

■: 普通文本 ■: 强调文本 ■: 注释/吐槽 □: 强调用注释 [...]: 相关资料

■: 前置知识/解释 【较简单或非定量, 解答可能的疑惑和防止思路脱节/卡壳】

■: 并不重要但懂多点总归是好的 【通常较难且(应该)无需掌握, 偏牛角尖】

笔者也是大二学生, 同步学习中, 可能会有错漏, 请谨慎查看本文档。欢迎纠错~

本笔记旨在回顾整理难点和对一些细节刨根问底, 很多是额外的! 不过除了满足好奇心外, 它们对本课程的学习也是有帮助的, 毕竟理解不够深刻的应用只是无根之萍。

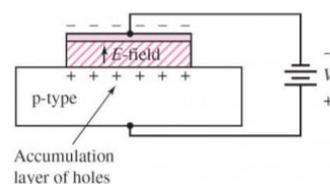
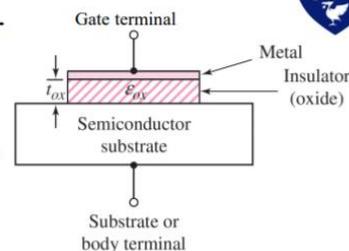
Week 3-4

MOS 管出现了((((° ㄟ °))))这是前 7 周最难的章节了, 快进到设计制作 CPU——(不)

MOS 管其实发现的比三极管早, 但三极管还是先发展起来了。后来 mos 管又取代了 3 极管, 因为它省电。

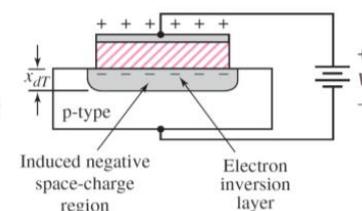
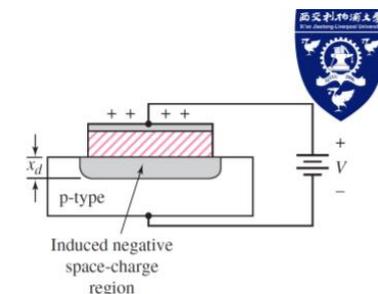
Two-Terminal MOS Structure

- The heart of the MOSFET is the metal-oxide-semiconductor **capacitor**
- MOS capacitor with a **p-type** semiconductor substrate
 - The top metal terminal is called the **gate**
 - **Holes** experience a force toward the oxide-semiconductor interface
 - **Positive charge** on the bottom “plate” of the MOS capacitor



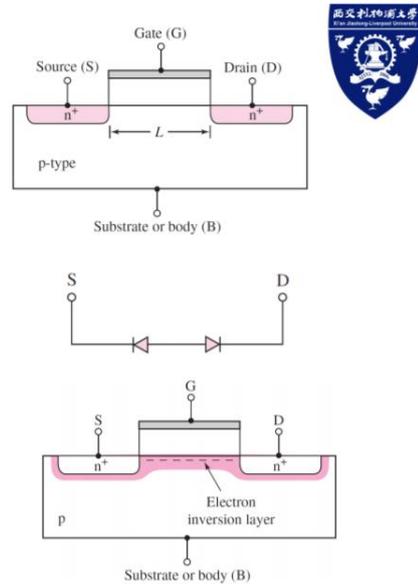
Two-Terminal MOS Structure

- A **positive** voltage is applied to the gate
 - Positive charges exist on the top metal plate
 - Holes are pushed away from the interface
 - A **negative** space-charge region is created
- With a larger positive voltage
 - Minority carrier **electrons** are attracted to the oxide-semiconductor interface
 - The **Electron inversion layer** is induced
 - The magnitude of the charge is a function of the applied gate voltage



Basic Transistor Operation

- With zero bias applied to the gate (G), the source and drain terminals are separated by the p-region
- Equivalent **back-to-back diodes** between source and drain when the transistor is in cutoff
- If a large positive gate voltage is applied
 - an **electron inversion layer** is created at the channel region
 - n-source to the n-drain are "connected"



可以看到，MOS管利用电场改变半导体在特定区域的性质，把p型n型相互转变，从而改变并控制其导电性。这种操作就和施工队在地上挖沟渠引水似的，所以我们管这叫“沟道”。

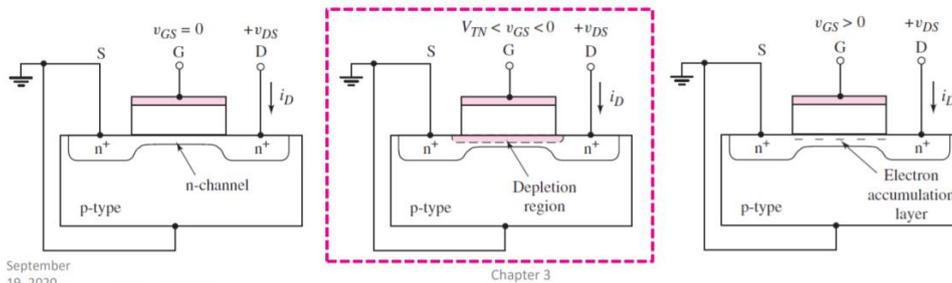
其中，沟道呈现出来的是什么型的性质，我们就叫它什么沟道。

比如上图，通过施加电压把原来的p型材料扯出了一个n型沟道，它就叫n沟道增强型MOSFET, **n-channel Enhancement-mode MOSFET**。

为什么叫“增强型(Enhancement-mode)”？因为还有一种“耗尽型(Depletion-Mode)”，它们是通过施加电压把造好的沟道抹消掉，和增强型

n-Channel Depletion-Mode MOSFET

- When a negative voltage is applied on the gate
 - A space-charge region is induced
 - The thickness of the n-channel region is reduced
 - The drain current is reduced
 - The drain current is zero when $v_{GS} = -V_{TN}$



n 沟道耗尽型 MOSFET

和三极管有 I_C , I_E , I_B 不一样，mos管的GS之间只有电压 V_{GS} ，没有电流。

接下来看看 mos 管 (nmos) 在电路中的表现:



I-V Characteristics

- Nonsaturation region or triode region

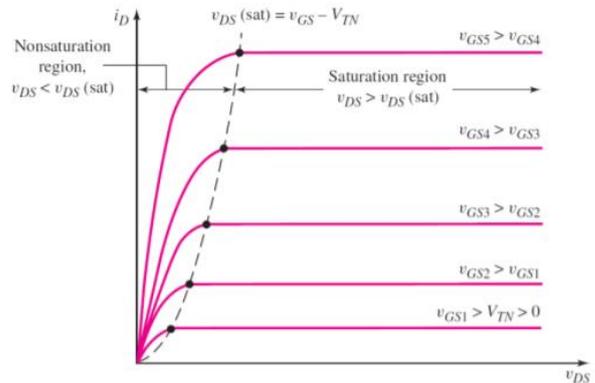
- $v_{DS} < v_{DS}(\text{sat})$
- $i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$

- Saturation point

- $v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_{TN}$

- Saturation region

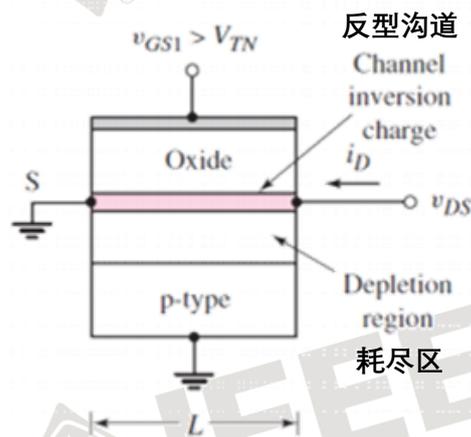
- $i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$
- K_n is the conduction parameter
- i_D is constant, independent of v_{DS}



可以看到 mos 管拥有以下性质:

- V_{DS} 控制 I_D (废话), 成正比
- V_{GS} 控制 I_D , 成正比
- V_{GS} 不变, V_{DS} 增加, I_D 增大, 存在饱和(最大) $I_D = K_n (V_{GS} - V_{TN})^2$
- $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TN}$ 时, I_D 达到饱和 (pmos 管是 $V_{DS} \geq V_{SG} + V_{TP}$)
- 非饱和电流 $I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{TN})V_{DS} - V_{DS}^2]$

其中, K_n 是“传导参数”。正好, 就让它带领我们康康 mos 管的物理细节罢!



首先要明白一件事:

MOS 管的核心结构是一个电容。

只不过有一边是半导体做的, 在充电时会生成沟道

比如左图, 在 V_{GS} 逐渐增加的过程中:

先是如同 pn 结一般形成耗尽区

再在最上方拉出一层反型层

于是最后形成反型层沟道—耗尽区—半导体的三明治结构。

好, 回过头来, K_n 的值是如何确定的呢? 有定义式: $K_n = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L}$ ($= \frac{k'_n W}{2L}$)

其中, μ_n 是反型层的多子迁移率, C_{ox} 是氧化物单位面积电容量, W 是沟道宽度, L 是沟道长度。

μ_n 越高, 反型层多子更易产生漂移电流; C_{ox} 越大, 反型层的多子浓度越高; 沟道越宽, 电阻越小; 沟道越长, 电阻越大。

所以 $K_n = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L}$ 很合理。至于底下那个 2，那是只是因为 $I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{TN})V_{DS} - V_{DS}^2]$ 后面那个系数 2 的补偿。

非饱和时的电流 $I_D = K_n [2(V_{GS} - V_{TN})V_{DS} - V_{DS}^2]$ ，挖藕，挺复杂神秘的。

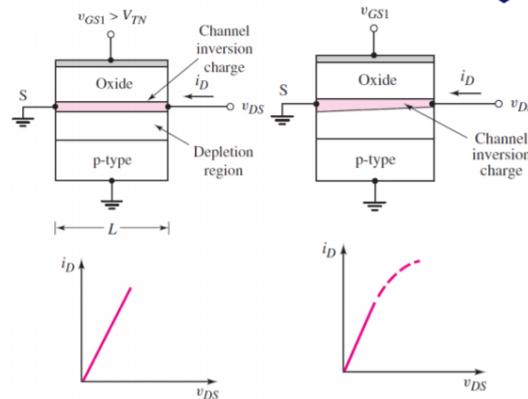
其推导分析将写在额外的 week3 摩斯风云 DLC 里。(因为不像二极管非常简单，mos 管本身就是比较复杂的东西，这些细节再写在一起就过于臃肿了)

不过，为什么 I_D 会饱和？——因为 V_{DS} 也会影响沟道本身。

I-V Characteristics: Triode Region



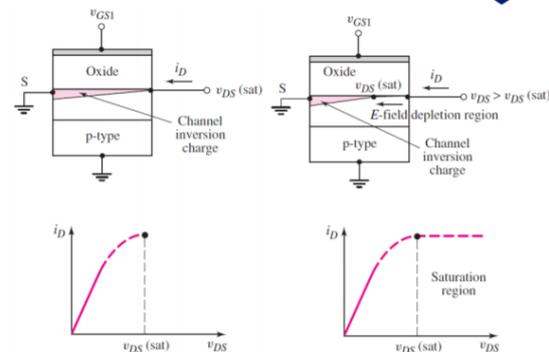
- When $v_{GS} > V_{TN}$ and a small applied v_{DS}
 - Constant thickness inversion layer
- As v_{DS} increases
 - The voltage drop across the oxide near the drain terminal decreases
 - The induced inversion charge density decreases
 - The incremental conductance decreases



I-V Characteristics: Saturation Region



- When $v_{DS} = v_{GS} - V_{TN}$
 - The induced inversion charge density at the drain terminal is zero (similar to the case when $v_{GS} = V_{TN}$)
 - The incremental conductance decreases
 - $v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_{TN}$
- When $v_{DS} > v_{DS}(\text{sat})$
 - Drain current i_D is constant
 - Saturated region



当我们在沟道两侧施加电压 V_{DS} ，沟道的深度即刻发生变化。一开始还不明显，然后呈现梯形，电流 I_D 增长变慢；最后三角形，另一头直接没有沟道了， I_D 的增长也就到头了——饱和。

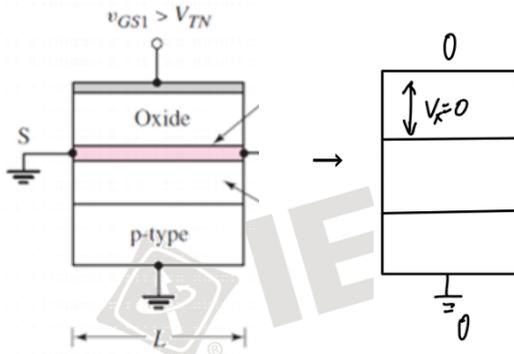
为什么最后一侧沟道都没了还能导电？不是有了沟道才能通路吗？

其实这里是动态平衡。和本来两侧没有电压也没有沟道不一样，这里的沟道消失是有电压和电流前提的。比如一块电阻，它不可能没有电流两侧却有电压。在这里，反型层消失是因为载流子在 V_{DS} 影响下快速移动，以至于没有多余电子/空穴留下来形成反型层。

至于为什么 I_D 达到饱和时的 $V_{DS} = V_{GS} - V_{TN}$ 这样一个看上去巧的不行的取值？其实也能解释。

首先再强调一件事：**MOS 管的核心结构是一个电容。**

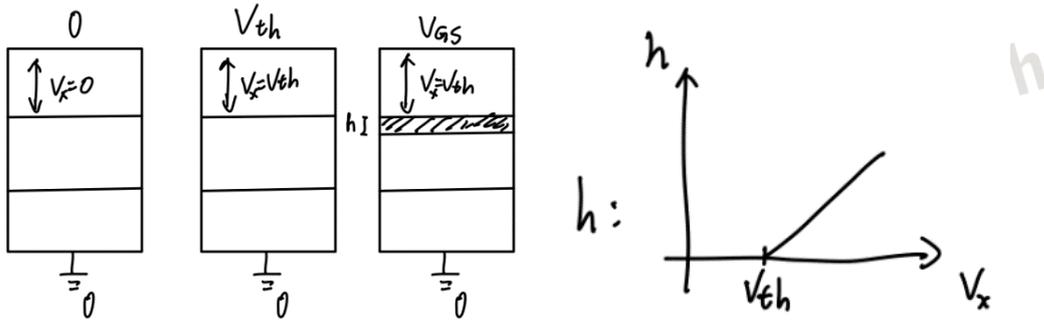
而对于电容，两端的电势差才重点。



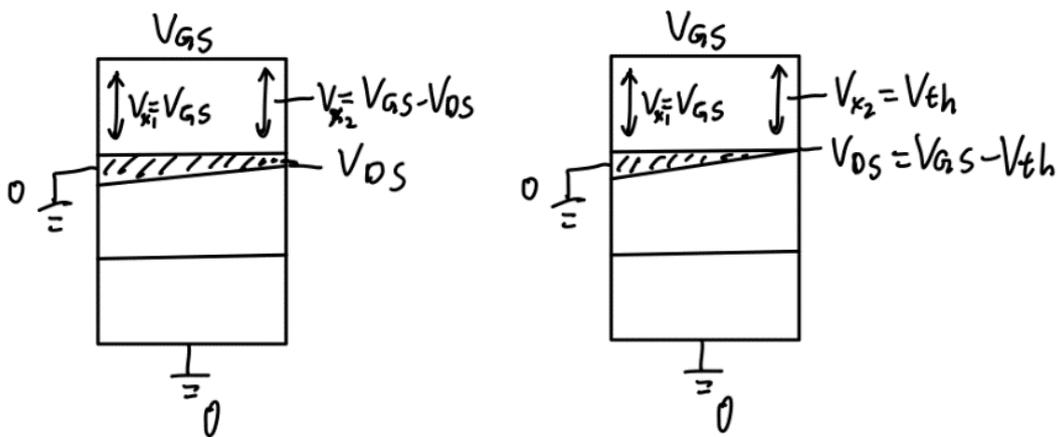
设 mos 管氧化物(电容)两端电势差为 V_X

则左图 $V_X = V_{GS} = 0$

当我们逐步增加 $V_{GS} \downarrow$ ，可以发现，只有当 V_X 超过阈值电压 V_{TN} (画图时错写成 V_{th} 了)，反型层沟道才会出现。其深度 h 和 V_X 的粗略关系如右图：



那么，当我们再加上横向的 V_{DS} ，由于左右两端电压不同，从左到右的 V_X 也随之变化。



这样一看，饱和临界点在哪我就不用多说了吧？

如右图，当最右 $V_X = V_{TN}$ ， $V_{DS} = V_{GS} - V_{TN}$ ，反型层开始消失， I_D 不再增长，mos 由此管进入饱和状态。

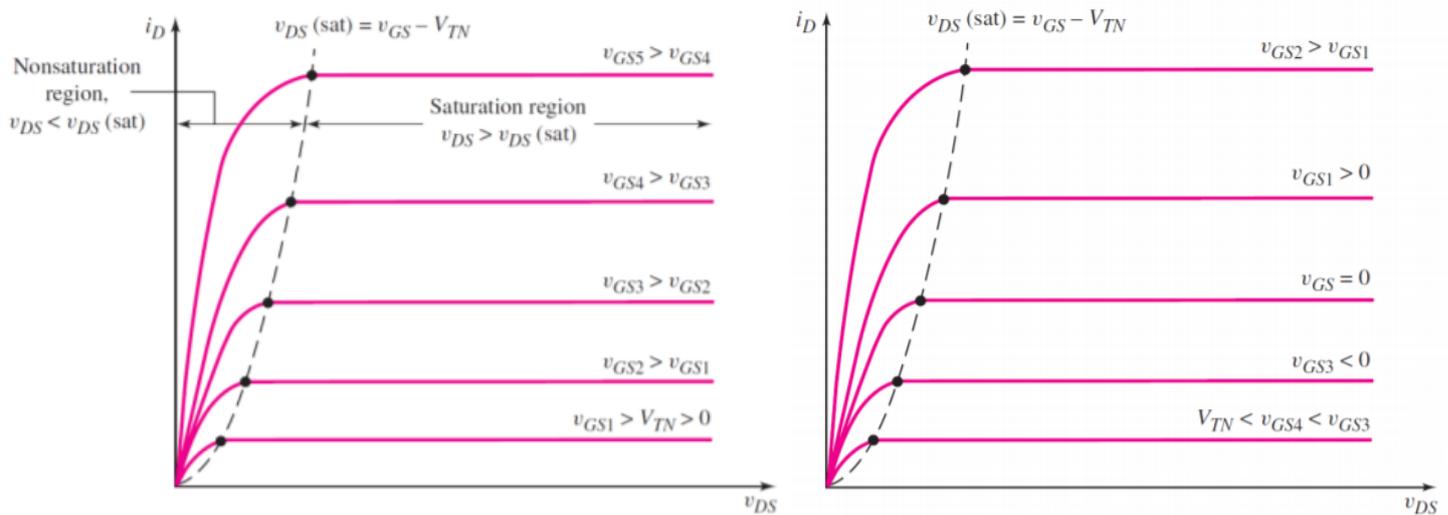
所以， $V_{DS} = V_{GS} - V_{TN}$ 的临界点不是巧合，而是必然。

nmos 和 pmos 的式子是相通的，只是符号略有不同。本文档在写某公式时只会拿其中一种使用，另一种同理就行。

耗尽型 MOS 管

而对于耗尽型和增强型，其区别在于其 V_{TN} 不同和电路符号不同。但其电流计算公式是相同的。这是因为，公式中的重点是 V_{GS} 和 V_{TN} 的关系。

为了统一理解耗尽型和增强型的情况，可以理解为耗尽型提前内置了一个 V_{GS0} ，当外加 $V_{GS} = 0$ 时，反型层依然存在，只有当外加 $V_{GS} < 0$ 乃至抵消掉内置的反型层才可以。如果把此时的 V_{GS} 记作 V_{TN} ，那么其作用就和增强型相同了：比较 V_{DS} 和 $V_{GS} - V_{TN}$



←增强型和耗尽型→

比较二者，可以进一步理解二者的差别与共同点

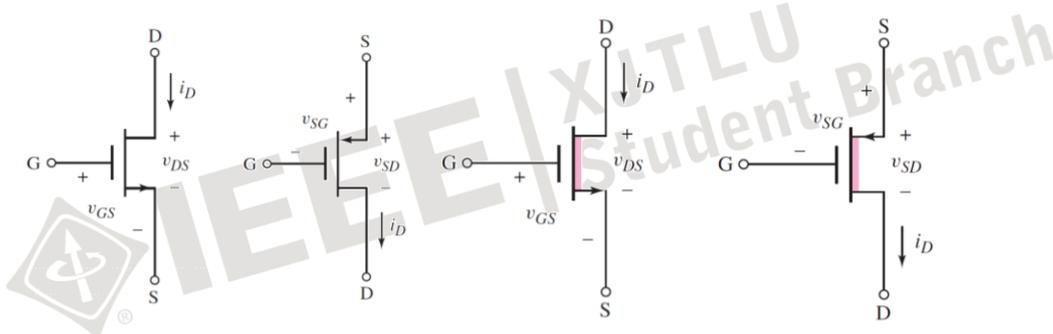
电路符号：

增强型 nmos

增强型 pmos

耗尽型 nmos

耗尽型 pmos



……这区别还挺微妙的是吧(°▽。)

不管是耗尽型还是增强型，它们的各种状态和相应的 V_{DS} 和 V_{GS} 在PPT上都可以用以下表格做总结：

Summary of Transistor Operation



Summary of I - V Characteristics

	NMOS	PMOS
Nonsaturation region	$v_{DS} < v_{DS}(\text{sat})$ $i_D = K_n[2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$	$v_{SD} < v_{SD}(\text{sat})$ $i_D = K_p[2(v_{SG} + V_{TP})v_{SD} - v_{SD}^2]$
Saturation	$v_{DS} > v_{DS}(\text{sat})$ $i_D = K_n(v_{GS} - V_{TN})^2$	$v_{SD} > v_{SD}(\text{sat})$ $i_D = K_p(v_{SG} + V_{TP})^2$
Transition	$v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_{TN}$	$v_{SD}(\text{sat}) = v_{SG} + V_{TP}$
Enhancement mode	$V_{TN} > 0$	$V_{TP} < 0$
Depletion mode	$V_{TN} < 0$	$V_{TP} > 0$
Turn-on Gate voltage	$v_{GS} > V_{TN}$	$v_{GS} < V_{TP}$

October 6, 2020

Chapter 3

31

非常的清晰，非常的美味

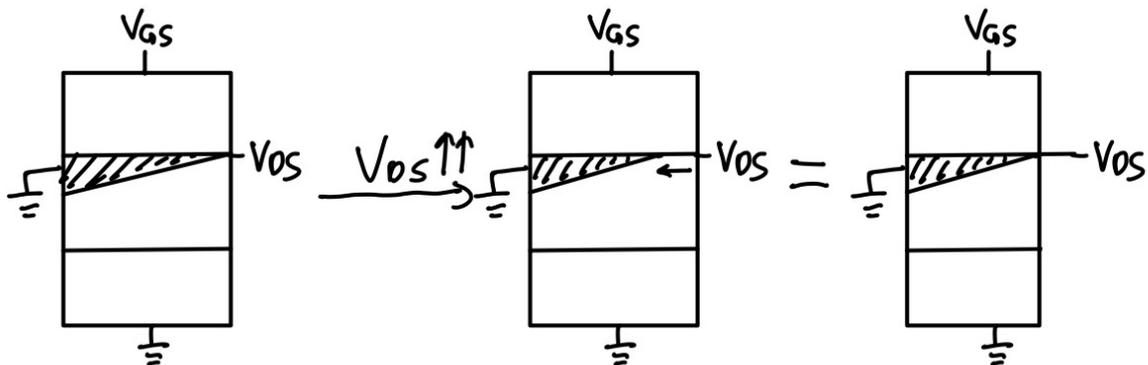
Finite Output Resistance 【饱和区(限定)输出电阻】

众所周知，EEE109里充满了理想与现实的落差(?)比如mos管的饱和电流，说好的不再变大，可谁知道它居然会偷偷增长！

怎么会这样呢？

原来，当 V_{GS} 达到饱和临界点继续增长，那个“沟道三角形”的尖头位置会慢慢左移！

而这意味着右边有一段其实根本没用，沟道的长度 L 缩短了！



根据 $K_n = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L}$ ， L 变短， K_n 变大， $I_D = K_n(V_{GS} - V_{TN})^2$ 也就变大了！

这即是——沟道长度调制。

这个效应虽然是让电流变大了，但本来电流应该不变的(“电阻”无穷大)，所以实际上这个效应带来了一个输出电阻 r_o ，其值为饱和后变化的电压与其引起的电流的比值：

Finite Output Resistance



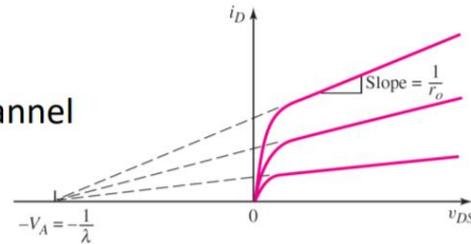
$$i_D = K_n[(v_{GS} - V_{TN})^2(1 + \lambda v_{DS})]$$

- $1 + \lambda v_{DS} = 0$, when $i_D = 0$

$$-v_{DS} = V_A = \frac{1}{\lambda}$$

- The output resistance due to the channel length modulation is defined as:

$$r_o = \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right)^{-1} \Big|_{v_{GS} = \text{constant}}$$



其中 λ 是沟道长度调制参数。

由图知 $V_A = \frac{1}{\lambda}$ ，这也是个人为规定的东西。

于是对于某点 Q, $r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{\lambda K_n (v_{GSQ} - V_{TN})^2} \approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{V_A}{I_{DQ}}$

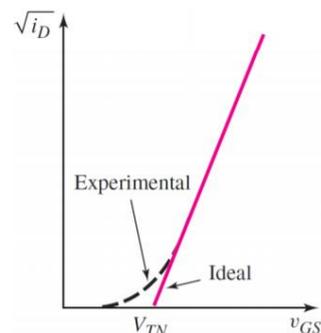
r_o 是 MOSFET 小信号等效电路的一个元素，之后似乎会用到。

理想与现实的落差当然不止在饱和区有，阈值电压附近也是如此。

Subthreshold Conduction



- For the n-channel MOSFET biased in the saturation region, $i_D = K_n(v_{GS} - V_{TN})^2$
 - $\sqrt{i_D} = \sqrt{K_n}(v_{GS} - V_{TN})$
 - $\sqrt{i_D}$ is a linear function of v_{GS}
- i_D is not zero, when v_{GS} is slightly less than V_{TN}
 - Subthreshold current
 - Significant power dissipation in the integrated circuit



这一幕好像在许多地方似曾相识呢(° ▽ °)……知道就好

结场型效应晶体管

出了之前详细介绍的 MOSFET，人类科技里其他的晶体管物种也出现了！

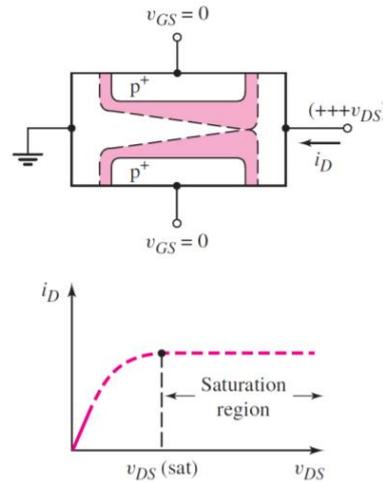
结场型效应晶体管可分为两种：PN 结 FET (PN JFET) 和金属-半导体 FET (MESFET)

课上就讲了 PN JFET。

I-V Characteristics for Zero Gate Voltage



- As v_D increases further
 - The channel is **pinched off** at the drain terminal
 - Drain current will not increase
 - Drain voltage at pinchoff is $v_{DS}(\text{sat})$
- For $v_{DS} > v_{DS}(\text{sat})$
 - The transistor is biased in the saturation region
 - i_D is independent of v_{DS}



相信你现在只需要看到上面这张图就能自行脑补出 JFET 的增长，夹断，饱和了。

值得注意的是，JFET 中上下两层是同接的 V_{GS} ，电压差是由 V_{DS} 产生的。

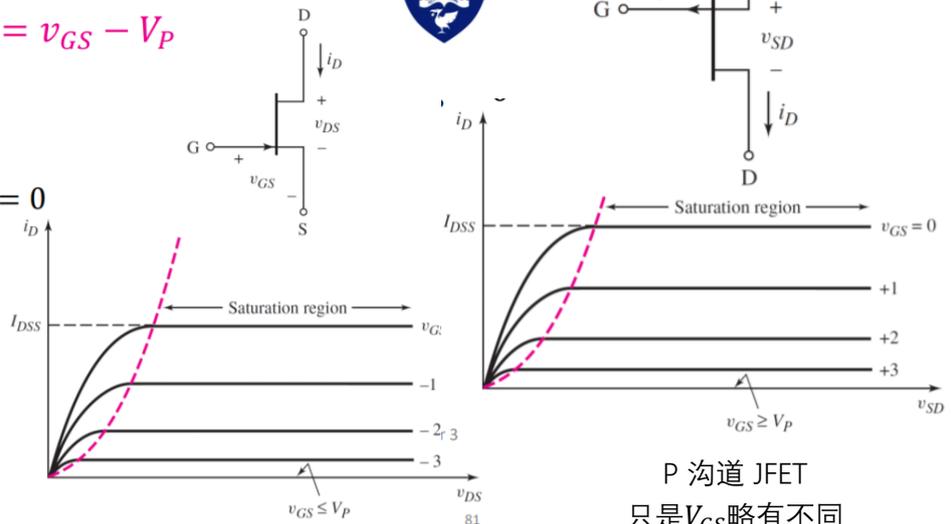
I-V Characteristics for n-channel JFET



- In saturation region, $v_{DS} > v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_P$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2$$

- I_{DSS} is the saturation current when $v_{GS} = 0$
- V_P is the **pinchoff voltage**
- $V_P < 0$
- $v_{GS} < 0$



P 沟道 JFET
只是 V_{GS} 略有不同

V_P 是夹断(饱和)电压。

其中， $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$ 这个公式看着神秘，其实不过是把类似 $I_D = K_n(V_{GS} - V_{TN})^2$ 的公式变形， $I_D = K_n V_{GS}^2 \left(1 - \frac{V_{TN}}{V_{GS}}\right)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{TN}}{V_{GS}}\right)^2$ ，和二极管理论异曲同工。

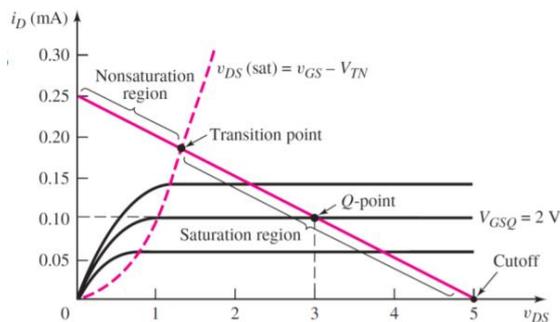
MOSFET 电路直流分析

小小 mos 管我们已经研究的差不多了，该上电路了。不过其实，只要理解了以上原理与公式，胜利早已握在你手里——我们现在的电路还很简单，没啥弯弯绕绕的。

如果嗯要说有什么要点……

- 1, 先分析 V_{GS} ，它是决定了 V_{DS} 会如何发挥作用。
- 2, 再分析 V_{DS} ，它决定了 MOS 管饱和与否。
- 3, 若无法直接分析，KVL, KCL, 戴维南等效电路伺候。
- 4, 再不济，截止，放大，饱和，就仨状态，试试看。

PPT 里有很多这种图：



如若看不懂，就老老实实对着电路一步步分析电压电流。算好了回过头来对照，你会发现其实很直白，看着好像挺高级，其实里头的东西还是要自己算。

好，那么，我们的 week3-4 的笔记就到此为止了，感谢各位观看。

接下来是 week5 了，敬请期待 °▽°σ

相信本文档会多有错漏与不足，也请各位看官 dalao 与我们交流提问纠错指正。

……交流渠道……



西浦科协唯一指定关注二维码

你可以把文档相关的问题发给公众号，我们会及时查看回复。

[本章无 source]

2020.10.31 醜坦