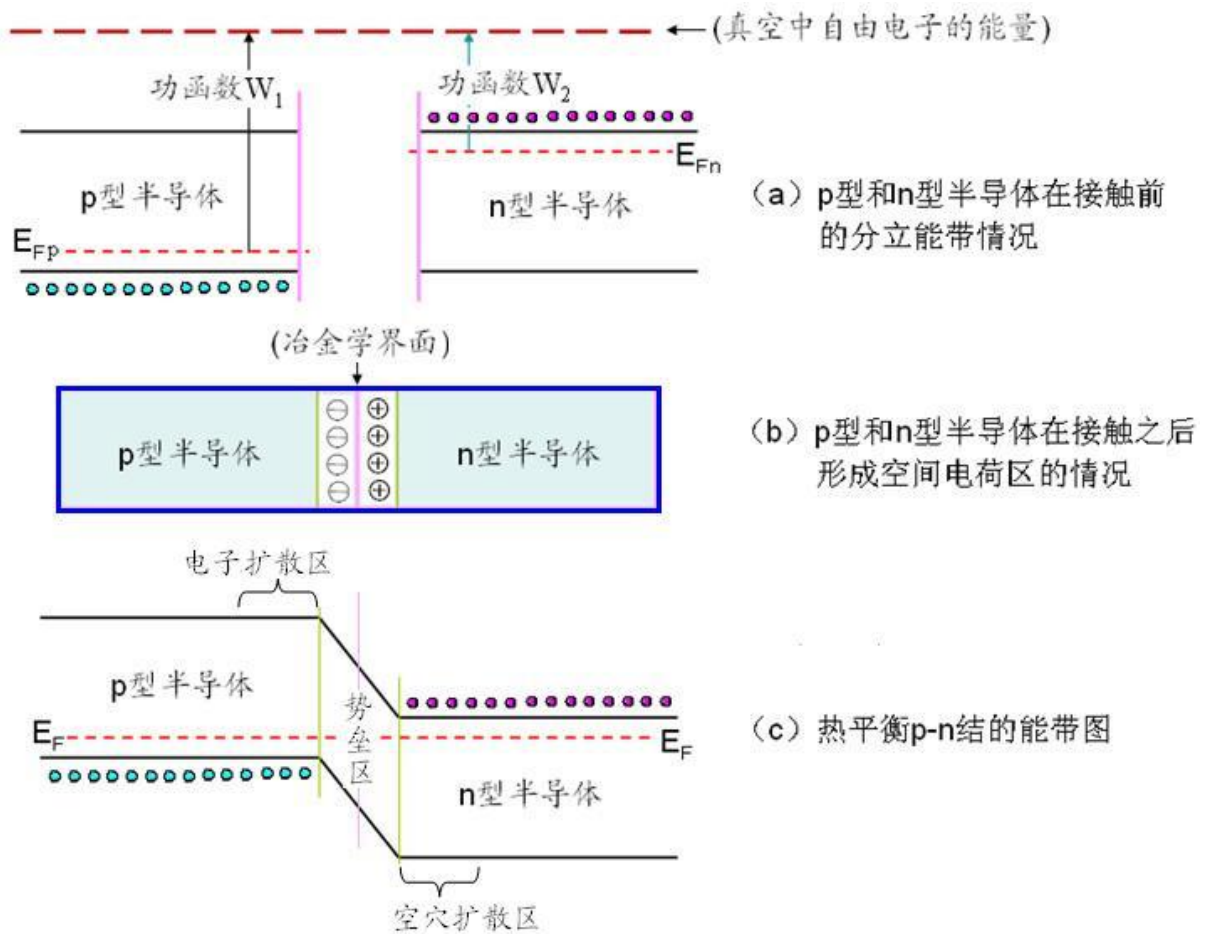


PN 结原理: P-N 结的形成和能带

电子科技大学 微电子与固体电子学院 谢孟贤 教授 博导

p-n 结基本概念是解决许多微电子和光电子器件的物理基础。对于许多半导体器件问题的理解不够深透，归根到底还在于对于 p-n 结概念的认识尚有模糊之处的缘故。

因为 p-n 结的一个重要特点就是其中存在有电场很强的空间电荷区，故 p-n 结的形成机理，关键也就在于空间电荷区的形成问题；p-n 结的能带也就反映了空间电荷区中电场的作用。



载流子的转移:

p 型半导体和 n 型半导体在此需要考虑的两个不同点即为(见图(a)):

①功函数 W 不同; ②主要(多数)载流子种类不同。因此, 当 p 型半导体和 n 型半导体紧密结合而成的一个体系——p-n 结时, 为了达到热平衡状态(即无能量转移的动态平衡状态), 就会出现载流子的转移: 电子从功函数小的半导体发射到功函数大的半导体去, 或者载流子从浓度大的一边扩散到浓度小的一边去。对于同质结而言, 载流子的转移机理主要是浓度梯度所引起的扩散; 对于异质结(例如 Si-Ge 异质结, 金属-半导体接触)而言, 载流子的转移机理则主要是功函数不同所引起的热发射。

空间电荷和内建电场的产生:

现在考虑同质 p-n 结的形成: 在 p 型半导体与 n 型半导体的接触边缘附近处(即冶金学界面附近处), 当有空穴从 p 型半导体扩散到 n 型半导体一边去了之后, 就在 n 型半导体中增加了正电荷, 同时在 p 型半导体中减少了正电荷, 从而也就在 p 型半导体中留下了不能移动的电离受主中心——负离子中心; 与此同时, 当有电子从 n 型半导体扩散到 p 型半导体一边去了之后, 就在 p 型半导体中增加了负电荷, 同时在 n 型半导体中减少了负电荷, 从而也就在 n 型半导体中留下了不能移动的电离施主中心——正离子中心。这就意味着, 在 p 型半导体一边多出了负电荷(由电离受主中心和电子所提供), 在 n 型半导体一边多出了正电荷(由电离施主中心和空穴所提供), 这些由电离杂质中心和载流子所提供的多余电荷即称为空间电荷, 它们都局限于接触边缘附近处, 以电偶极层的形式存在, 如图(b)所示。

由于在两种半导体接触边缘的附近处存在着正、负空间电荷分列两边的偶极层，所以就产生出一个从 n 型半导体指向 p 型半导体的电场——内建电场。在此，内建电场仅局限于空间电荷区范围以内，在空间电荷区以外都是不存在电场的电中性区。

p-n 结的势垒和能带：

因为在 p-n 结界面附近处存在着内建电场，而该内建电场的方向正好是阻挡着空穴进一步从 p 型半导体扩散到 n 型半导体去，同时也阻挡着电子从 n 型半导体进一步扩散到 p 型半导体去。于是从能量上来看，由于空间电荷-内建电场的出现，就使得电子在 p 型半导体一边的能量提高了，同时空穴在 n 型半导体一边的能量也提高了；而在界面附近处产生出了一个阻挡载流子进一步扩散的势垒——p-n 结势垒。根据内建电场所引起的这种能量变化关系，即可画出 p-n 结的能带图，如图(c)所示。在达到热平衡之后，两边的 Fermi 能级 (E_F) 是拉平（统一）的。能带的倾斜就表示着电场的存在。

①势垒高度：

实际上，在 p-n 结界面处的内建电场就使得 p 型半导体与 n 型半导体之间产生了电位差——内建电势差（或内建电压）。电场越强，内建电势差就越大。此内建电势差所对应的能量差（能量差=电势差×电子电荷），即为 p-n 结的势垒高度。虽然势垒高度并不直接反映的内建电场的大小，因为内建电场在势垒区中的分布可能不一定均匀（决定于空间电荷密度的分布），然而内建电场分布曲线下面的面积却总是一定的（即内建电压不变）。所以，电场越强，势垒高度也就越大。

注意：a)从热平衡时 p-n 结能带图的形成来看(比较图(a)和图 (c)), 势垒高度实际上也就等于两边半导体在接触之前的 Fermi 能级之差, 即: 势垒高度= $E_{Fn} - E_{Fp}$ 。 b) 内建电势差是 p-n 结为了达到热平衡、而在内部自动产生出来的一个电势差, 只是局限于 p-n 结界面附近; 该电势差在外面不可能表现出来, 因为这时 p-n 结体系是处于热平衡状态, 不可能对外做功。

因为 p-n 结中内建电势差的存在, 就使得电子在 p 型半导体一边的势能要高于 n 型半导体一边, 空穴的势能恰恰相反。而电子的势能可看成是导带底能量, 空穴的势能可看成是价带顶能量, 所以 p-n 结两边的整个能带的高低, 就相差一个与此内建电势差相对应的势能差——p-n 结的势垒高度。由于电场等于势能梯度, 因此能带在势垒区中是倾斜的, 在以外是水平的, 如图(c)所示。

②势垒厚度:

存在内建电场的区域就是势垒区, 势垒区的厚度(或宽度)与半导体的掺杂浓度等因素有关。可以想见, 在掺杂浓度一定(即空间电荷密度一定)的条件下, 内建电场越强、势垒高度越大, 势垒厚度也就将越大; 但势垒厚度与势垒高度之间不是简单的线性关系, 这决定于掺杂浓度的分布形式(突变结近似为平方根关系, 缓变结近似为立方根关系)。

p-n 结的基本特点

①在单独的 n 型半导体或者 p 型半导体中, 电子的势能都是一样的(可以认为都是导带底能量), 空穴亦然(价带顶能量); 但是在热平衡

的 p-n 结中，因为 n 型和 p 型这两边之间存在着内建电势差，则电子在 n 型半导体中和在 p 型半导体中的势能就不一样了，所以导带底以及价带顶在两边的高低也就有所不同了（即 p 型半导体一边的整个能带都要高于 n 型半导体一边的整个能带）。

②对于一般的 p-n 结，它的势垒区与空间电荷区是重合的（但是，pin 结的势垒区要比空间电荷区宽得多），因此只有在 p-n 结势垒区中才存在着内建电场，在势垒区以外是电中性区。从而，p-n 结势垒区中的能带是倾斜的，载流子在势垒区以内的运动主要靠漂移；但在势垒区以外的能带是水平的，载流子的运动主要靠扩散。对于势垒区以外、两边的电中性区，其中一个扩散长度大小的范围特称为扩散区，因为这是少数载流子能够扩散到势垒区边缘的一个有效范围，在此范围以外的电中性区中的少数载流子就难以扩散到势垒区。

③因为势垒区是在冶金学界面附近处的一个区域，其厚度一般较薄，所以势垒区中的内建电场通常都较强；而内建电场起着把导带电子驱赶到 n 型半导体、把价带空穴驱赶到 p 型半导体中去的作用，于是势垒区中留下的载流子数目往往很少。从而，在一定的近似程度上，就可以认为势垒区中的载流子完全被驱赶出去了——载流子被耗尽了，即认为势垒区为一个耗尽层。在耗尽层近似下，p-n 结中的空间电荷就完全看成是由电离杂质中心所提供的。