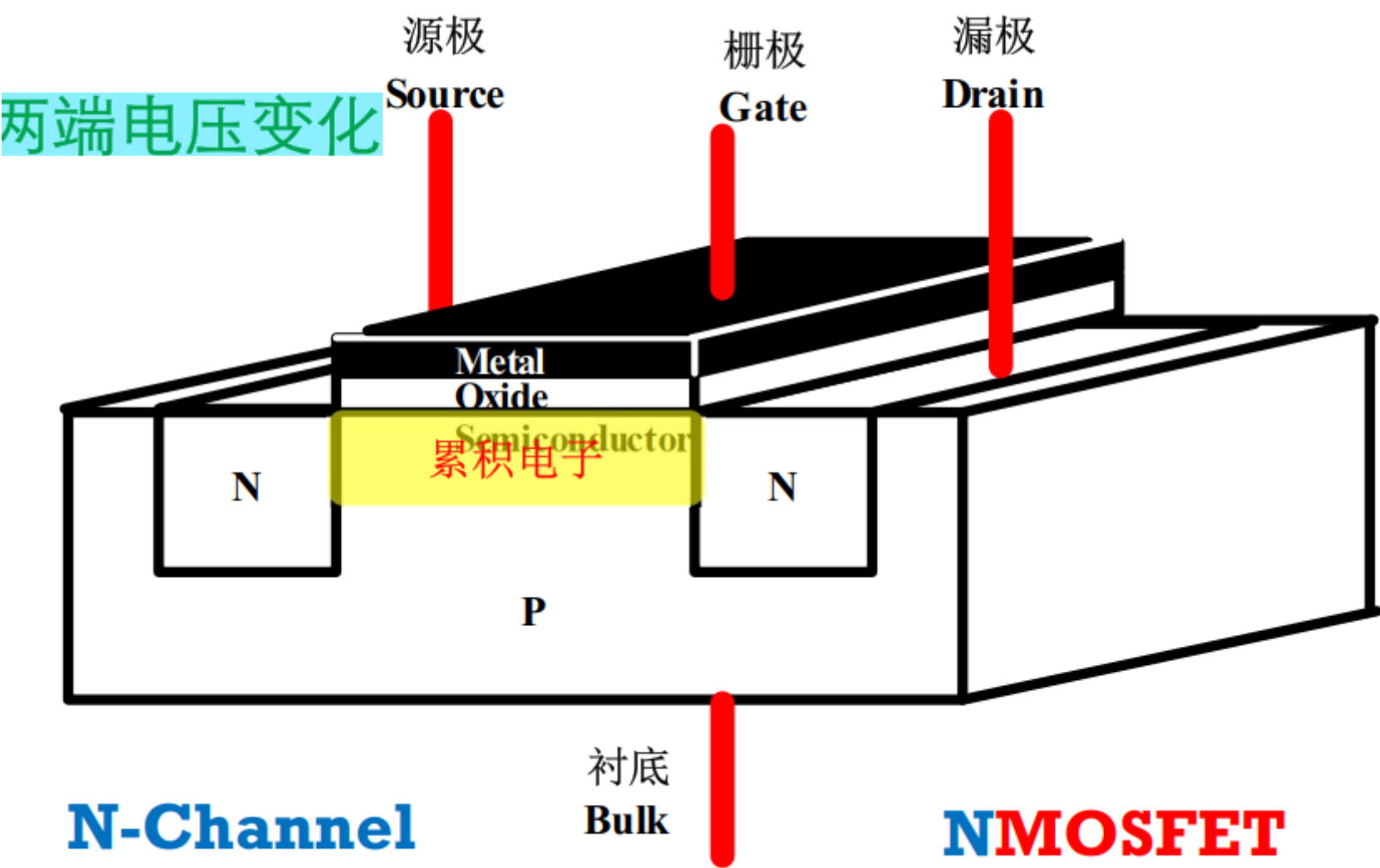


1.7 晶体管

- 晶体管非线性电阻的受控机制：
 - MOSFET受控非线性电阻的伏安特性方程
 - 总论晶体管受控非线性电阻特性
- MOSFET的伏安特性方程：
 - 方程推导
 - PMOS和NMOS互补
- 总论晶体管受控非线性电阻特性：
 - JFET
 - MOSFET
 - BJT

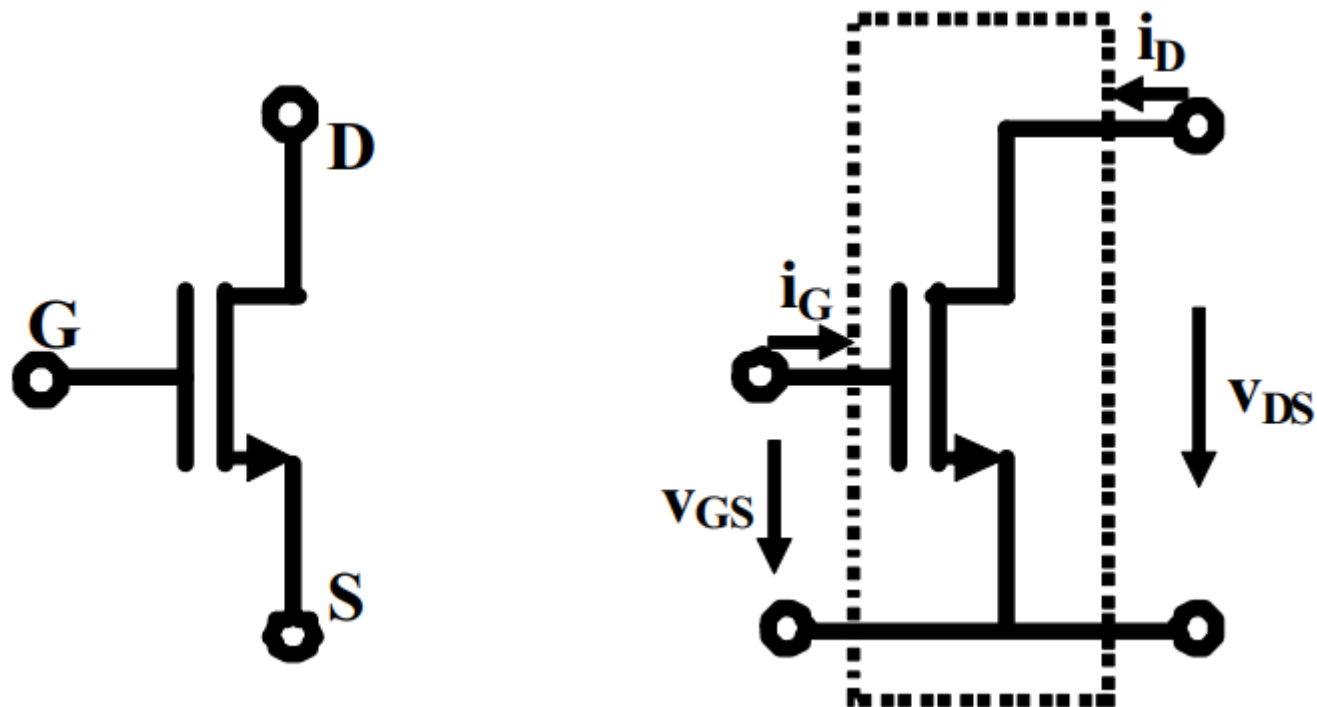
PS：晶体管（Transistor <-Transfer Resistor转移电阻器）最开始其实就代表了晶体管的原始作用：受控非线性电阻

MOSFET受控非线性电阻的伏安特性方程

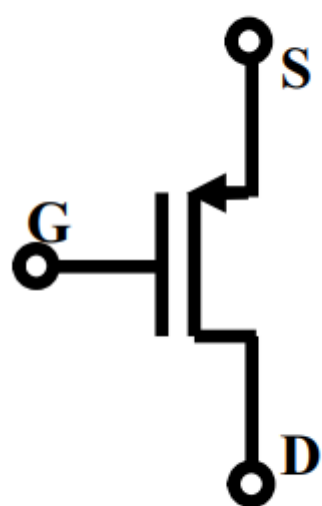


PMOS和NMOS的区别主要是看沟道：N-Channel（用电子导电）就是NMOS，反之就是PMOS

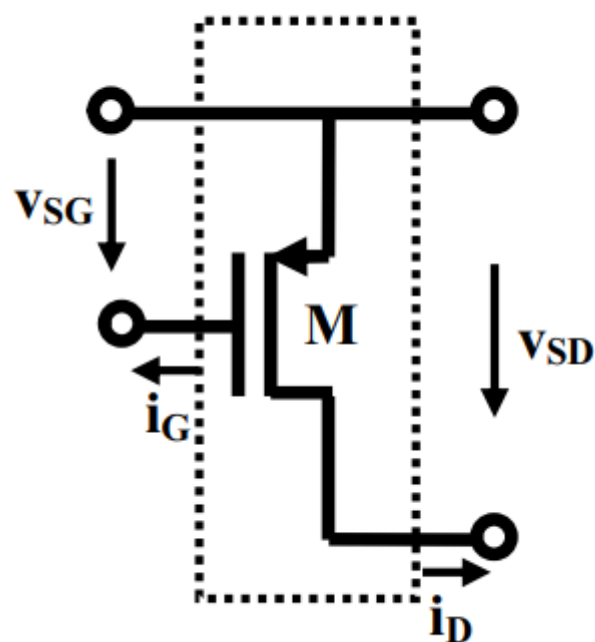
- MOS电容结构：Metal-Oxide-Substrate这个结构就形成了一个MOS电容，也是场效应的来源。
PMOS和NMOS的电路图分辨：



高电压

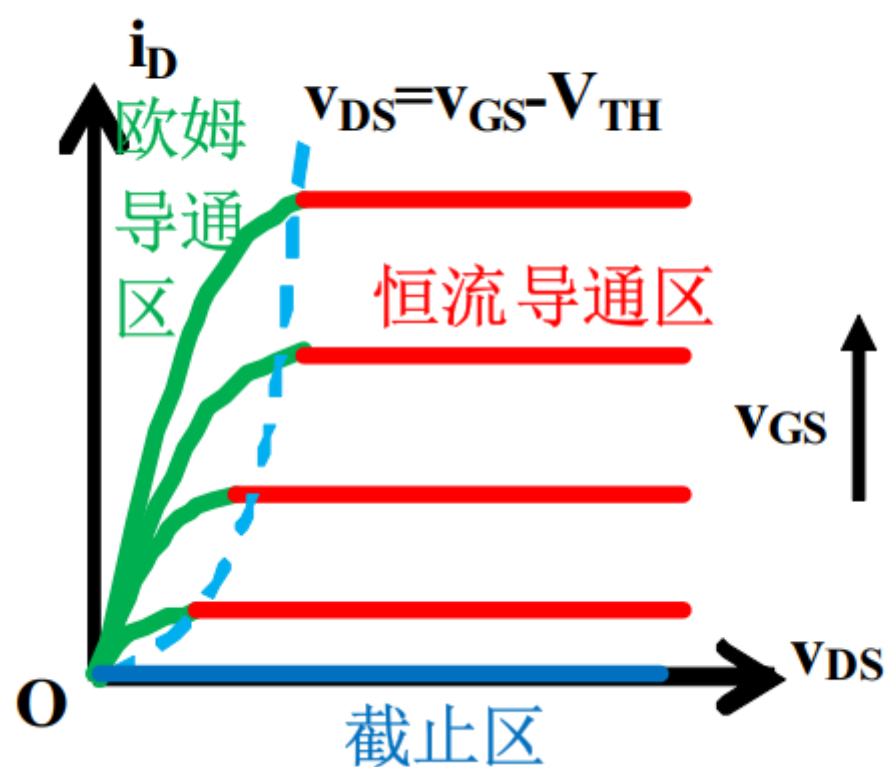


低电压



第一张是NMOS，第二张是PMOS，主要看箭头和S的相对方向，第一张箭头指向S，说明电流方向和载流子运动方向是相反的，因此载流子是电子，所以是NMOS（注意S的定义就是提供载流子的端）；第二张箭头远离S，说明载流子是空穴，是PMOS

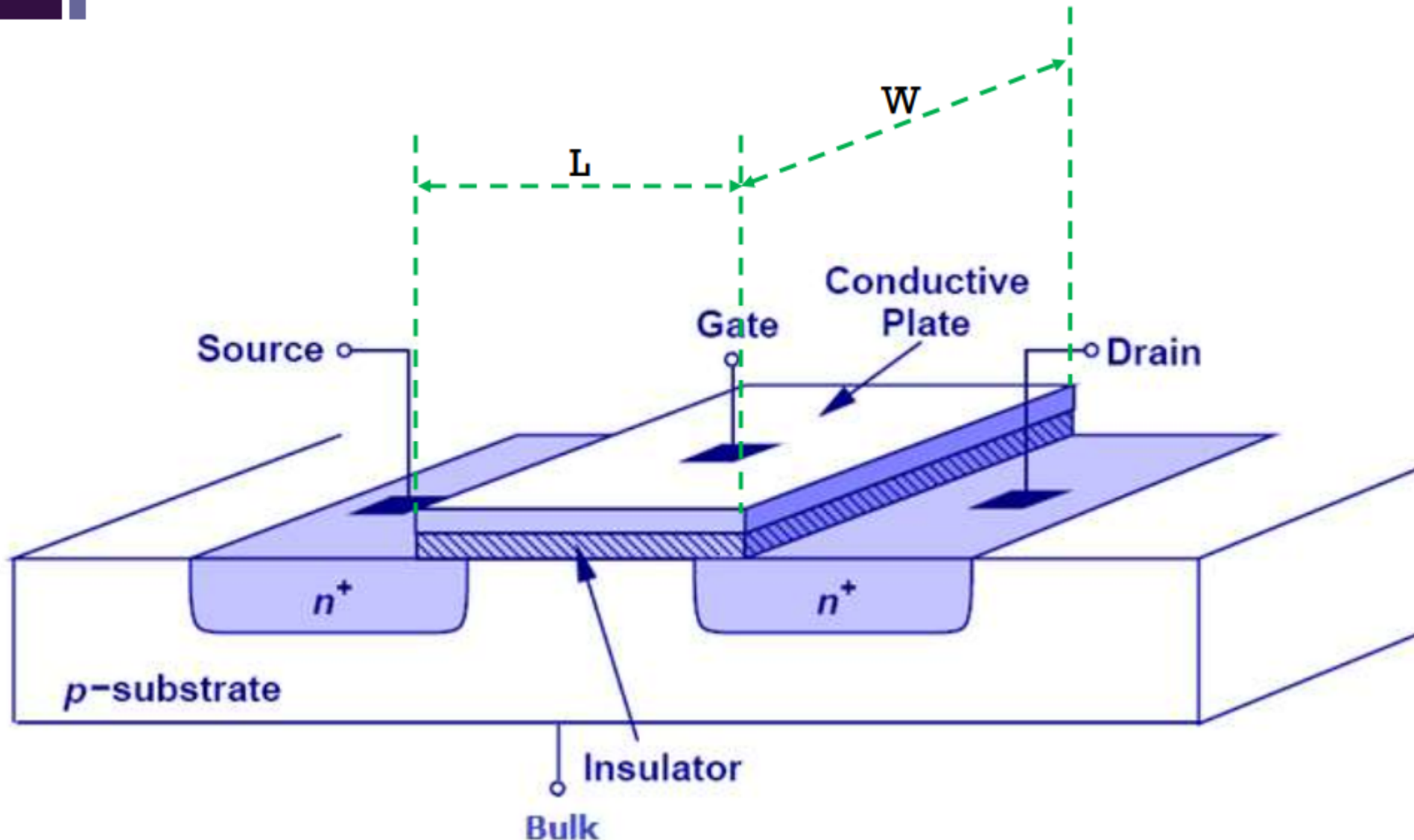
MOSFET的伏安特性曲线（ V_{GS} 作为控制变量，对于PMOS就是 V_{SG} ，不过不是很重要）



公式推导：

为了保证同一基片上的晶体管相互隔断，衬底接地（最低电位），以保证所有的PN结都是反偏截止的。

MOSFET的立体结构（这张图的参量对后面推导的理解很重要）



欧姆区

- 加控制电压 (V_{GS}) 形成沟道:

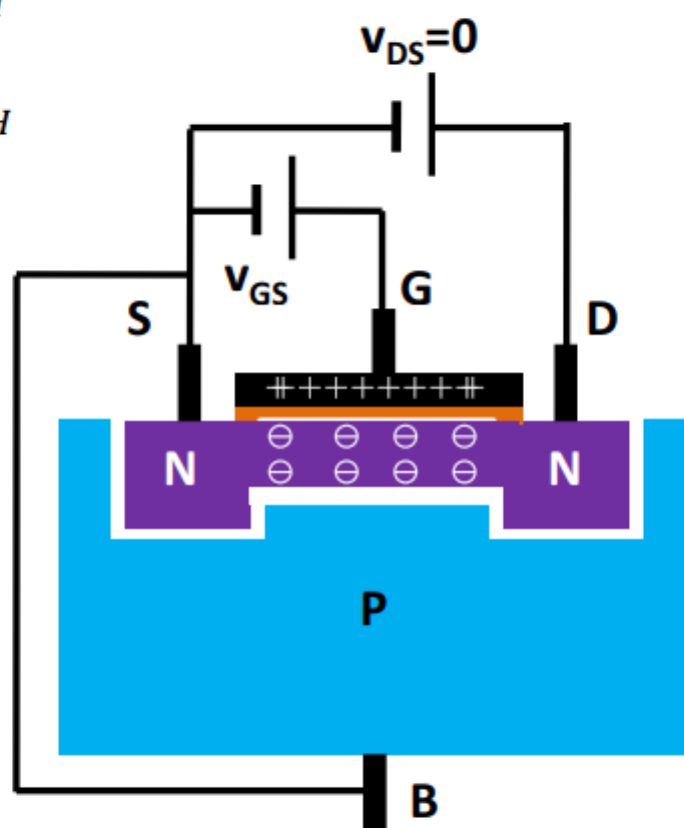
$$v_{DS} = 0$$

$$v_{GS} < V_{TH}$$

$$v_{GS} = V_{TH}$$

$$v_{GS} > V_{TH}$$

V_{TH}
阈值电压



$$Q_0 = C \cdot V_{od} = -WLC_{ox}(v_{GS} - V_{TH}) = L \cdot Q_x$$

沟道总电荷量

$$Q_x = -WC_{ox}(v_{GS} - V_{TH})$$

栅源过驱动电压 $V_{od} = V_{GS} - V_{TH}$ 决定的单位长度沟道电荷量

加控制电压可形成沟道

v_{GS} 很小时: 漏源无法形成沟道, 截止状态: **DS** 不导电

$v_{GS} = V_{TH}$ 时: 氧化层下方 **P** 型区的一层空穴全部耗尽

$v_{GS} > V_{TH}$ 时: 氧化层下方有电子的净累积, 形成反型层, 形成导电沟道

v_{GS} 高于 V_{TH} 越多, 沟道内累积净电荷越多, 电荷密度越大 (为了便于和金属电阻对比理解, 将其形象化为电子浓度为常数但导电沟道变厚了), 沟道内可移动电荷数目越多, **DS** 间电阻就越小, **DS** 电流就越大: 沟道是受控的电阻

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \begin{array}{l} \text{SiO}_2 \text{ 介电常数} \\ \text{SiO}_2 \text{ 厚度} \end{array}$$

栅氧层单位面积电容

Understanding:

阈值电压 V_{TH} 是决定能够形成沟道的因素: 可以理解为一种动态平衡, 当场效应不够强时无法形成有效的导电沟道, 但是当 V_{GS} 足够大后, 吸引来的电子就多于能够中和的空穴, 从而积累电荷, 形成导电沟道。

根据这个思路, 也能用电容电荷公式自然推出 (单位长度沟道) 积累电荷 (密度) Q_x

PS: 注意这里的

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

有 $\epsilon_{ox} = \frac{\epsilon}{4\pi k(WL)}$ ，理解为单位面积的电容

此时有 $Q_x = -WC_{ox}V_{od}$ ，其中 $V_{od} = V_x - V_{TH}$
 V_{od} 是OverDrive电压的含义。

- 沟道加压导电，电荷分布不再均匀：

沟道加压导电

沟道电荷分布不再均匀

$$Q_x(0) = -WC_{ox}(v_{GS} - V_{TH})$$

$$Q_x(L) = -WC_{ox}(v_{GD} - V_{TH})$$

$$Q_x(x) = -WC_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})$$

$$u(0) = 0$$

$$u(x) = ?$$

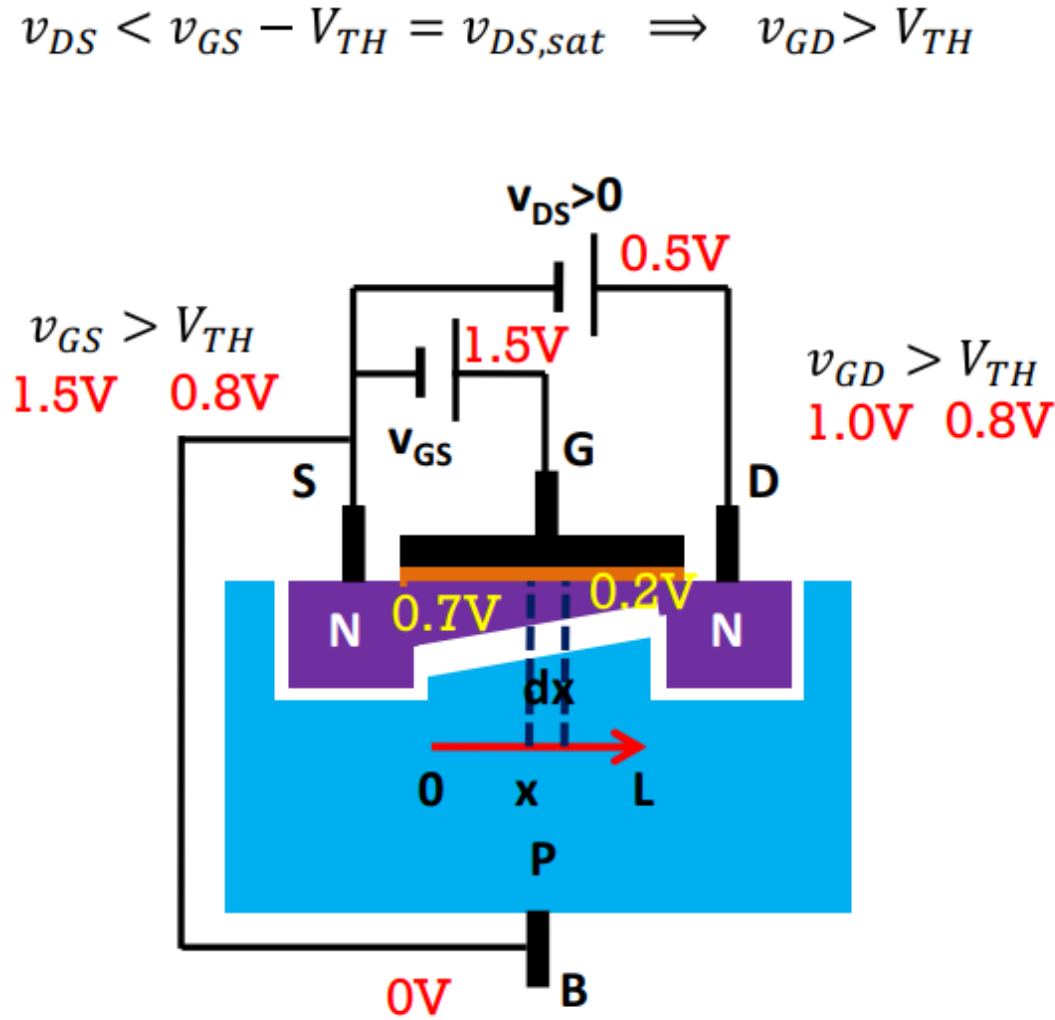
$$u(L) = v_{DS}$$

v_{DS} 电压作用下， dt 时间内， $[x, x+dx]$ 区域的电荷被移动到下一位置

$$dQ(x) = Q_x(x)dx$$

$$i_D = \frac{dQ(x)}{dt} = Q_x(x) \frac{dx}{dt} = Q_x(x)v(x)$$

$$i_D = -WC_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})v(x)$$



当外加的 V_{DS} (源漏电压) $< V_{DS,sat}$ 饱和电压时，此时 $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$ ，沟道未截断，但是电荷分布不再均匀（因为不同位置 V_{od} 不同）

加压导电，电流大小

$$v_{DS} < v_{GS} - V_{TH} = v_{DS,sat}$$

$$i_D = -WC_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})v(x)$$

$$v(x) = \mu E_x(x)$$

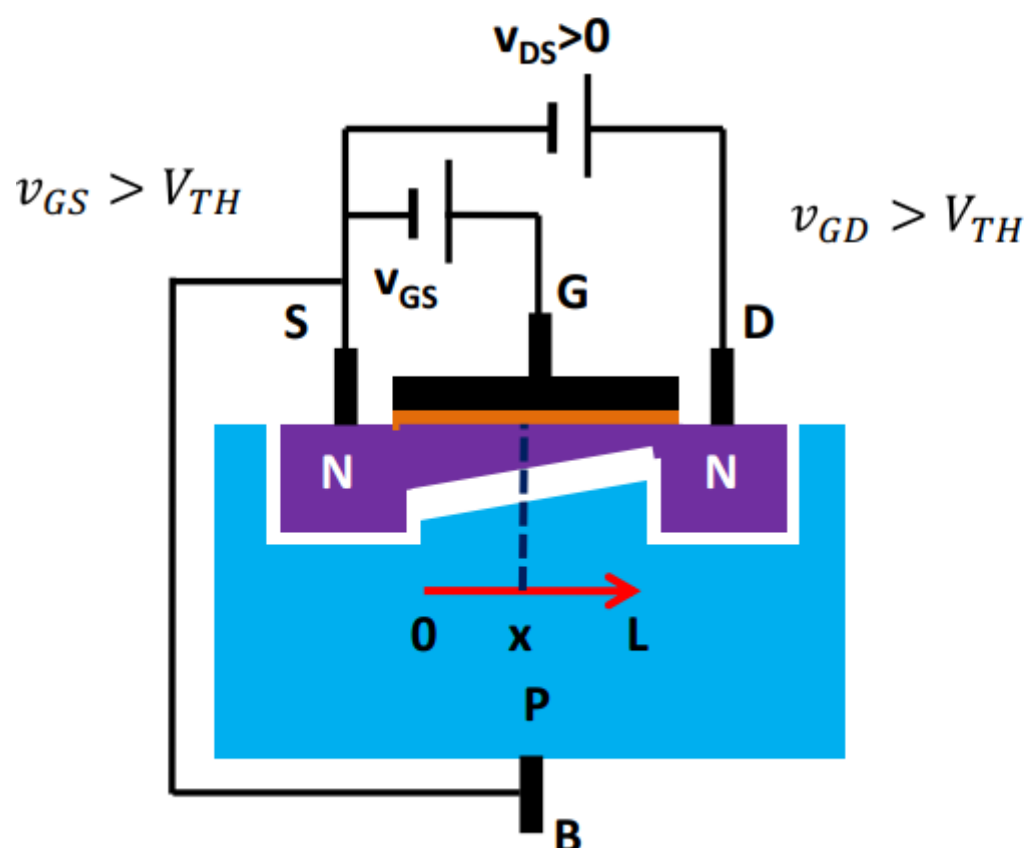
$$v(x) = v_e(x) = \mu_n E_x(x)$$

电荷运动速度等于载流子迁移率与电场强度之积

$$E_x(x) = -\frac{du(x)}{dx}$$

$$i_D = WC_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})\mu_n \frac{du(x)}{dx}$$

$$i_D dx = W\mu_n C_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})du(x)$$



欧姆导通非线性特性

$$v_{DS} < v_{GS} - V_{TH} = v_{DS,sat}$$

$$i_D dx = W\mu_n C_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})du(x)$$

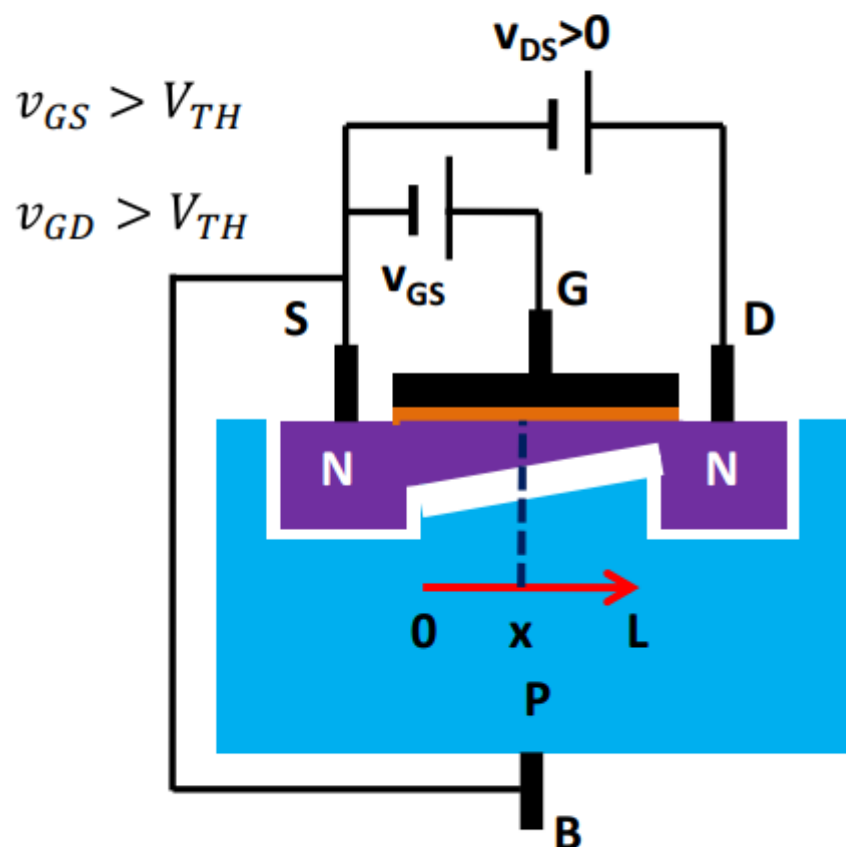
$$\int_0^L i_D dx = \int_0^{v_{DS}} W\mu_n C_{ox}(v_{GS} - u(x) - V_{TH})du(x)$$

$$\begin{aligned} i_D L &= W\mu_n C_{ox} \left((v_{GS} - V_{TH})u(x) - \frac{1}{2}u^2(x) \right) \Big|_0^{v_{DS}} \\ &= W\mu_n C_{ox} \left((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right) \end{aligned}$$

$$i_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right)$$

$$i_D = 2\beta_n \left((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right)$$

$$\beta_n = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$



经过计算可得：

$$i_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((v_{GS} - V_{TH}) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right)$$

$$i_D = 2\beta_n \left((v_{GS} - V_{TH}) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right) \qquad \beta_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

所以*i_D*和*V_{DS}*是二次函数关系（当*V_{DS}* < *V_{DS,sat}* = *V_{GS}* - *V_{TH}*时）

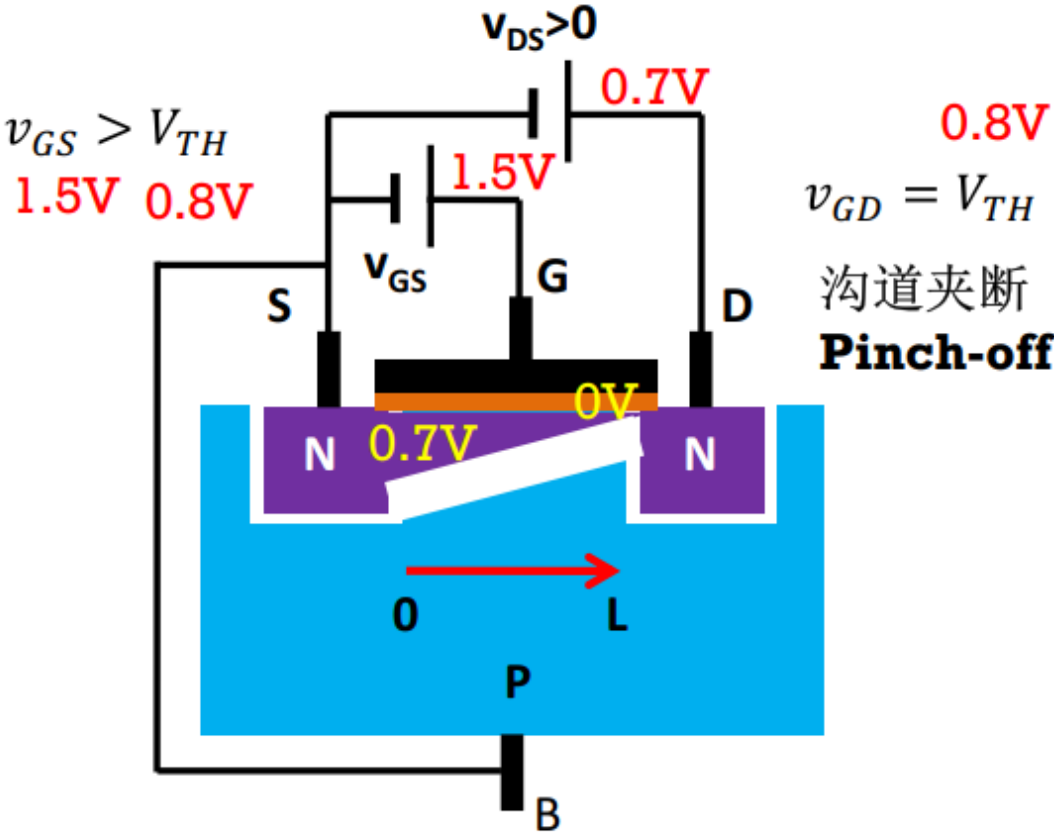
饱和区



欧姆导通的极限：沟道夹断

$$v_{DS} = v_{GS} - V_{TH} = v_{DS,sat}$$

$$i_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((v_{GS} - V_{TH}) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right)$$



$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TH})^2$$

$$i_D = \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\beta_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TH} = v_{DS,sat}$$

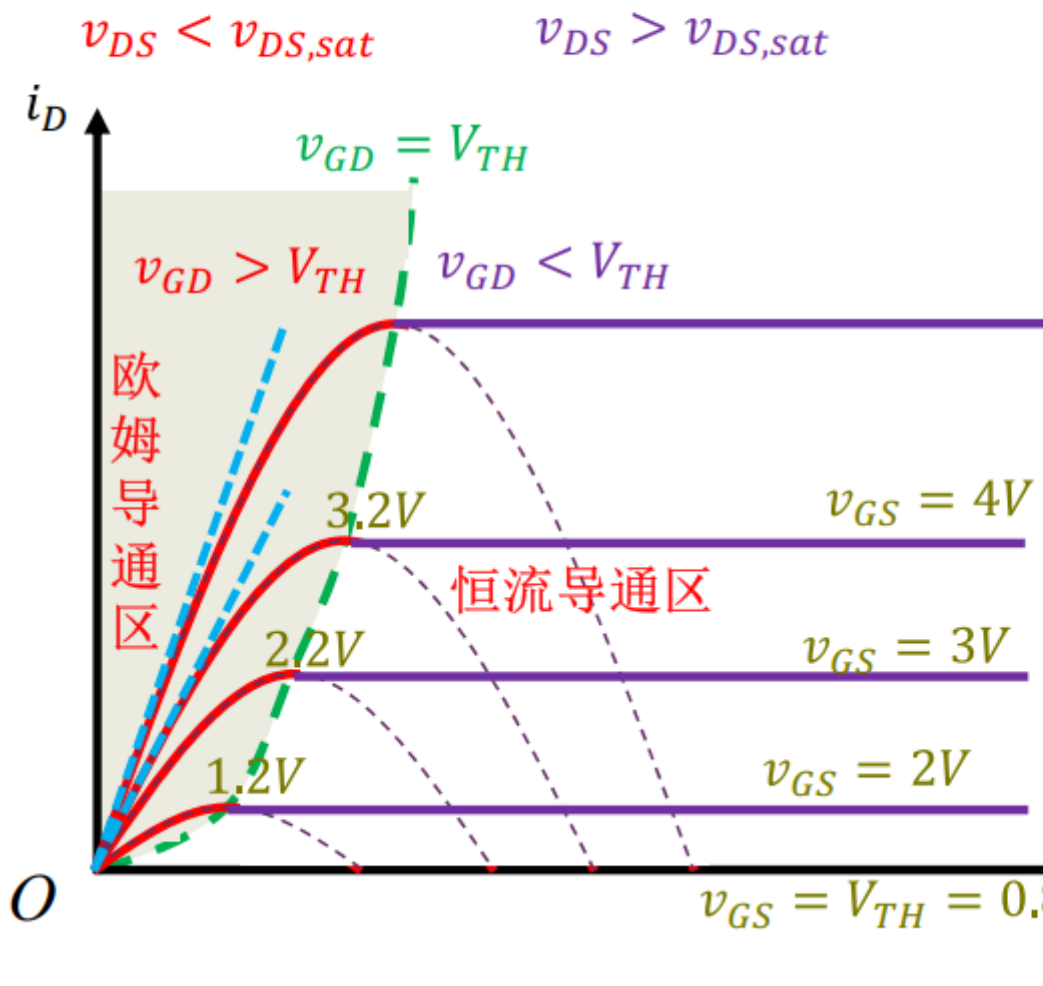
沟道夹断后仍然有电流（是因为电压吸引载流子形成漂移电流）

且此时电流几乎不变（有小幅上升：厄利效应）

饱和导通的恒流特性

$$v_{DS} = v_{GS} - V_{TH} = v_{DS,sat}$$

$$i_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2 \right)$$



$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TH})^2$$

沟道是受控的非线性电阻

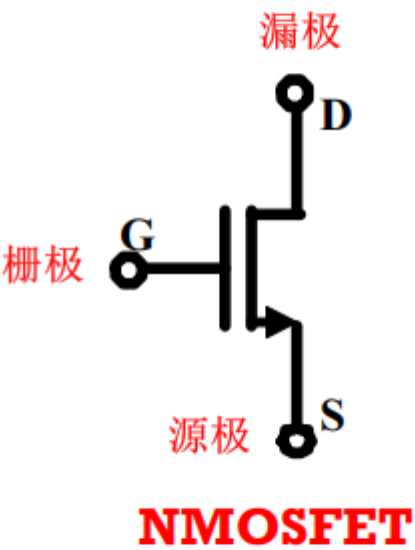
$v_{GS} > V_{TH}$ 导通区
 $v_{GS} < V_{TH}$ 截止区 $i_D = 0$

小结:

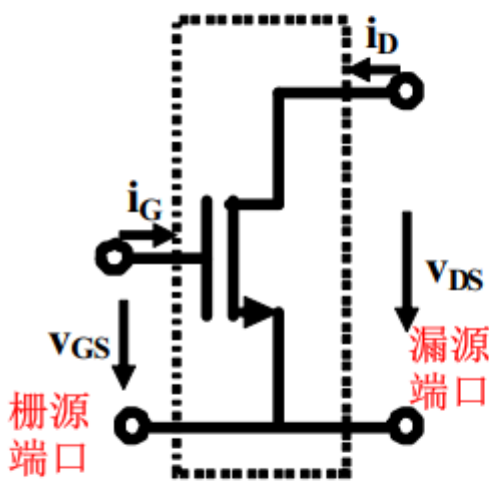
3

小结：受控非线性电阻特性

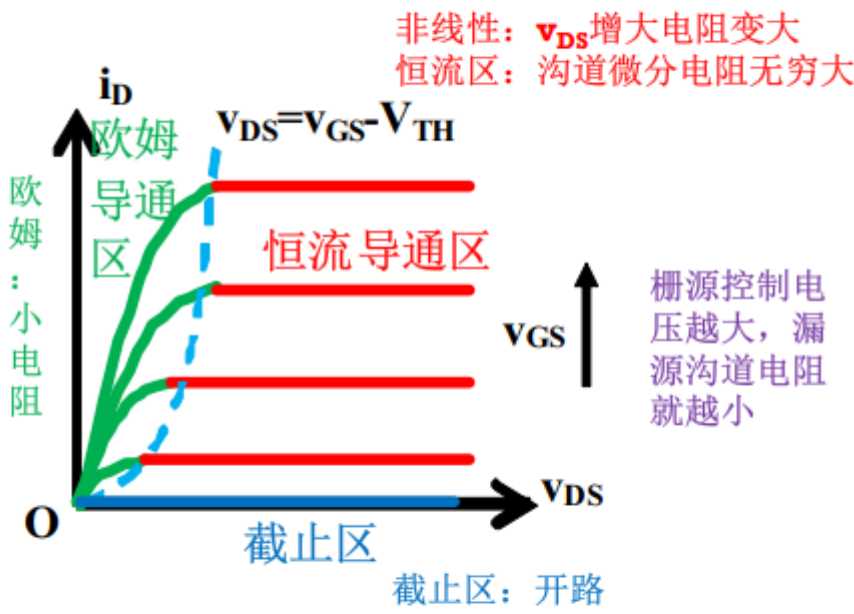
$$i_G = f_{iv,G}(v_{GS}, v_{DS}) = 0 \quad (1)$$



NMOSFET



CS组态
Common Source Configuration



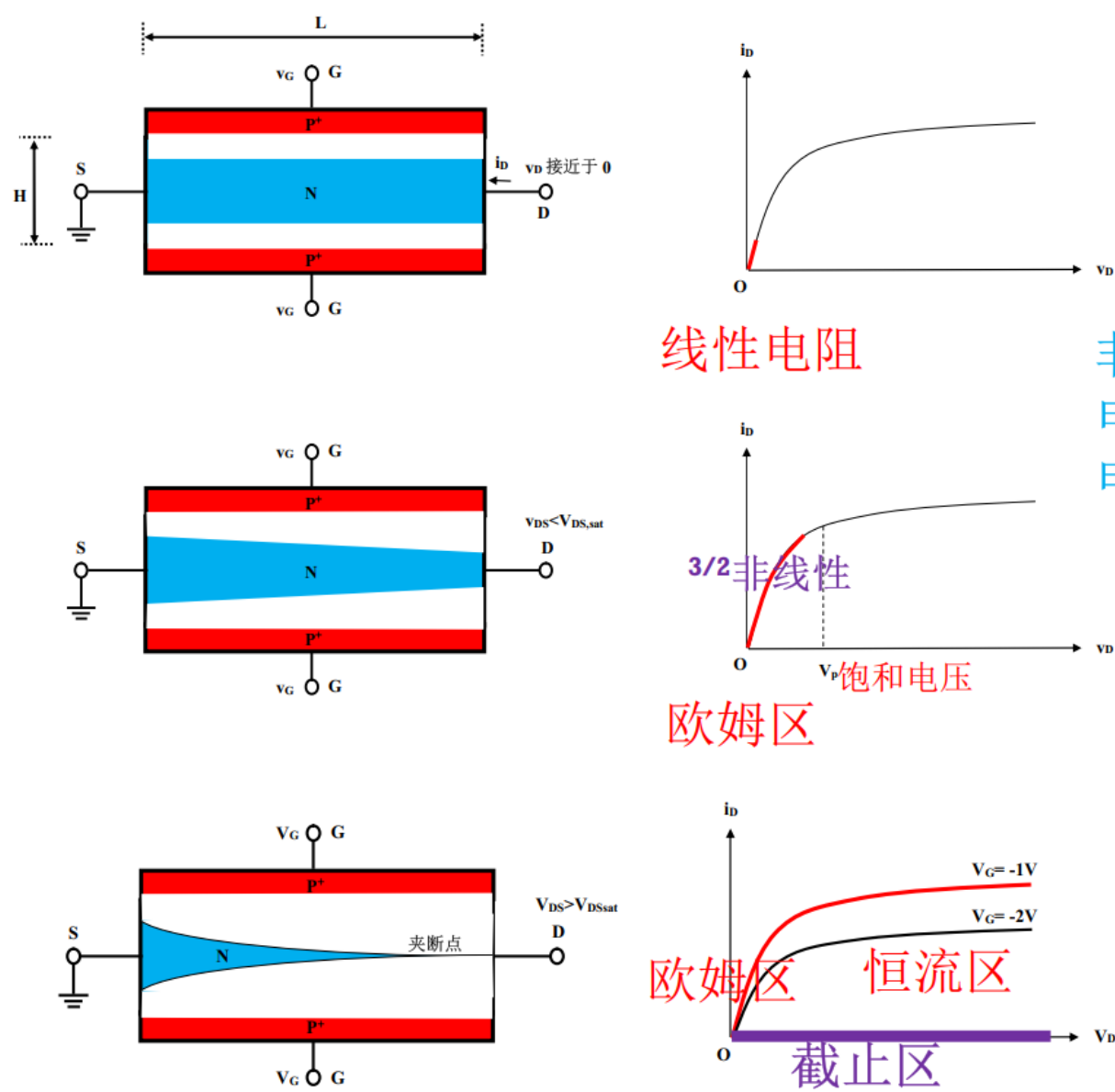
非线性： v_{DS} 增大电阻变大
恒流区：沟道微分电阻无穷大

栅源控制电压越大，漏源沟道电阻就越小

$$i_D = f_{iv,D}(v_{GS}, v_{DS}) = \begin{cases} 0 & v_{GS} < V_{TH} \\ \beta_n (v_{GS} - V_{TH})^2 & v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} > v_{GS} - V_{TH} \\ 2\beta_n ((v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - 0.5v_{DS}^2) & v_{GS} > V_{TH}, v_{DS} < v_{GS} - V_{TH} \end{cases} \quad (2)$$

根据 $G = \sigma \frac{S}{L}$ 可知，控制电阻可以通过控制电导率（电荷密度）、面积实现
对电导率 $\sigma = n\eta e$ 进行控制：可以通过控制电子/空穴浓度实现；
对面积控制可以通过控制导电通道厚度实现；

JFET：控制导电沟道厚度实现：

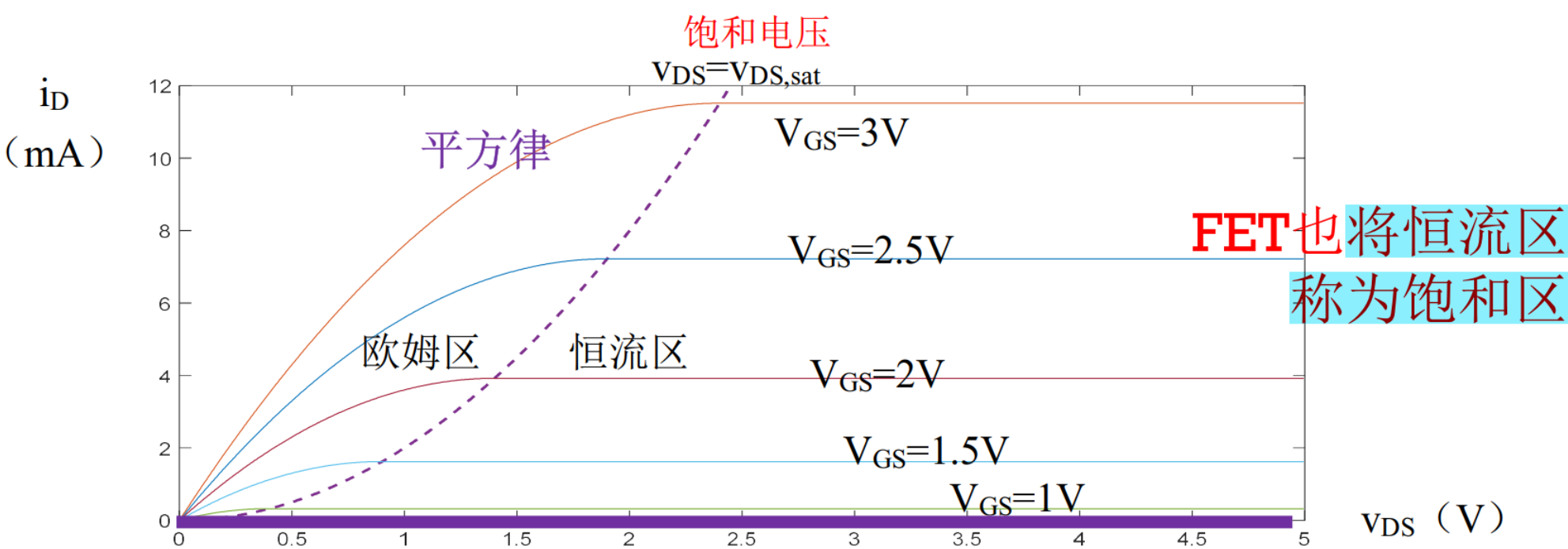


非线性电阻（电阻和漏源电压相关）
电子分布不均匀（漏端电压导致）
电场强度不均匀（漏端电压导致）

截止区：栅极电压很低，耗尽层占满，导电沟道消失

控制变量： V_{GS} ， V_{GS} 越高导电沟道厚度越大，电阻越小。
 V_{DS} 在小于 $V_{DS,sat}$ 时，随着其增大，导电沟道厚度不断减小，从而电阻增大，呈现 $3/2$ 次方的关系，当 $V_{DS} \geq V_{DS,sat}$ 时导电沟道夹断，达到恒流区。
PS：截止区，栅极电压很低，耗尽层占满，导电沟道消失。

MOSFET：导电沟道电荷密度控制方式



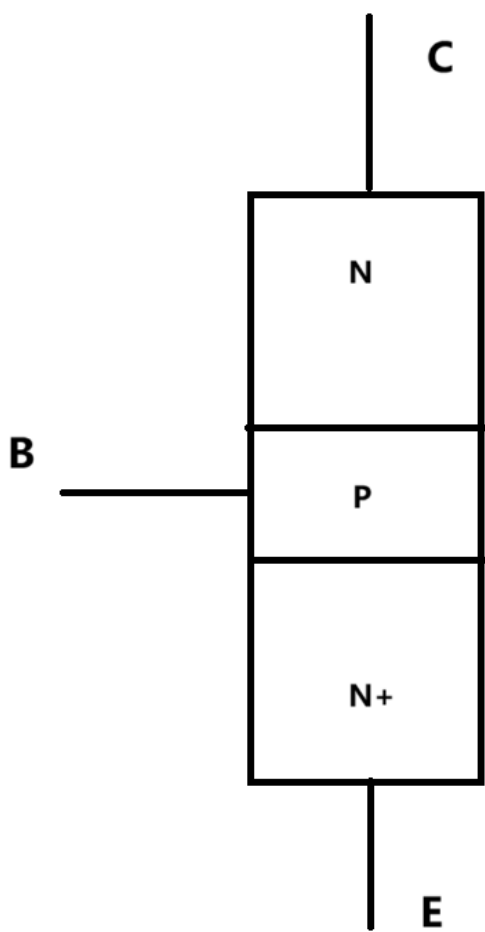
FET也将恒流区称为饱和区

截止区：栅极电压很低，反型层未形成，导电沟道未形成

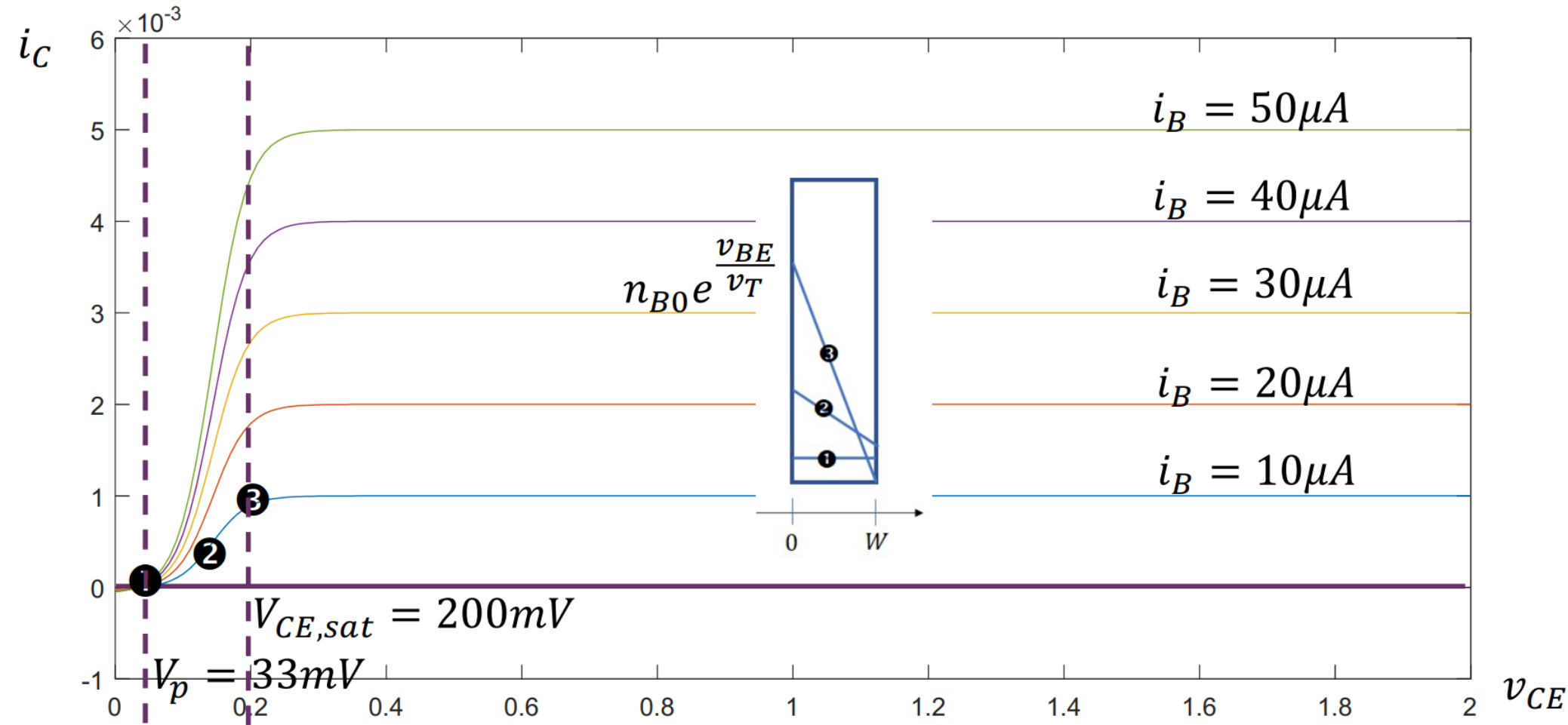
BJT：控制基区导电通道载流子浓度

NPN：控制电子浓度；PNP：控制空穴浓度
Bipolar Junction Transistor（双极结型晶体管）
E：Emitter，发射极

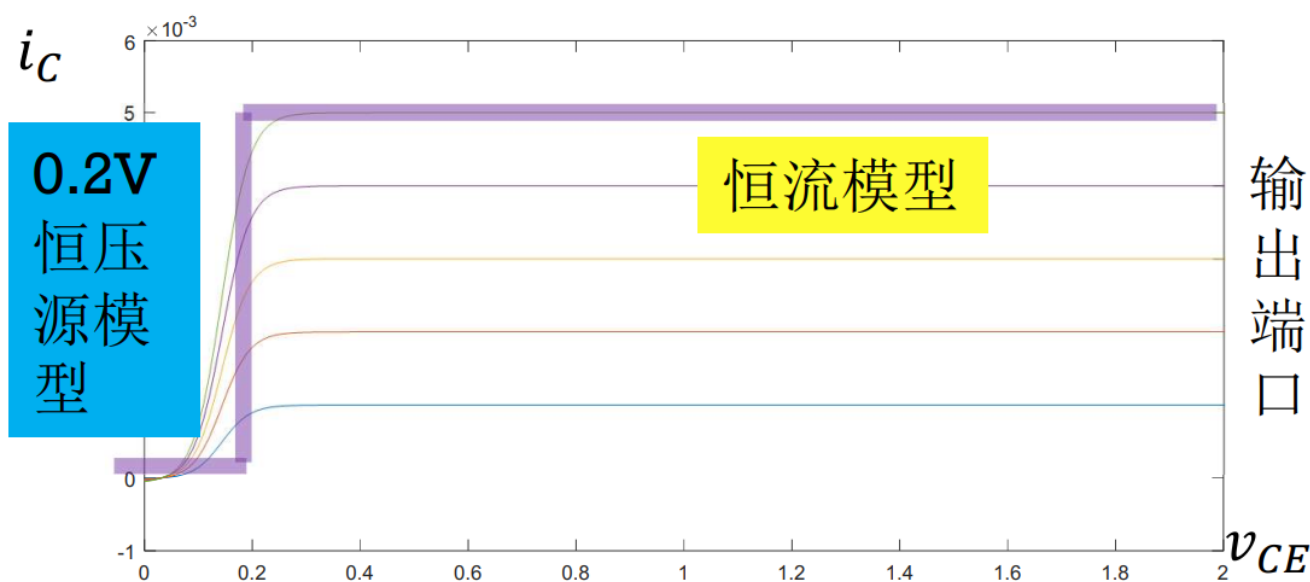
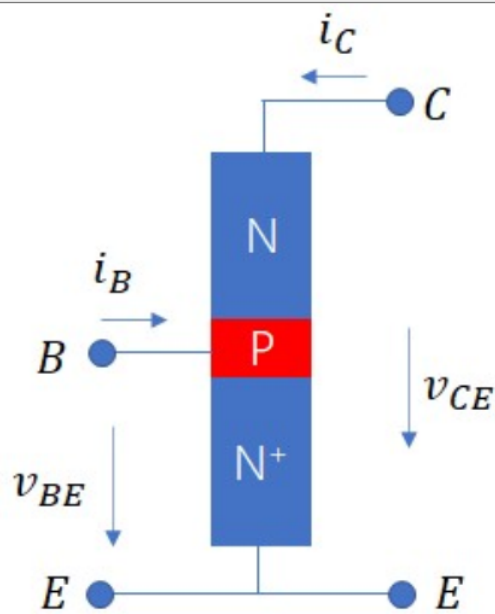
C: Collector, 集电极
B: Base, 基极



伏安特性曲线



以NPN-BJT为例分析：



以 i_B 为控制变量分析 i_C 和 V_{CE} 的关系：

- 当 V_{CE} 很大时，CB结反偏，BE结正偏，N+区注入P区的电子几乎全部通过，因此集电极电流几乎等于发射极电流 $i_E \approx i_C$ ，而发射极发射的电子少部分在基区复合，形成的基极电流与集电极电流近似成正比关系 $i_C = \beta i_B, \beta \gg 1$ 所以在有源区（恒流区） i_C 与 i_B 呈正比关系。（这也就是后面电流保持基本不变的原理）
PS：这个 $i_C = \beta i_B$ 也形成了一个流控流源结构。
- 当 V_{CE} 比较小时，0.7V时， $V_{CB} = 0$ ，未正偏导通，当 $V_{CE} = 0.2V$ 左右时， $V_{BC} = 0.5V$ 开始导通，导致这段 i_C 下降迅猛，而 V_{CE} 几乎维持0.2V不变，由于这个电压饱和特性，这段在BJT中被称为“**饱和区**”（注意分辨不同晶体管的饱和区含义）

晶体管受控非线性特性小结：

- 通过对导电通道实施控制，实现对电阻的控制
 - JFET：控制导电沟道的厚度（截面面积）
 - MOSFET：控制导电沟道内的电荷密度（NMOS：电子密度/PMOS：空穴密度）
 - BJT：控制基区（导电通道）的载流子浓度（NPN：电子浓度/PNP：空穴浓度）
- 导电通道两端电压很小时，导电通道内单位长度载流子数目几乎均匀，通道方向电场强度几乎均匀，呈现出线性电阻特性（原点附近小范围看，特性曲线近似为过原点的直线）
- 导电通道两端电压持续增加，导电通道漏端（BJT集电端）变薄/载流子浓度变低，导电通道内单位长度载流子数目不再均匀（漏端减少），通道电阻变大，电阻阻值随电阻两端电压变化，呈现出非线性电阻特性（通道方向电场强度不再均匀）
- 当导电通道两端电压增大到饱和电压时，漏端通道夹断，通道电流不再增加，进入恒流区 PS：由于夹断点随通道两端电压的增加而内移，通道等效长度变短，电阻变小，电流微增，从而特性曲线并非完全水平（恒流），而是微微上翘（厄利效应）

小结：晶体管

载流子

电子：N-JFET, NMOSFET, NPN

空穴：P-JFET, PMOSFET, PNP

- 无论是JFET、MOSFET，还是BJT，都是受控的非线性电阻
 - 用两个端口电压表述两个端口电流的导纳参量形式表述时，三种晶体管可以完全对应比拟
 - 可归总为导电通道内单位长度上的载流子数目受控于栅极（基极）电压：受控性来源
 - 单位长度上的载流子数目同时受控于导电通道两端电压：非线性来源
- 受控非线性电阻特性
 - 截止区：在栅极（基极）控制电压的某个范围内，没有导电通道（导电通道两端均断，通道内近似认为没有可导电的载流子）
 - 伏安特性：电流极小，抽象为0（开路）
 - 欧姆区：栅极电压的某个范围内，导电通道存在，且两端均通（BJT称之为饱和区）
 - 伏安特性：导电通道两端电压较低时，导电通道内单位长度载流子数目变化不大，导电通道近似呈现线性电阻的过原点直线伏安特性；随着导电通道两端电压持续升高，导电通道内靠近漏端（集电极端）的单位长度载流子数目降低，导致通道电阻变大，呈现出非线性电阻特性曲线：过原点曲线，且斜率随两端电压增大而越来越小（微分电阻越来越大）
 - 恒流区：存在导电通道，但漏端（集电极端）夹断（MOSFET称之为饱和区）
 - 伏安特性：导电通道两端电压升高至饱和电压时，导电通道漏端（集电极端）单位长度载流子数目趋于0，导电通道在漏端夹断，电流不再增加，呈现出恒流特性
 - 厄利效应：随着导电通道两端电压继续升高，漏端夹断点内移，导电通道等效长度变短，电阻变小，电流微增，故而恒流区伏安特性并非完全水平，而是微微上翘

NOTICE:

PMOS和NMOS是互补关系，考虑导电沟道的形成是MOS电容的作用，吸引了载流子：所以在NMOS中一定是G端是高电压，这样才能吸引到电子；同样的PMOS中G端一定是低电压这样才能吸引到空穴。