

# 第一章 MOSFET

## 回顾

MOS 的晶体电流公式:

线性区时:

$$I_d = \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th} - \frac{1}{2} V_{ds}) V_{ds}$$

饱和区时:

$$I_d = \frac{1}{2} \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2$$

## 1.1 线性区：电阻

在线性区满足  $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ ，当沟道打开时，沟道高度与  $V_{gs}$  成比例，通过面积法理解电流中的  $V_{ds}/2$  来源。

小信号的导通电阻求解为:

$$R = \frac{\partial V}{\partial I} \approx \frac{1}{\mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})}$$

电子迁移率大概是  $\mu_n \approx 600 \text{cm}^2/Vs$ ， $\mu_p \approx 250 \text{cm}^2/Vs$ 。栅氧层电容  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$ ，基本可以按照特征尺寸  $L_{min}$  估计栅氧厚度  $t_{ox} = \frac{L_{min}}{50}$ 。一般使用  $\text{cm}^2$  相关的单位。定义工艺量  $KP_n = \mu_n C_{ox,n}$ 。

根据以上的知识可以对 MOSFET 的电阻进行快速的估算。工艺越小，由于特征尺寸小，电阻更小；PMOS 由于迁移率小，电阻更大。

## 1.2 饱和区：放大器

在  $V_{ds} > V_{gs} - V_{th}$  时，进入饱和区。对于  $I_d$  公式，如何理解其系数  $1/2$  以及平方项:

$$I_d = \frac{1}{2} \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2$$

同样是通过沟道图理解， $V_{ds}$  最多造成  $V_{gs} - V_{th}$  的影响，沟道越长，调制效应越小。其跨导定义如下，最后一种形式最常见，需要记忆：和  $I_d$  直接相关。

$$\begin{aligned}
g_m &= \frac{\partial I_d}{\partial V_{gs}} = \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th}) \\
&= \sqrt{2I_d \cdot \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L}} \\
&= \frac{2I_d}{V_{gs} - V_{th}}
\end{aligned}$$

可以看到，跨导和漏极电流有着密切的要求，对于  $g_m \propto \sqrt{I_d}$  在测试中尺寸是固定的，对于  $g_m \propto I_d$  在设计中偏置固定。

其输出电阻  $r_0 = V_{ds}/I_d \approx 1/(\lambda I_d)$ 。  $\lambda = 1/(V_E \cdot L)$ ，  $V_E$  是工艺相关的量，  $L$  是沟道长度。一般来说，  $V_{E,n} = 4\text{V}/\mu\text{m}L$ ，  $L = 1\mu\text{m}$

### 1.2.1 单晶体管放大器

对于共源放大器：

$$A = g_m r_0 = \frac{2I_d}{V_{gs} - V_{th}} \cdot \frac{V_E L}{I_D} = \frac{2V_E L}{V_{gs} - V_{th}}$$

其中  $V_{gs} - V_{th} \approx 0.2V$

运算放大器的设计存在 Trade-off 表 ??：对于  $g_m \approx \frac{2I_{ds}}{V_{gs}-V_{th}}$ ，  $A = \frac{2V_E L}{V_{gs} - V_{th}}$ ，跨导越大，速度越快。

表 1.1: Trade-off

	高增益	高速
$V_{gs} - V_{th}$	down	up
$L$	up	down

## 1.3 弱反型区与

对于弱反型区有

$$I_{d,wi} = I_{d0} \frac{W}{L} e^{\frac{V_{gs}}{n k T / q}}$$

$$g_{m,wi} = I_{d,wi} \frac{1}{n k T / q}$$