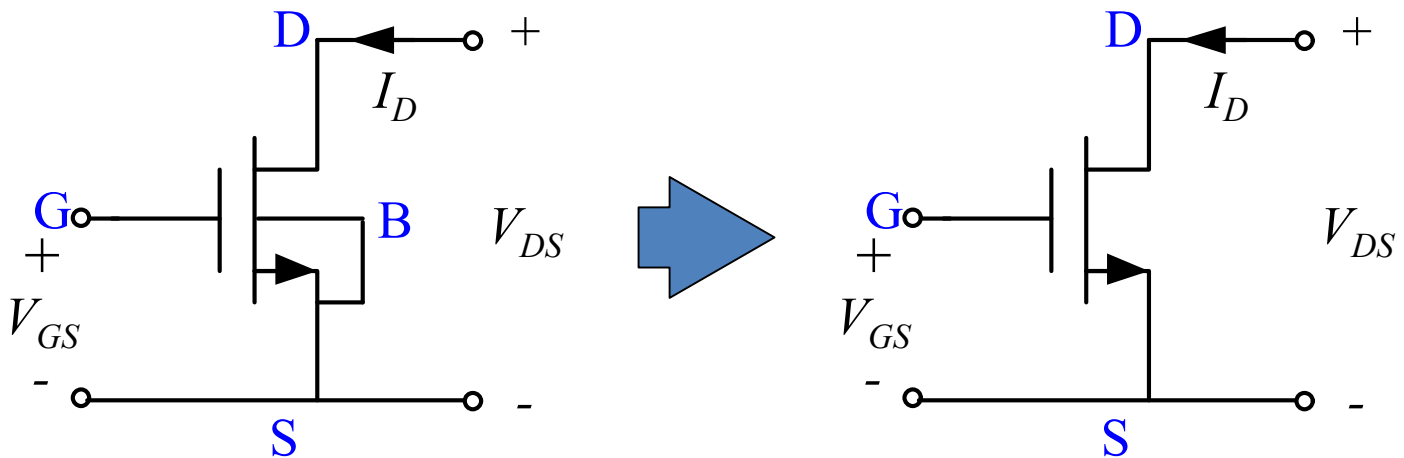


第八章 CMOS模拟集成电路

8.3 MOS晶体管直流特性

MOS晶体管直流特性

- ◆ 共源极接法的NMOS管，S与B连接在一起
 - $V_{BS}=0$ ，避免考虑背栅效应



MOS管特性曲线

- ◆ MOS管的输入输出关系可以用特性曲线表示
- ◆ 特性曲线通过直流测量或仿真得到

方法:

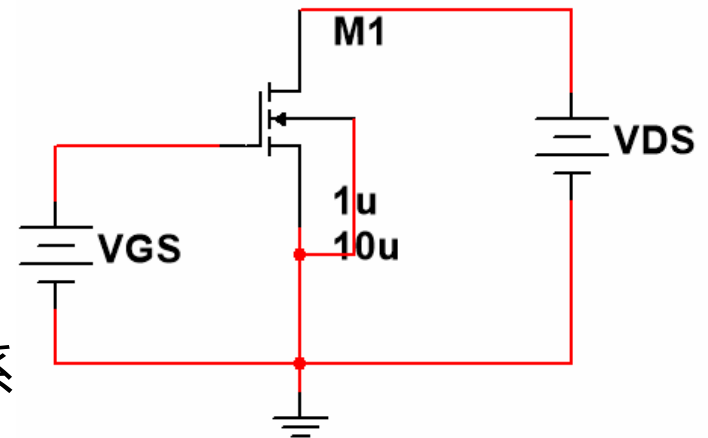
- 1, 在输入和输出端, 分别施加特定的栅源电压 V_{GS} 、漏源电压 V_{DS} , 测量对应的栅级电流 I_G 、漏极电流 I_D , 得到1个数据点

$$(V_{GS}, V_{DS}) \rightarrow (I_G, I_D)$$

- 2, 重复1, 得到更多数据点
- 3, 把所有数据绘制成曲线, 对应以下关系

$$I_G = f_1(V_{GS}, V_{DS})$$

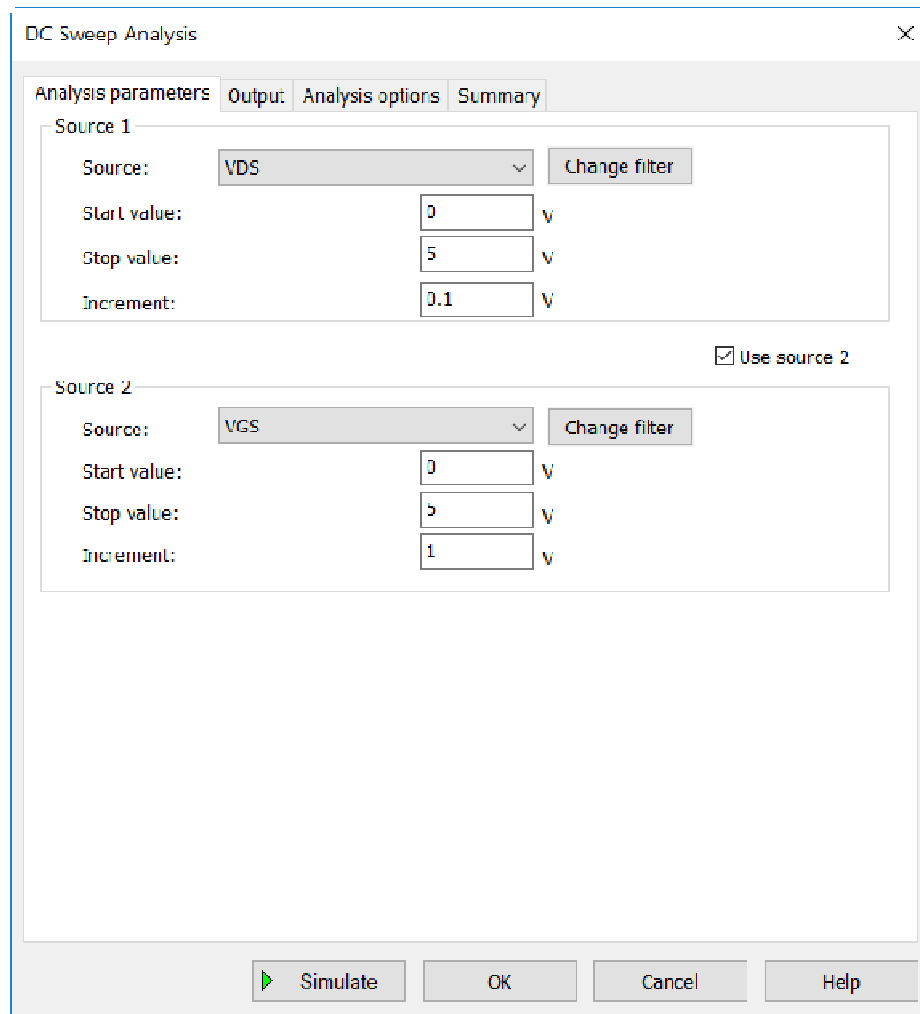
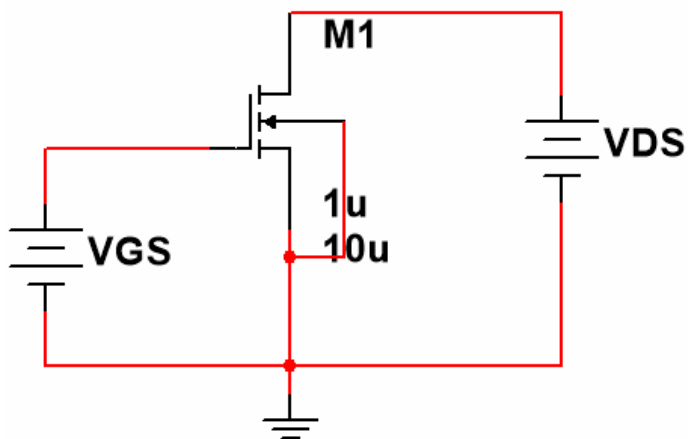
$$I_D = f_2(V_{GS}, V_{DS})$$



MOS管特性曲线仿真

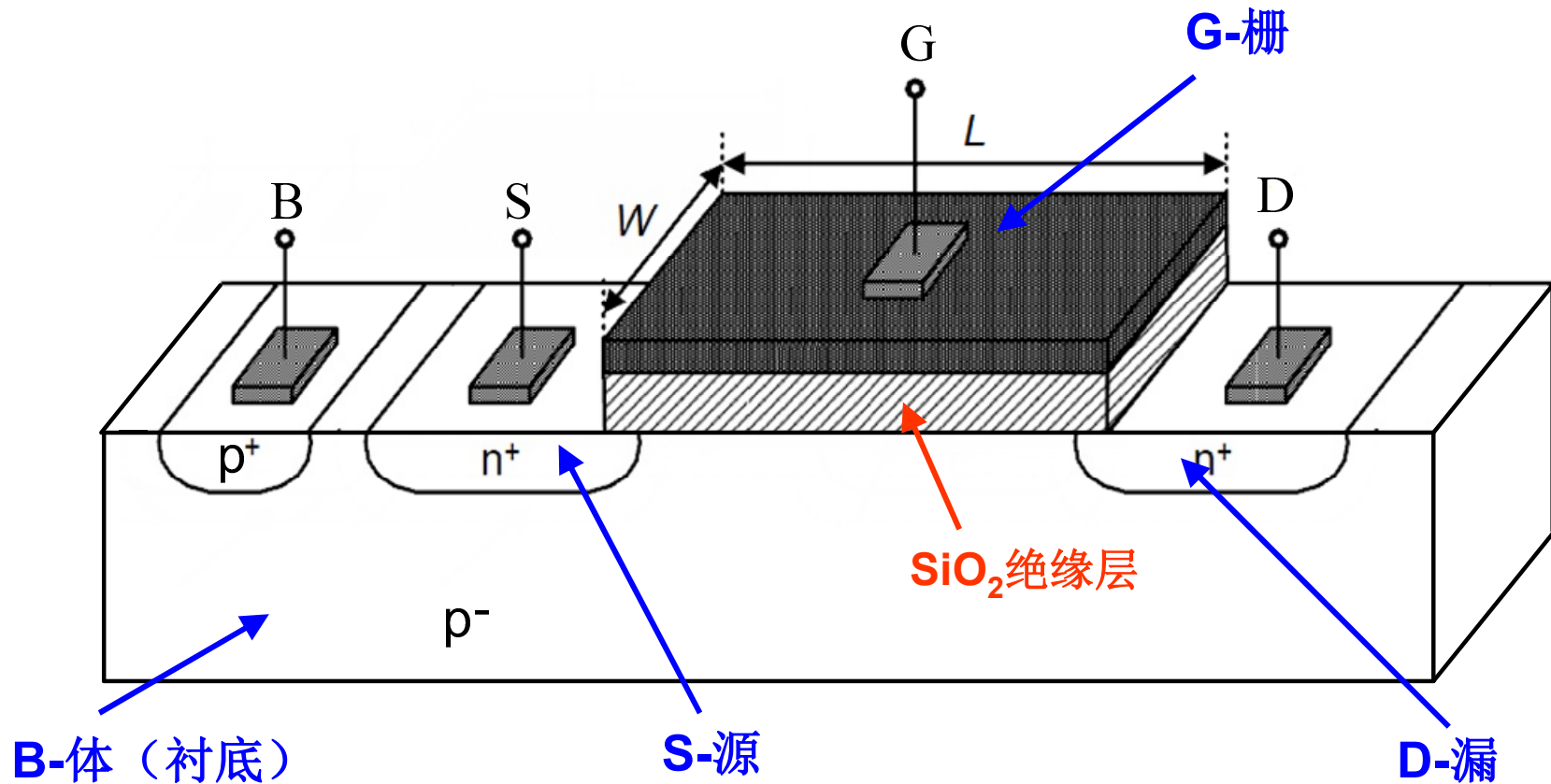
◆ 采用直流扫描仿真

- V_{DS} : 0~5V
步长: 0.1V
- V_{GS} : 0~5V
步长: 1V

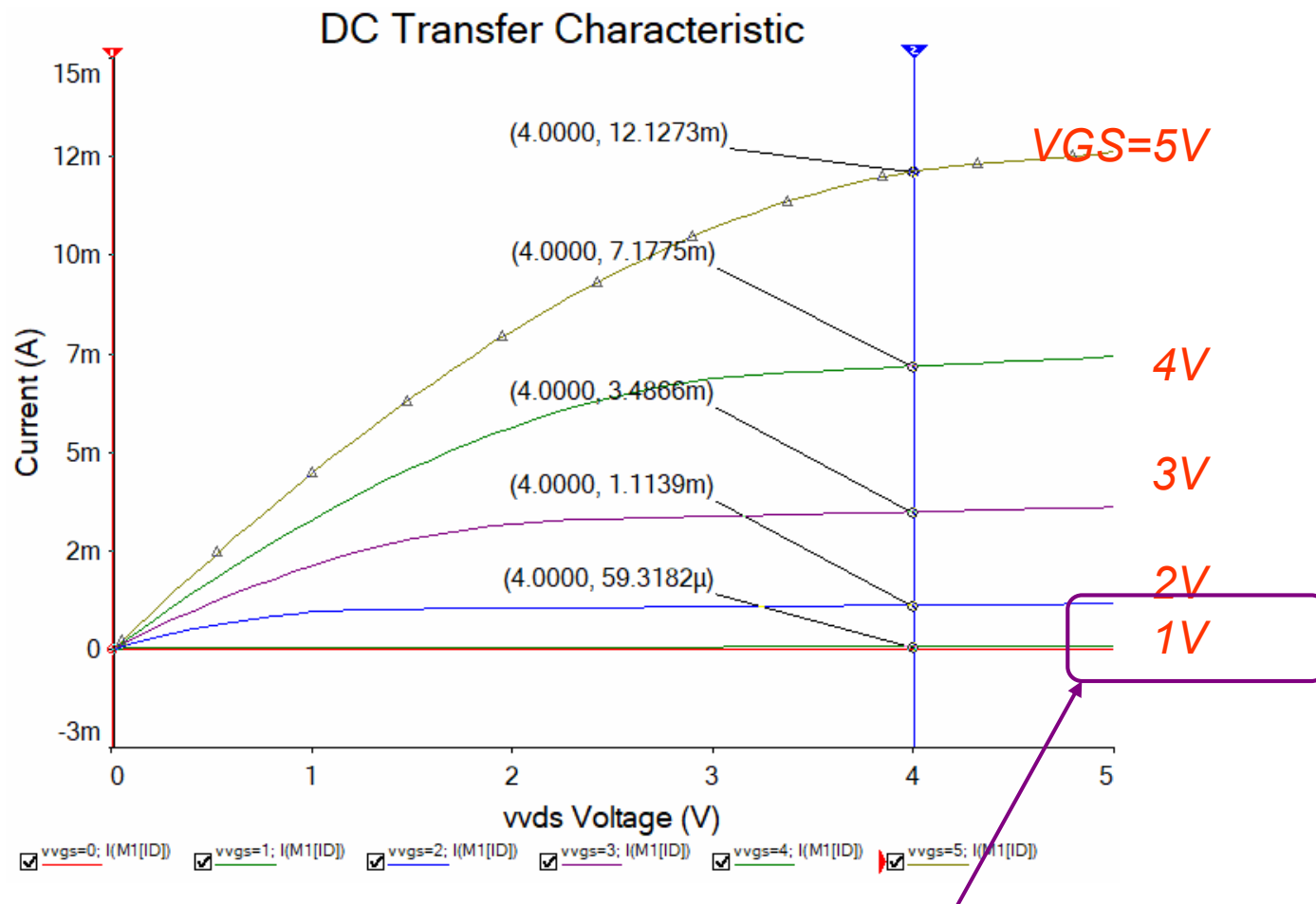


输入特性： 栅极电流 I_G 与栅源电压 V_{GS} 的关系

◆ $I_G = 0$

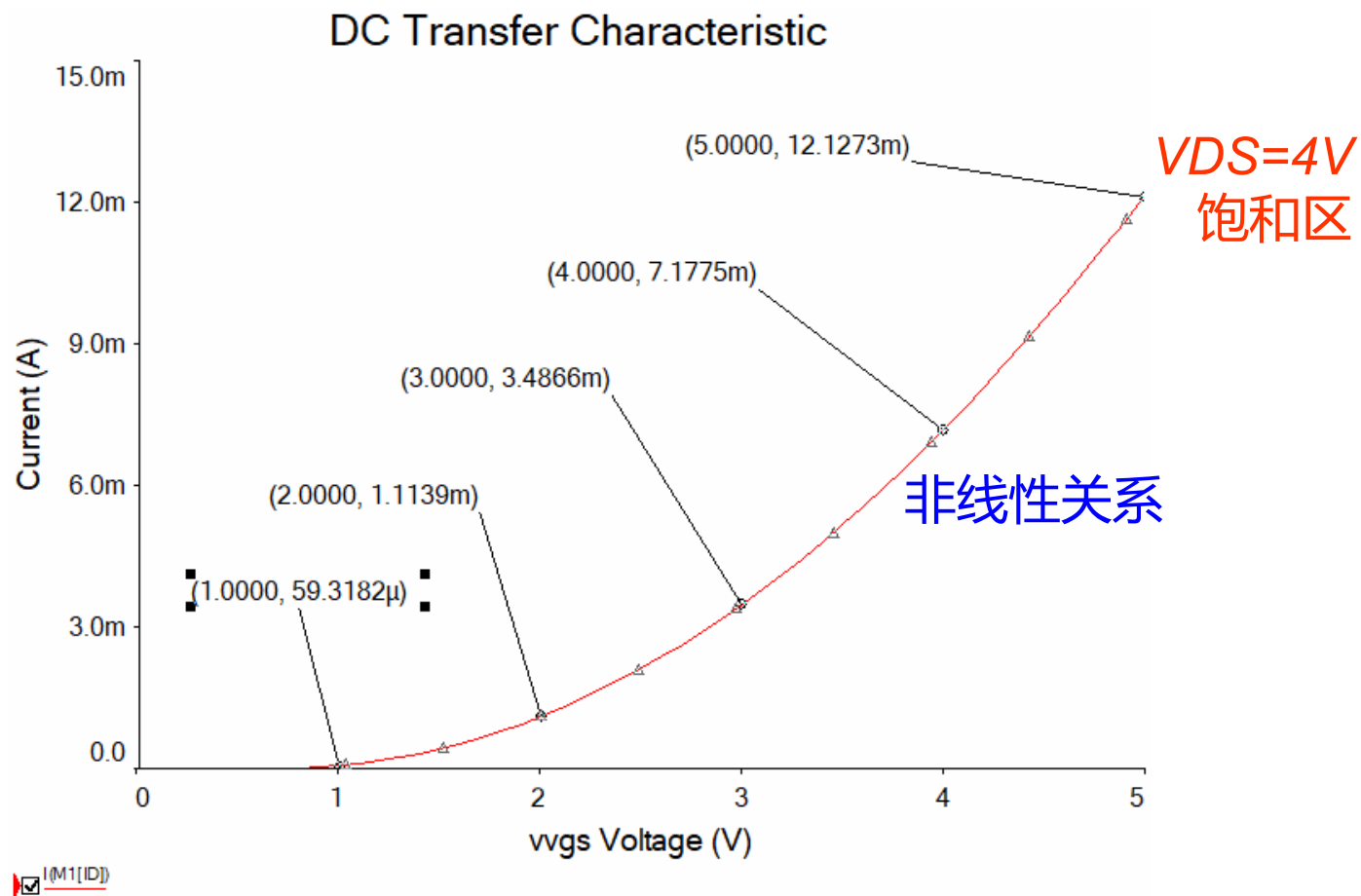


转移特性： 漏极电流ID与栅源电压VGS的关系

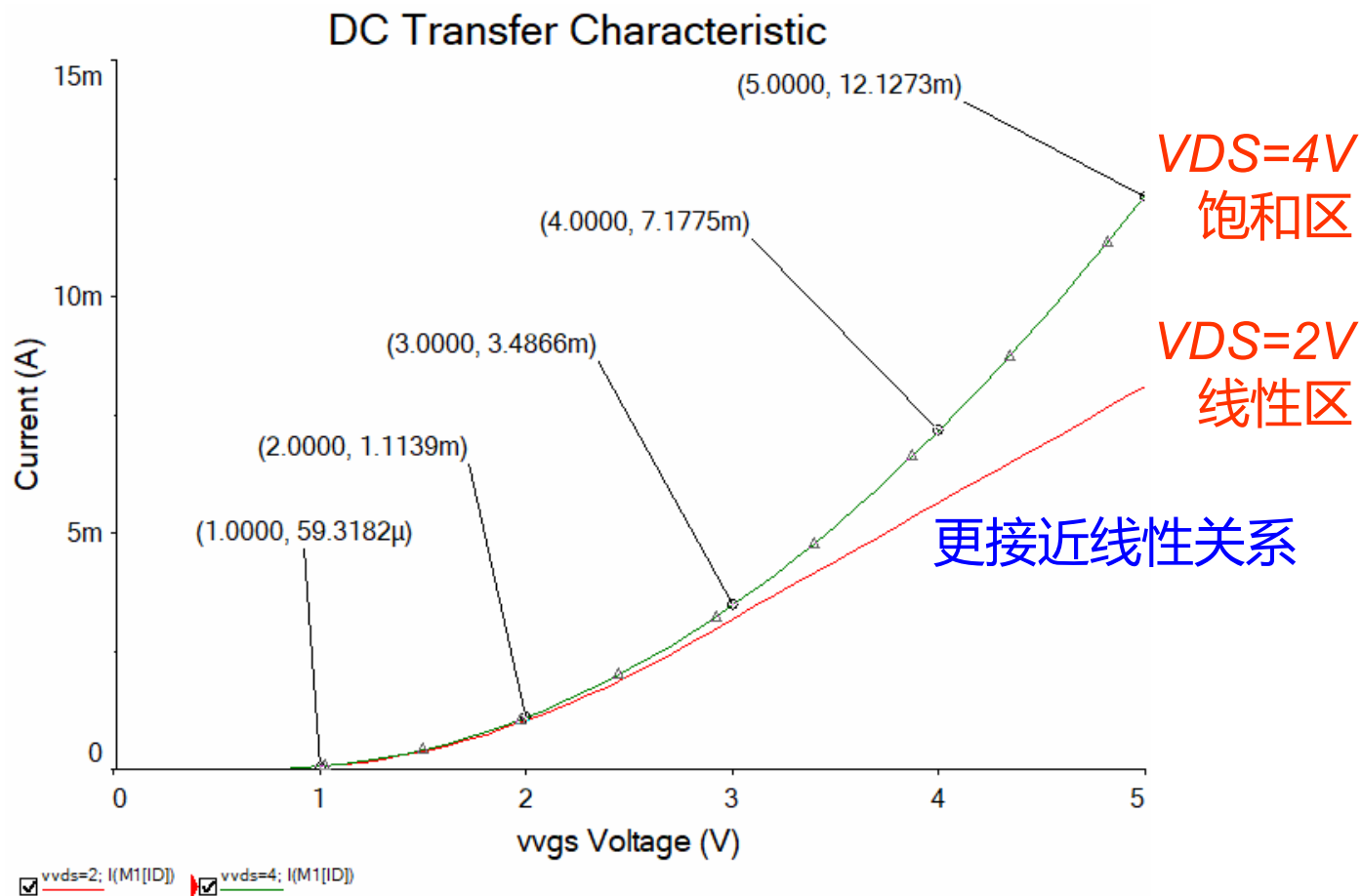


大于1V时，漏极才开始有电流
阈值电压 V_T 约为1V

转移特性

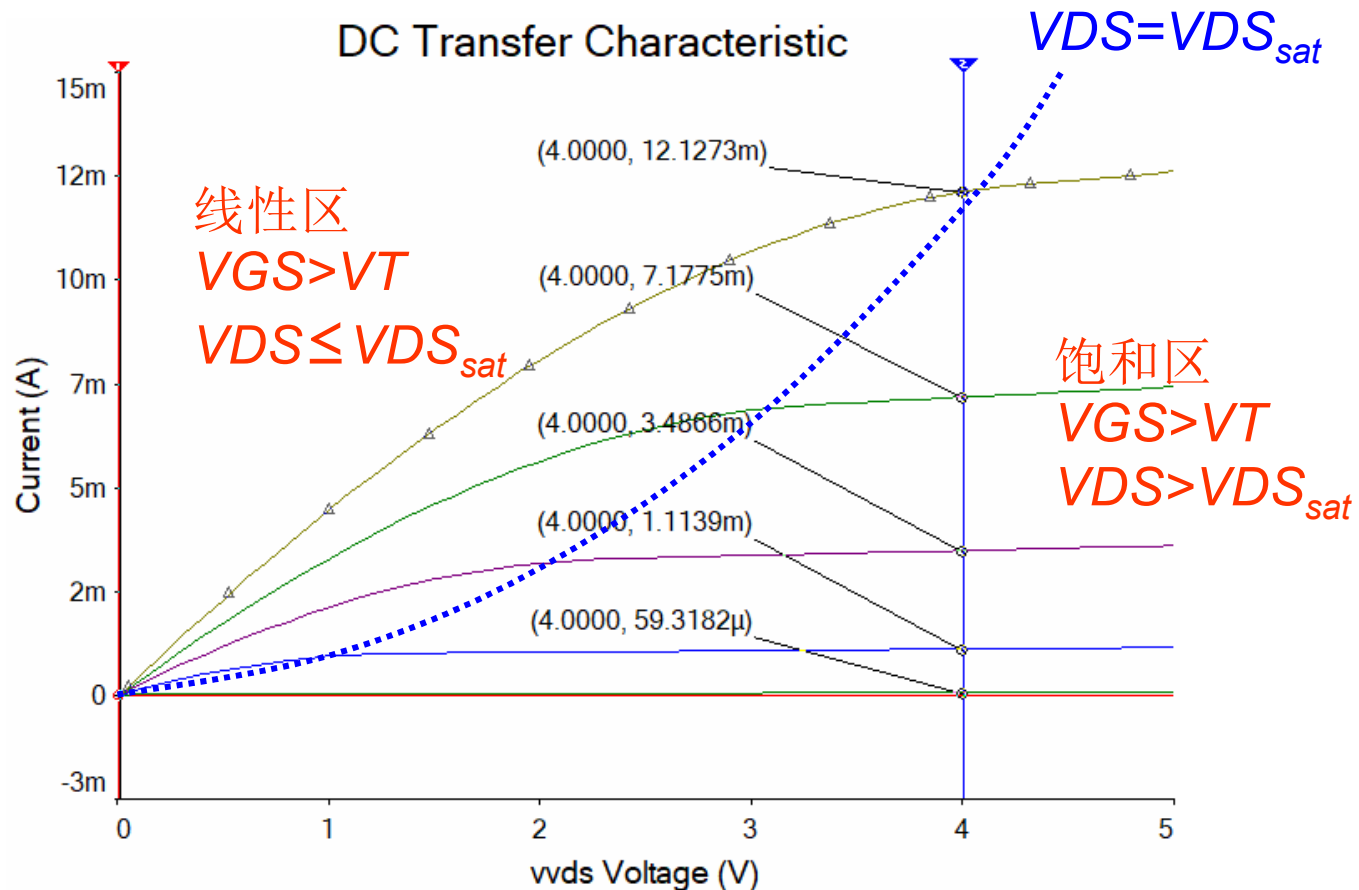


转移特性



转移特性与MOS管工作在哪个区有关

输出特性： 漏极电流 I_D 与漏源电压 V_{DS} 的关系

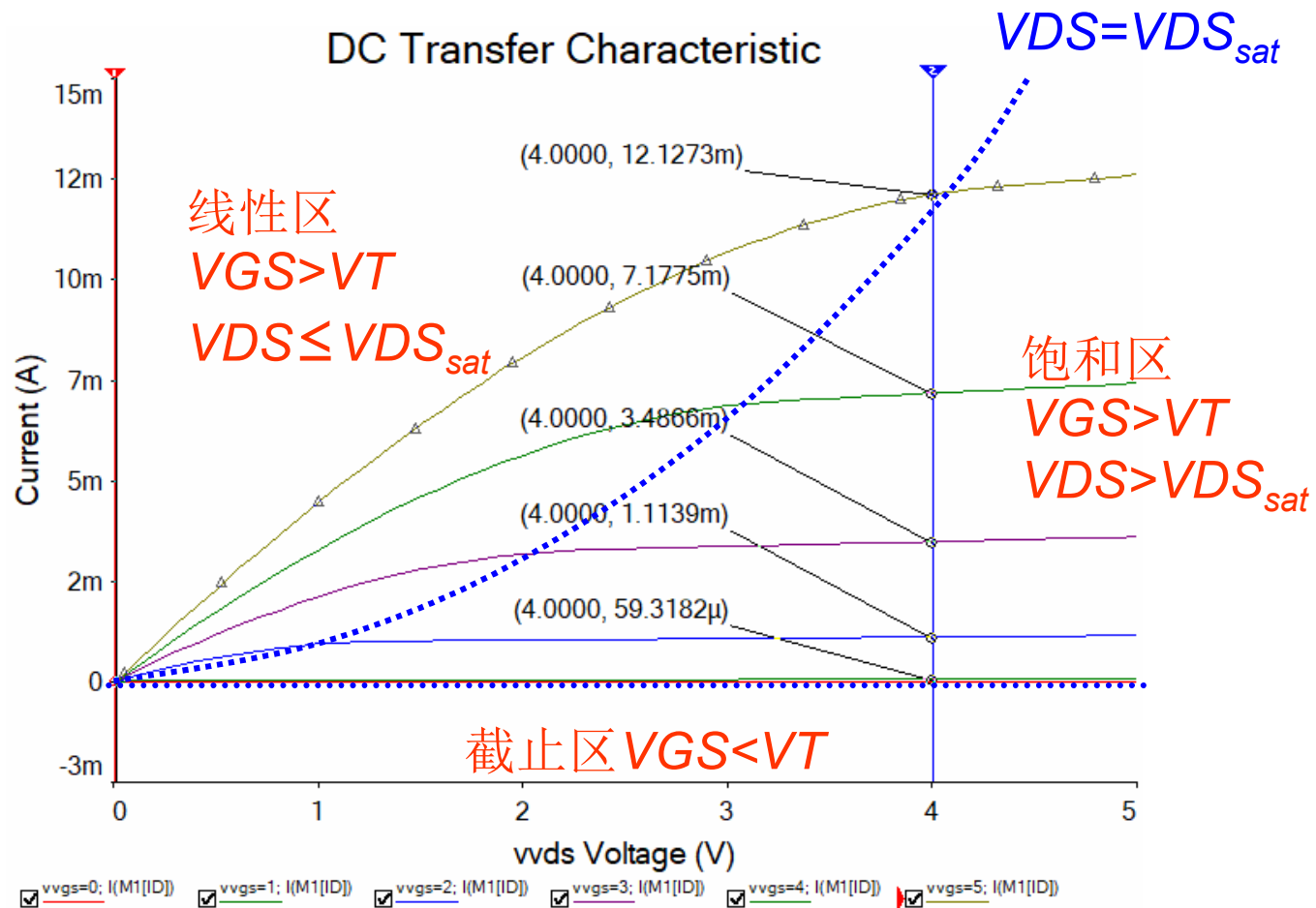


饱和电压：沟道
在漏极正好夹断

$$V_G - V_D = V_T \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} = V_T$$

$$V_{DS,sat} = V_{GS} - V_T$$

MOS管工作区



MOS管特性的数学关系表示

数学关系表示:

- ◆ 根据MOS管的物理原理，从半导体基本方程出发，对MOS管的参数做一定的近似假设，并结合测试结果，得到的输入输出关系的解析表达式

$$I_G = f_1(V_{GS}, V_{DS})$$

$$I_D = f_2(V_{GS}, V_{DS})$$

长沟道近似下、简单直流MOS管模型

- ◆ 长沟道近似：只适用导电沟道L足够长的情况
- ◆ 对于MOS管特性的描述分为三个区
 - 截止区、线性区、饱和区
 - 工作区划分条件与之前相同

1、栅极电流方程

$$I_G = 0$$

长沟道近似下、简单直流MOS管模型

2、漏极电流方程

◆ 截止区

$$I_D = 0$$

◆ 线性区

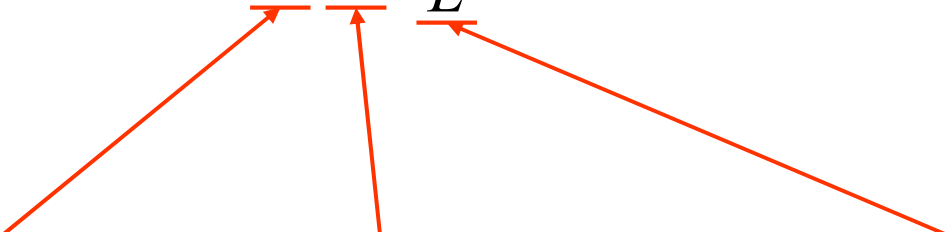
$$I_D = \beta \left[\underbrace{(V_{GS} - V_T)}_{\text{过驱动电压Vod}} V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad 0 < V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$

- 与Vod是线性关系
- 与VDS是非线性关系
- VDS很小时，与VDS呈近似线性关系

$$I_D \approx \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad 0 < \frac{V_{DS}}{2} \ll V_{GS} - V_T$$

长沟道近似下、简单直流MOS管模型

- 反应工艺、材料、结构参数的影响

$$\beta = \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L}$$


载流子迁移率：
NMOS管，电子迁移率
PMOS管，空穴迁移率

栅极电容单位
面积的电容容量

宽长比

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

长沟道近似下、简单直流MOS管模型

◆ 饱和区

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad 0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$$

- 与Vod是平方关系
- 与VDS无关

◆ 饱和区修正公式

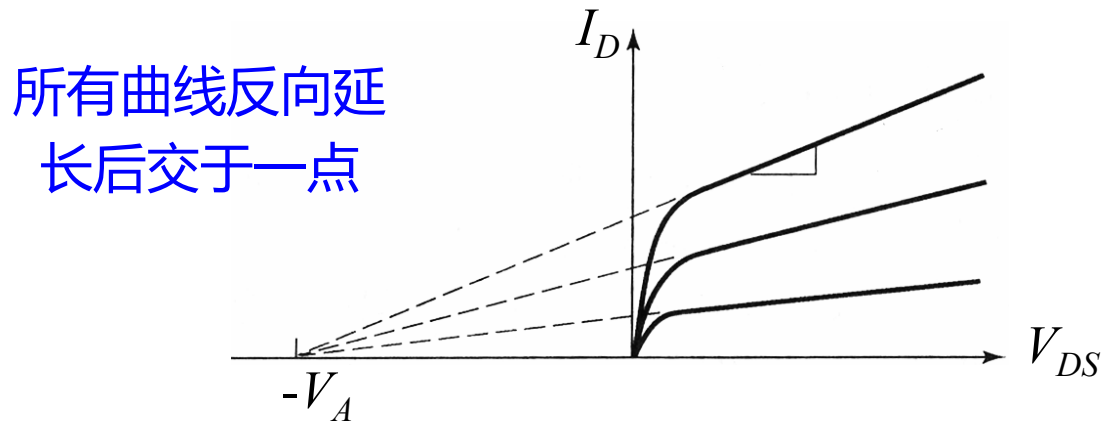
- VDS增大，电流略有增加
- 反映VDS对电流的影响

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad 0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$$

沟道长度调制系数

$$\lambda > 0$$

沟道长度调制效应图示



V_A : 厄尔利电压

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) = 0$$

$$V_{DS} \Big|_{I_D=0} = -\frac{1}{\lambda} = -V_A$$

背栅效应

- ◆ 如果 $V_{BS} \neq 0$ ，必须考虑背栅效应
 - 对于NMOS管，一般 $V_{SB} > 0$
 - 阈值电压将增大

$$V_T = \underline{V_{T0}} + \gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\Phi_F|} \right)$$

$V_{BS}=0$ 时的阈值电压

体效应系数
与工艺有关

强反型表面势
与衬底掺杂浓度有关

长沟道近似下NMOS管直流特性方程

◆ 栅极电流 $I_G = 0$

◆ 漏极电流 $I_D = 0$

- 截止区
- 线性区

$$I_D = \mu_0 C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad 0 < V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$

- 饱和区

$$I_D = \frac{\mu_0 C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad 0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS}$$

◆ 阈值电压 $V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{|2\Phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\Phi_F|} \right)$

长沟道近似下PMOS管直流特性方程

- ◆ 在NMOS管直流特性方程的基础上
 - 相关变量（电流 I_D ，电压 V_{GS} 、 V_{DS} 等）取绝对值
 - 迁移率使用空穴迁移率

小结

- ◆ 长沟道近似下的简单直流MOS管模型，只适用于MOS管工作原理、特性的教学
- ◆ 电路仿真软件提供的模型，会在上述公式基础上，增加许多修正，并且同时提供不同精度和复杂度的模型，供用户选择使用
- ◆ 代工厂提供的模型，与工艺节点、器件结构直接相关，复杂度还要远远超过，几乎不可能提供解析表达式
- ◆ 实际电路设计，都是基于特定代工厂的特定模型
- ◆ 借助电路仿真软件，对器件特性充分熟悉，是开始设计前的必备工作，直流特性成为基础