**第六章 pn结与金属-半导体接触**

当我们在pn结的两边外加一个电压时，此时整个pn 结就不再处于热平衡状态，因此整个pn结系统中也 就不再具有统一的费米能级

pn结是半导体器件中最基本的单元

多数半导体器件中至少包含一个pn结

pn结形成方法：在一块n型（或p型）半导体单晶衬底上用扩散、外延或离子注入等方法掺入p型（或n型）杂质。从原理上说，pn结就是由一个n型掺杂区与一个p型掺杂区紧密接触构成的，其接触界面称为冶金结界面（冶金结净掺杂浓度为0处）

设p型区掺杂浓度为，n型区掺杂浓度为

当形成pn结时，冶金结两侧出现载流子浓度差，形成可动载流子的扩散流：电子由n型区向p型区扩散，空穴由p型区向n型区扩散

pn结空间电荷区的形成：由于pn结两侧存在电子和空穴的浓度梯度，电子和空穴互相扩散，同时在n型区留下带正电荷的施主离子，在p型区留下带负点的受主离子，这样就形成了空间电荷区，空间电荷区中将形成内建电场，内建电场引起载流子的漂移运动，载流子的漂移运动与载流子的扩散运动方向相反，最后二者达到平衡

有空间电荷区中可动载流子基本处于耗尽状态，所以也称作耗尽区

零偏状态下的pn结：

内建电势

在达到平衡状态的pn结空间电荷区中存在一个内建电场，进行积分后可以得到内建电势差

达到平衡状态的pn结能带具有统一的费米能级，这样可以得到内建势垒高度为，其中为电子准费米势，为空穴的准费米势

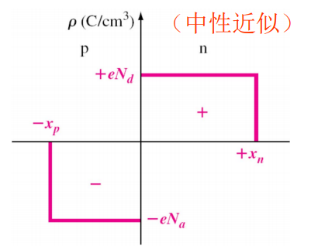
远离空间电荷区的n型区中，电子浓度为

定义其电子准费米势为，那么上述电子浓度变为，由此可以得到电子的准费米势为：

类似地，在远离空间电荷区的p型区中，空穴准费米势为，

因此内建电势为

内建电场：考虑均匀掺杂的突变结，假设空间电荷在空间电荷区的边界区间突然下降为零（耗尽近似），那么半导体内的电场由一维泊松方程确定：



耗尽近似是内建电场只存在于空间电荷区，空间电荷区没有自由载流子，内建电场完全由掺杂离子引起

中性近似是指在耗尽区以外保持电中性，多子浓度等于电离杂质浓度，这部分区域称为“中性区”

考虑的p型区一侧，对泊松方程进行积分，得到p型区一侧电场强度表达式为：，再由边界条件，得到

同样考虑的n型区一侧，对泊松方程进行积分，得到：

同时由x=0处电场连续，得到，表明

这样有在pn结界面处电场达到最大，

由电场分布积分可以得到p型区空间电势分布为：；相应地，n型区空间电势分布为

由此可得pn结内建电势为，电子势能可以表示为

热平衡状态下的pn结能带图：

具有统一的费米能级

能带弯曲等于势垒高度

漂移电流与扩散电流相互抵消

空间电荷区宽度：，

总电荷区空间长度为：

反偏状态下的pn结：

在pn结两端外加一个电压时，此时整个pn结不再处于热平衡状态，整个pn结系统也不再具有统一的费米能级

当在pn结的n型区加上相对于p型区的正电压时，使得n型区费米能级下拉，被称为反向偏置电压，此时pn结上总势垒高度为

党加入反向偏压时，多数载流子被外加电压从空间电荷区边缘拉出，使得空间电荷区变宽，pn结内部空间电荷区中电场增强，此时只有极小的电流通过。前面推导出的空间电荷区宽度公式，只要将替换为就是外加偏压下的空间电荷区宽度，而pn结耗尽区的电场仍然由原式子决定，只是随外加电压发生变化

pn结界面处最大电场为

pn结的电容效应：当pn结上外加反向偏压发生改变，pn结中耗尽区的宽度也发生变化，因此pn结中耗尽区的宽度也发生变化，两侧耗尽区中电荷也发生变化，这种充放电作用，即为pn结的电容效应

单位面积pn结的电容为，而，利用或的公式，得到，也被称为耗尽层电容，电容是随着反向偏置电压改变而不断变化的

单边突变结：

当pn结两侧掺杂浓度相差很大时，通常称之为单边突变pn结

此时，得到空间电荷区宽度为，电容为，可见电容倒数的平方与反向偏置电压成线性关系

正偏状态下的pn结：

当在pn结的p型区一侧外加一个相对于n型区的正电压时，pn结即处于正向偏置状态，此时外加电 压所形成的电场与内建电场方向相反

由于外加电场削弱了内建电场的作用，pn结中的势垒高度也相应降低。因此漂移电流与扩散电流不再保持平衡，同时pn结两边也不再具有统一的费米能级。n型区的电子向p型区扩散，p型区的空穴向n型区扩散

由于正偏条件下，pn结两侧存在少数载流子的浓度梯度，因此pn结中存在少数载流子扩散电流，流过pn结电流与其两端的外加正向电压之间满足关系：，其中称为pn结的反向饱和电流，它是pn结两侧的掺杂浓度、少数载流子的扩散系数以及pn结面积的函数。由该式子可以得到，pn结正向电流与外加的正向电压呈指数关系，反向电流则保持为，故而pn结具有单向导电性，可用于实现整流、检波等功能

正偏状态下的肖特基结：与正偏pn结中少数载流子的扩散电流不同，正偏肖特基结中的电流主要是多数载流子电流，载流子通过肖 特基势垒的电流输运机理主要是热离子发射理论

pn结——理想电流电压特性：

理想pn结电流-电压特性的四个基本假设条件：

1. pn结为突变结，可以采用理想的耗尽层近似，耗尽区以外为电中性区
2. 载流子分布满足麦尔斯韦-玻尔兹曼近似
3. 满足小注入条件
4. 通过pn结的总电流是一个恒定的常数，电子电流和空穴电流在pn结中各处是一个连续函数，电子电流和空穴电流在pn结耗尽区中保持为恒定常数

pn结内建势垒公式

假设杂质全部离化，那么n型区电子浓度为，p型区电子浓度为，这样有

当外加正向偏压时，势垒由变为，在小注入条件下，近似保持不变，这样，可见在正偏条件下，pn结内部势垒降低，出现载流子电子的注入，p型区中少数载流子电子的浓度高于热平衡时浓度，注入到p型区的电子还会进一步扩散和复合，因此给出的是p型区中耗尽区边界处的电子浓度

类似地，在正偏条件下，pn结中同样会出现少数载流子空穴的注入，使得n型区的少子空穴的浓度高于热平衡时浓度，n型区中耗尽区边界处少子空穴浓度为

上面公式对于反偏情况也是适用的，而且当反偏电压足够高时，耗尽区边界处的少数载流子浓度基本为零

双极运输方程：（未整理）

过剩多数载流子的行为完全由少数载流子的参数决定

少数载流子分布：

P．59

**第七章 MOS场效应管晶体管基础**

MOSFET：金属-氧化物-半导体场效应晶体管

其中金属为器件的栅极，栅极氧化层下面的衬底表面趋于是将要形成导电沟道的位置，沟道两端为器件的源区和漏区

纵向为金属-氧化物-半导体结构，利用栅极电压的控制作用，实现硅衬底表面的基类、耗尽和反型

横向为源区-沟道-漏区结构，利用半导体衬底表面的反型与否，实现MOSFET源漏之间的通断控制

MOSFET是一个四端器件，其衬底通常接地（p型衬底）或接电源电压（n型半导体）

器件基本几何参数：沟道长度L，沟道宽度W，栅氧化层厚度等

根据反型沟道导电载流子的不同和阈值电压的正负区别，MOSFET可以划分为四种不同的类型

栅极外加正电压，此栅电压将在栅极氧化层中建立一个纵向电场，只要该电场足够强，就会在硅衬底表面感应形成一层电子导电层，这层电子导电层通常称为反型层，有时也称为沟道区

当源漏两端有外加电压时，沟道区中就会有漏极电流流过。这个漏极电流是纵向电场的函数，即栅极电压对于漏极电流具有调制作用，此即场效应晶体管的工作机理

MOSFET一个基本电学参数：阈值电压

当外加栅极电压时，MOSFET光断，晶体管电流为0

当时，沟道去有反型层，晶体管中漏极电流不为零

①当且时，n沟道MOSFET处于饱和区，漏极电流不随楼几点呀变化，有，为MOSFET导通参数，是沟道区中电子的迁移率、栅氧化层电容以及期间沟道区宽长比的函数

②当且，n沟道MOSFET处于非饱和区，漏极电流既随栅源电压变化也随漏极电压变化

MOSFET作用之一为变输入信号的放大，将MOSFET偏置置于某个静态工作点，有，称为负载线方程，当输入信号发生变化，器件的漏极电流相应地发生变化，导致输出电压发生变化

MOS电容是MOSFET的核心

为栅氧化层厚度，一般在几十埃到几百埃之间，为氧化层介电常数

在实际MOSFET中，栅极材料往往是重掺杂的多晶硅

P型衬底：当下电极为一块p型半导体材料时，外加电场将会深入到半导体材料内部，最后再半导体材料表面形成一层空穴的积累层，作为下电极上的正电荷，此时MOS电容类似于一个平行班电容器，只是在空穴积累层外，电场下降为零。如果将外加电压反向，则p型半导体材料中多数载流子空穴排斥到体内，表面留下一层带负点的离化受主固定电荷，此时，同样有一定电场穿透深度

再从能带图考察MOS电容，使p型半导体材料接地，栅极上接电压，理想情况下，栅金属材料的费米能级与半导体材料的费米能级在同一水平上，且栅氧化层中没有净电荷

P.55