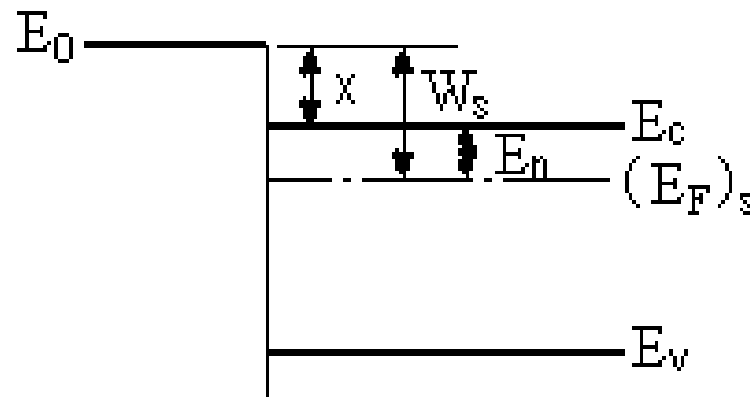


三、金属半导体接触

- 3.1. 金属和半导体的功函数
- 3.2. 接触电势差
- 3.3. 金属半导体接触整流理论
- 3.4. 欧姆接触
- 3.5. MIS结构与电容

3.1. 金属和半导体的功函数

- 在绝对零度时，金属中的电子填满了**费米能级** E_F 以下的所有能级，而高于 E_F 的能级则全部是空着的。
- 金属中的电子虽然能在金属中自由运动，要使电子从金属中逸出，必须由外界给它以足够的能量 W_s 。

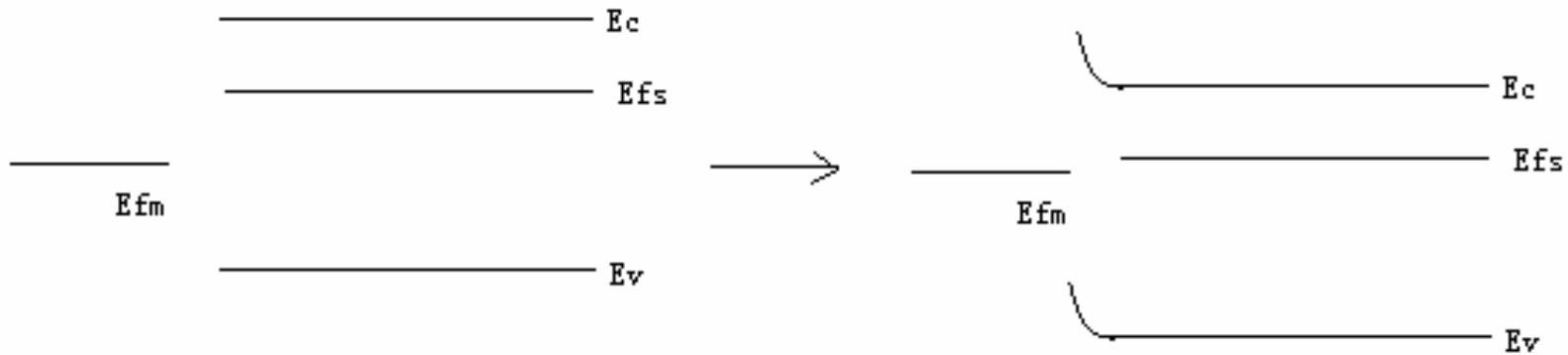


费米能级标志了电子填充能级的水平；如水平面

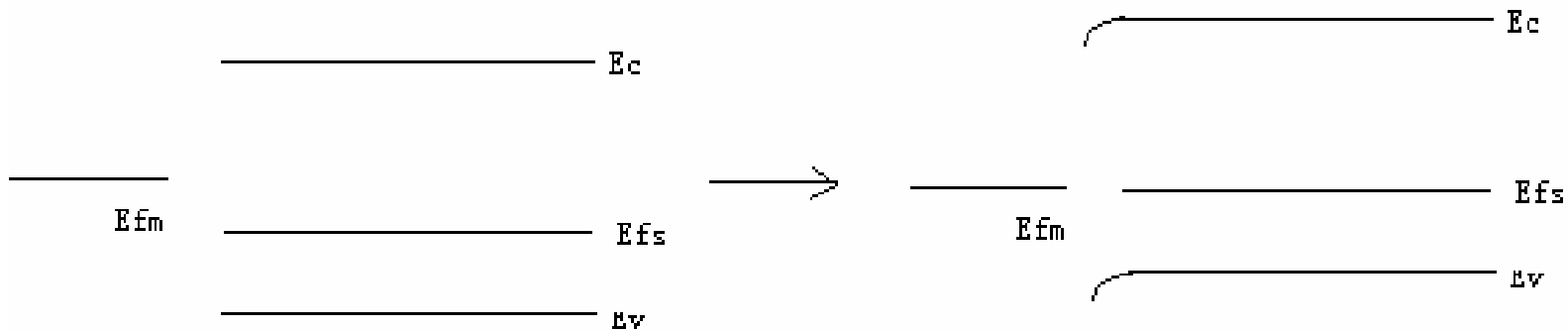
3.2. 接触电势差

- 当金属与n型半导体接触时，若 $W_m > W_s$ ，则在半导体表面形成一个正的空间电荷区，其中电场方向由体内指向表面， $V_s < 0$ ，它使半导体表面电子的能量高于体内，能带向上弯曲，即形成表面势垒。在势垒区中，空间电荷主要由电离施主形成，电子浓度要比体内小得多，因此它是一个高阻的区域，常称为**阻挡层**。
- 若 $W_m < W_s$ ，则金属与n型半导体接触时，电子将从金属流向半导体，在半导体表面形成负的空间电荷区。其中电场方向由表面指向体内， $V_s > 0$ ，能带向下弯曲。这里电子浓度比体内大得多，因而是一个高电导的区域，称之为**反阻挡层**。
 - 反阻挡层是很薄的高电导层，它对半导体和金属接触电阻的影响是很小的。所以，反阻挡层与阻挡层不同，在平常的实验中觉察不到它的存在。
- 金属和p型半导体接触时，形成阻挡层的条件正好与n型的相反。当 $W_m > W_s$ 时，能带向上弯曲，形成p型反阻挡层；当 $W_m < W_s$ 时，能带向下弯曲，造成空穴的势垒，形成p型阻挡层。

金半接触，能带弯曲



$W_m > W_s$ 金属与n型半导体接触能带向上弯曲



$W_m < W_s$ 金属与P型半导体接触能带向下弯曲



3.3. 金属半导体接触整流理论

- 在紧密接触的金属和半导体之间加上电压时，阻挡层将发生什么变化？例如，外加电压 V 于金属，由于阻挡层是一个高阻区域，因此电压主要降落在阻挡层上。
- 显然， V 与原来表面势符号相同时，阻挡层势垒将提高，否则势垒将下降。

所谓整流，就是讲双向的电流方向整理为单向电流，如二极管。

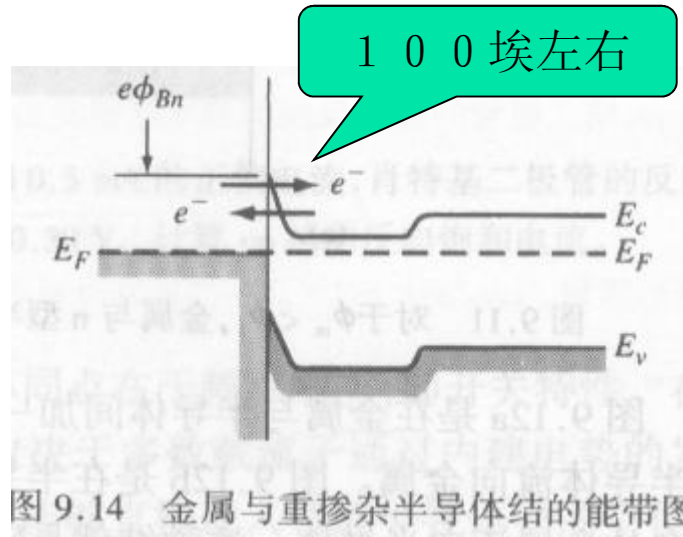


3.4. 欧姆接触

- **欧姆接触**：不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子浓度发生显著的改变。
- 制作欧姆接触最常用的方法是用**重掺杂的半导体与金属接触**（隧道效应）

欧姆接触

- 隧道效应



隧道电流有如下形式：

$$J_t \propto \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{E_{oo}}\right)$$

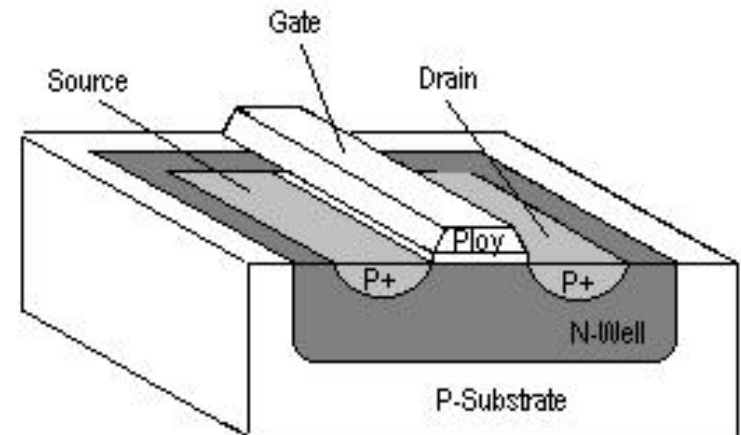
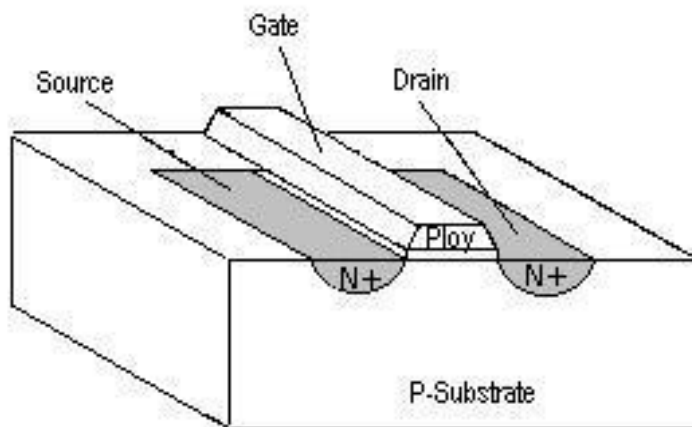
其中，

$$E_{oo} = \frac{e\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{\epsilon_s m_n^*}}$$

隧道电流随着掺杂浓度的增加而指数增大。

3.5. MIS结构与电容

- MIS (指金属—绝缘层—半导体) 结构
- CMOS结构





想想

- 半导体为什么适合做集成电路？
- 绝缘体为什么不能做集成电路？（高压）
- 导体为什么不能做集成电路？（绝对0度）
- 灯丝发光，铜线发不发光？人发不发光？
- 导体、半导体、绝缘体各自的用处？



四、半导体光电磁热压性质

- **4.1.光电效应**
- **4.2.热电效应**
- **4.3.磁效应**
- **4.4.压阻效应**



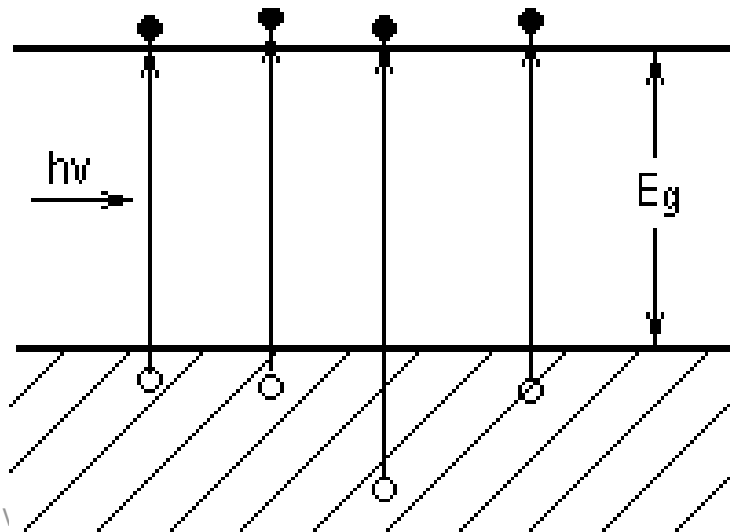
4.1. 光电效应

为什么？因为有好多“不稳定分子”等待着乱跑

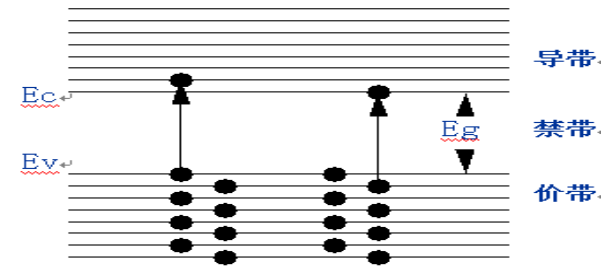
- 当光在半导体中传播时，半导体能强烈的吸收光能。
 - 大量实验证明，价带电子跃迁是半导体研究中最重要吸收过程。当一定波长的光照射半导体材料时，电子吸收足够的能量，从价带跃迁入导带。电子从低能带跃迁到高能带的吸收，相当于原子中的电子从能量较低的能级跃迁到能量较高能级的吸收。
- 原子中的能级是不连续的，两能级间的能量差是定值，因而电子的跃迁只能吸收一定能量的光子，出现的是吸收线；
- 而在晶体中，与原子能级相当的是一个由很多能级组成，实际上是连续的能带，因而光吸收也就表现为连续的吸收带。

本征吸收

- 理想半导体在绝对零度时，价带是完全被电子占满的，因此价带内的电子不可能被激发到更高的能级。唯一可能的吸收是足够能量的光子使电子激发，越过禁带跃迁入空的导带，而在价带中留下一个空穴，形成电子—空穴对。这种由于电子由带与带之间的跃迁所形成的吸收过程称为**本征吸收**。
- 直接跃迁和间接跃迁：直接跃迁是只考虑电子与电磁波的作用，间接跃迁还考虑了电子与晶格的作用。

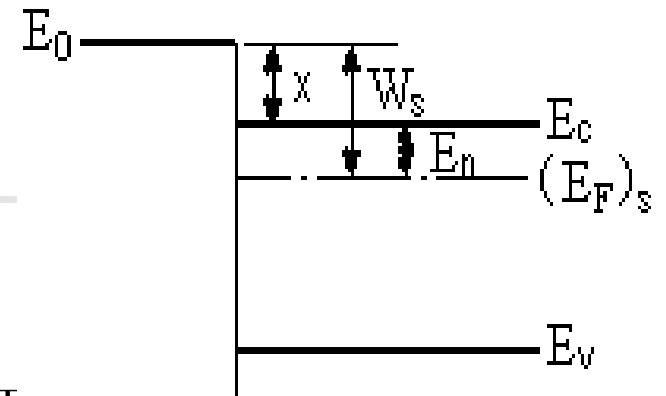


光电效应



- **光电导**——光吸收使半导体中形成了非平衡载流子，使得电导率增大。有光照引起电导率增大的现象叫光电导。
- **光电池**——用适当波长的光照射半导体PN结，半导体内部会产生大量的电子空穴对，在PN结内建电场的作用下，出现电动势。如果将PN结短路，则出现电流。
- **半导体发光**——半导体中处于激发态的电子也可以回到低能级，同时释放能量（光子）。
- **激光** ——与一般半导体发光过程相似，只是经过共振腔筛选，将一定频率的光留下来，然后再发射出去。
 - 必须满足三个条件：分布反转，使受激辐射占优势；具有共振腔，使光量子放大；达到阈值电流密度，使增益大于或等于损耗。

4.2. 热电效应



温差电动势

- 当两个不同的导体两端相连，如果两个接头处有不同的温度，线路中就会有电流——**塞贝克效应**（热电偶）
 - 用半导体的塞贝克效应可以制成温差发电机。
- 当两个不同的导体两端相连通电，两个接头处便有吸热和放热现象——**帕耳帖效应**
 - 同样可以利用外电源产生电流，作成制冷器；



4.3. 磁效应

- 电流在磁场作用下有许多效应：偏转，磁阻，磁光，热磁等等
- 以前学过的直流交流电在磁场中的各种力及现象，在半导体中变的更加复杂和有趣



4.4. 压阻效应

- 对半导体施加应力时，半导体的电阻率发生变化——压阻效应。（压力传感器）
- 声波对半导体也有许多有趣的效应：
 - 声电效应（沿声波方向产生直流电场）；
 - 声磁电效应等



本节内容参考《半导体物理》