沟道长度L，沟道宽度W，栅氧化层厚度

根据反型沟道载流子和阈值电压的正负，MOSFET可分为四类

漏极D，栅极G，源极S，衬底B

纵向结构：金属-氧化层-半导体

横向结构：源区-沟道区-漏区

当栅极外加一个正电压,外加电场够强时，在硅衬底表面感应形成的一层电子导电层，通常称为反型层，也称为沟道区

耗尽型和增强型n沟MOSFET的区别

阈值电压

MOSFET的I-V特性（信号放大作用）

二端MOS电容特性，设为栅氧化层厚度，为氧化层介电常数

理想情况：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，且栅氧化层中没有净电荷（金属和半导体之间的功函数差为零），在氧化物中或者氧化物与半导体之间的界面不存在电荷，氧化层为良好绝缘体

能带图中为电子能级

表面弱反型状态和表面强反型状态

表面耗尽层宽度和电荷

半导体表面反型层电子电子浓度

P型半导体衬底材料，有

为本征费米能级的弯曲量，也称为半导体材料的表面势，反应半导体表面耗尽区的电势降落

半导体表面耗尽区宽度为，其中为半导体的介电常数

当表面达到强反型后，半导体表面反型层电子浓度为，那么的微小变化将会导致表面反型层电子浓度剧烈增加，从而使压降主要发生在氧化层，耗尽层宽度几乎不变，故而可认为栅电压达到阈值电压后空间电荷区已经达到最大宽度

MOS电容中的电势差：

凡是能带发生弯曲的地方必然存在电场

实际金属功函数不等于半导体功函数

在于实际 n 型多晶硅栅的费米能级通常要 高于其导带底的能级位置，而 实际 p型多晶硅栅的费米能级通 常要低于其价带顶的能级位置。

氧化层中的电荷：

氧化层中靠近硅的表面处往往会有一些固定正电荷，主要是硅表面的悬挂键和氧化层中残留的一些碱金属粒子形成

平带电压：使MOS电容结构中的半导体能带不发生弯曲（平带），此时半导体材料中没有净的空间电荷

由于氧化层中的固定正电荷，所以氧化层上的压降未必为零，有，如果外加栅压，那么会引起氧化层上压降和硅表面势的改变，也就是

平带状况下，半导体材料中不存在净电荷，仅有氧化层电荷

半导体表面势为零，有

阈值电压（开启电压）：MOS硅衬底发生临界强反型时需要的栅极电压，

阈值电压表达式

其中

最后可得

或者表示为

影响阈值电压的因素：

1. 栅电极材料：不同栅电极材料与硅衬底之间的功函数差不同
2. 栅氧化层：氧化层厚度增加，阈值电压增加，氧化层中电荷也影响
3. 衬底掺杂浓度：本征阈值（平带电压为零），增强型器件的本征阈值大于平带电压绝对值

根据阈值电压可以划分MOSFET，衬底为p型的半导体材料的NMOS晶体管，阈值电压大于零为增强型，衬底为n型半导体材料的PMOS晶体阈值电压大于零为耗尽型

对于衬底为p型的来说，衬底掺杂浓度越高，器件阈值电压越大，而栅氧化层中固定的正电荷面密度越大，器件阈值电压越小

对于衬底为n型的来说，衬底掺杂浓度越高，阈值电压越负，固定的正电荷面密度越大，阈值电压也越负

MOS电容的C-V特性：

定义，该电容是一个小信号交流参数，利用在直流栅极偏置电压下叠加一个小信号的交流电压而测得

P型衬底，在表面为多数载流子基类的模式下（偏置电压为负值），单位面积的MOS电容为

栅氧化层电容和耗尽层电容是串联在一起的，即为

其中，

在MOS表面为耗尽状态时，总MOS电容随耗尽区宽度不断展宽而逐渐减小

当耗尽区宽度达到最大时，总的MOS电容达到最小，为

但是此时反型层中的电子总数仍然可以忽略

表面达到强反型后，外加栅压几乎不会影响耗尽区了，只会改变氧化层的电荷量（前提是反型层中 电子数的变化必 须能够跟得上外 加栅极信号电压 的变化速率。）

这样，在强反型后，有

C-V特性变化存在过渡区域，在电压较小时，基本只有耗尽区电荷密度对栅极电压的变化而变化，另一边则是只有反型层中的电荷密度随着栅极电压变化而变化

P型硅衬底上在高频小信号和低频小信号两种情况

平带电压处对应平带电容，平带情况介于表面多数载流子基类和表面多数载流子耗尽两种状态之间，单位面积平带电容可表示为：

其中德拜长度，平带电容式栅氧化层厚度和掺杂浓度的函数，相当于0.5（表面势）在硅衬底表面形成的耗尽区电容与栅氧化层电容串联的结果

频率效应的影响

反型层中电子来源主要有两个：①p型衬底中少数载流子电子通过扩散流向硅表面②通过空间电荷区中电子-空穴对的热产生过程形成

表面在达到强反型之后，在外加高频栅极电压信号的作用下，等效MOS电容仍然表现为最小值，

氧化层中固定电荷和界面电荷的影响：栅氧化层中电荷会影响MOS结构的阈值电压，主要体现在平带电压上

不同的固定电荷下，会引起C-V曲线的平移，增大就会左移

可以利用偏移量求得栅氧化层中的等效电荷密度

栅氧化层与硅衬底的界面处还可能存在大量界面电荷

界面态上的净电荷数量取决于界面处费米能级在禁带中的相对位置

界面态：在硅衬底的表面，由于周期性晶格点阵的中 断，从而在禁带中引入了大量可能的电子能态，这些 电子能态通常就称为界面态

费米能级恰好位于表面呈现电中性的施主能级和表面呈现电中性的受主能级之间的分界点位置，称为禁带中点条件

在栅极电压由赋值到正值的扫描过程中，界面态电荷的数量和符号均发生变化，因此C-V也会向两侧拉伸

当表面为积累状态时，平带电压变小；而当 表面逐渐进入反型状态时，阈值电压则增大

MOSFET的I-V特性

时，电流为零

时，源区电流通过沟道流向漏区

但是栅极都没有稳定电流通过

栅氧化层中的纵向电场由产生，沟道区的横向电场由产生

对于长沟道MOSFET，这两个电场的作用可以独立处理，但是随着沟道长度不断缩短，沟道中的电荷将同时与两个电场相关，就需要考虑短沟道效应

当源漏之间电压较低，可以将沟道区视为电阻，有，沟道电导为，为反型层中电子的迁移率，为单位面积反型层中电子电荷量，W和L为沟道长度和宽度，假设迁移率为常数

反型层中电荷密度为单位面积栅氧化层电容和过剩栅极电压的函数，有，这样反型层中电荷密度时栅源电压的函数，从而可以发生调制

这样漏电流为

再分析的影响，反型层厚度反映了沟道电荷的密度，在源漏电压较小时，沿着沟道长度各处的反型层厚度基本均匀，因此电流随其变化斜率稳定

随着源漏电压增大，MOSFET漏极电压升高，靠近漏端处栅氧化层的压降不断下降，漏区附近反型层中电荷密度也不断下降，由此导致MOSFET沟道漏端的微分增量电导下降

当漏端处栅氧化层上压降刚好为时，漏端附近沟道中反型电荷数也恰好为零，此时漏端微分增量电导下降为零，此时满足，其中就是使得漏端附近沟道中的反型电荷密度为零时的源漏电压

当继续增大，反型层中电荷密度恰好为零的点，称为沟道夹断点逐渐向源端移动，这样斜率也减小为零

饱和区

定义MOSFET的导通参数P.151

P.170之后的推导

功函数的公式不用记

平带电压和阈值电压必须记住

电容的计算（氧化层电容）C-V特性

MOSFET的I-V特性必须要记

小信号不要求

能带的画法