



Fundamentals of Microelectronics

الکترونیک ۲ - نیمسال دوم ۱۳۹۹

مرجع: مدارهای میکروالکترونیک (ویراست پنجم)، تالیف: صدرا - اسمیت

Mohammad Ali Mansouri- Birjandi

Majid Ghardan

**Faculty of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)**

**mansouri@ece.usb.ac.ir ,
mamansouri@yahoo.com**



Chapter 6 Physics of MOS Transistors

- **6.1 Structure of MOSFET**
- **6.2 Operation of MOSFET**
- **6.3 MOS Device Models**
- **6.4 PMOS Transistor**
- **6.5 CMOS Technology**
- **6.6 Comparison of Bipolar and CMOS Devices**



دانشگاه پشاور

Chapter Outline

Operation of MOSFETs

- MOS Structure
- Operation in Triode Region
- Operation in Saturation
- I/V Characteristics

MOS Device Models

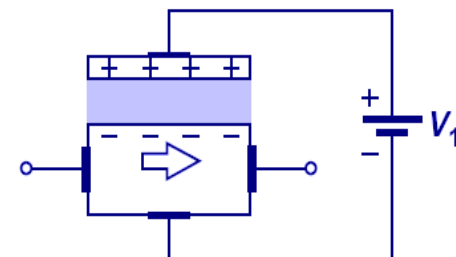
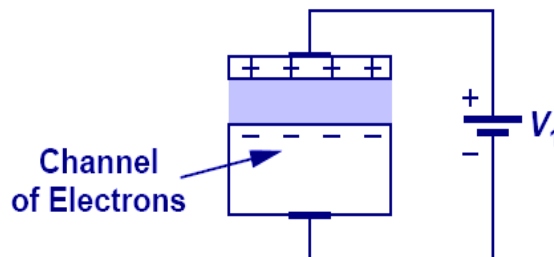
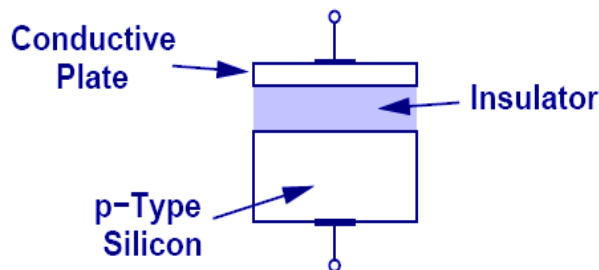
- Large-Signal Model
- Small-Signal Model

PMOS Devices

- Structure
- Models



Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Capacitor



□ برای رسیدن به ساختار «ماسفت» از یک شکل هندسی **خازن** ساده شروع میکنیم:

– یک صفحه رسانا (**فلز**، یا نیمه رسانای شدیداً ناخالص شده)،

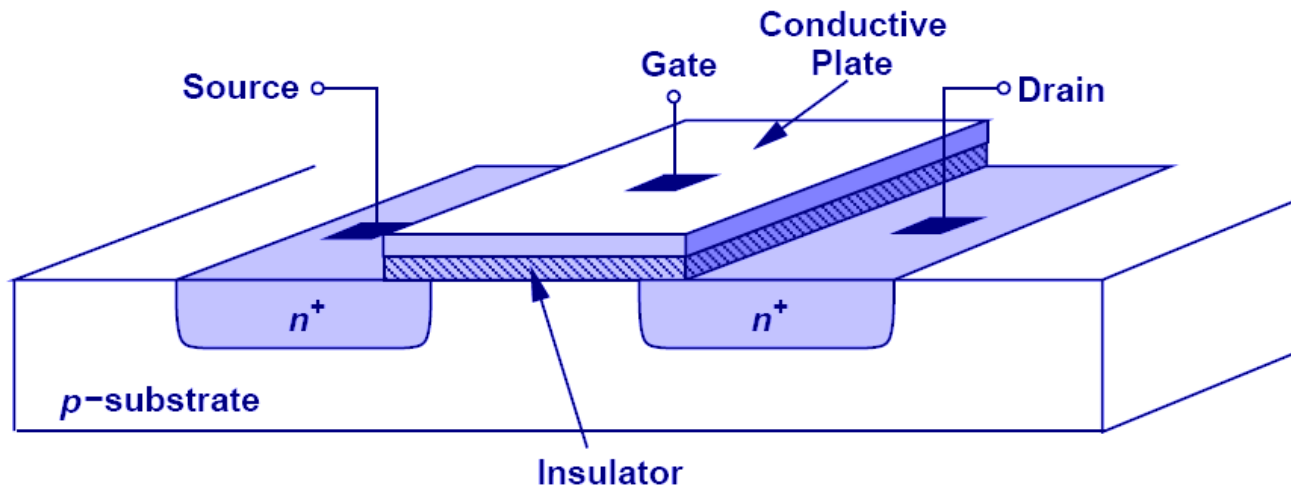
– یک **عایق** (دی الکتریک)،

– یک قطعه **نیم رسانا** (سیلیکون دارای ناخالصی)

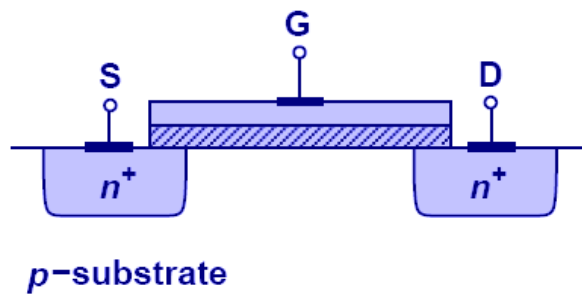
□ اگر **اختلاف پتانسیلی** اعمال شود، چه رخ میدهد؟



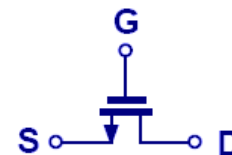
Structure and Symbol of MOSFET



(a)



(b)

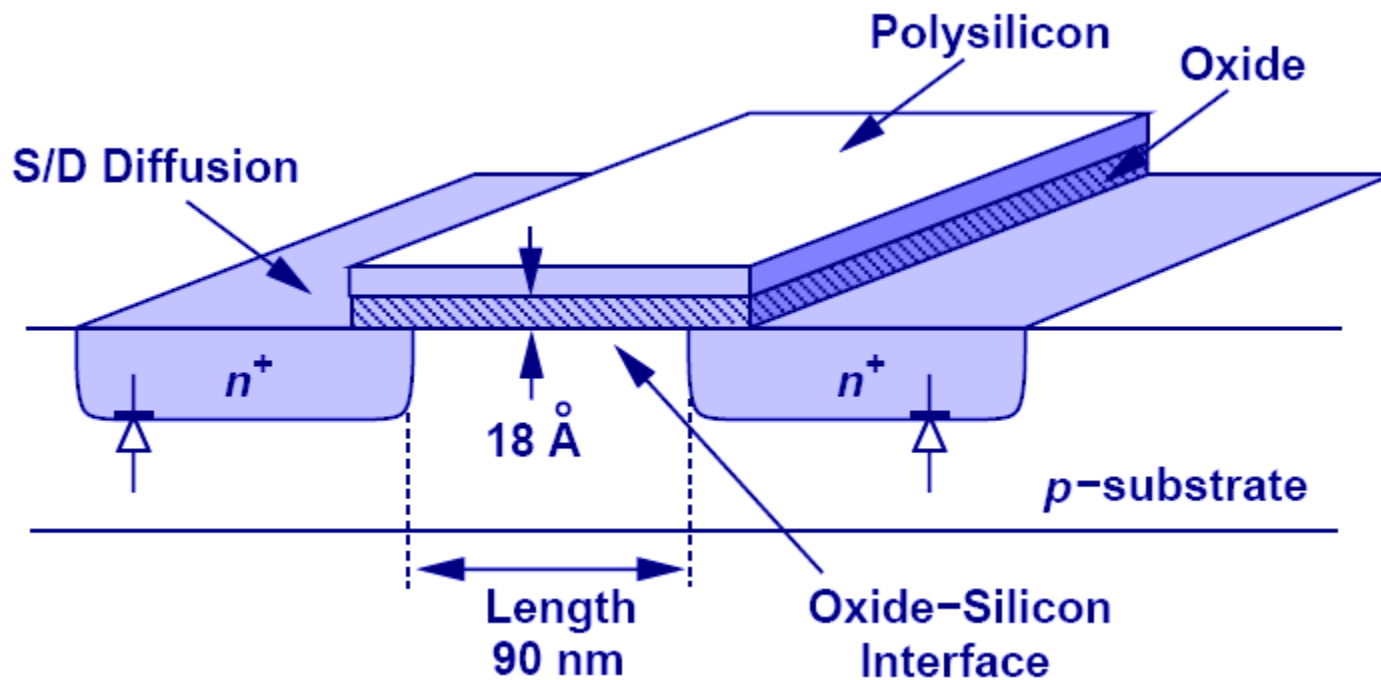


(c)

ساختار ماسفت از نوع مانال نوع n (NMOS)، نمای جانبی، و نماد مداری



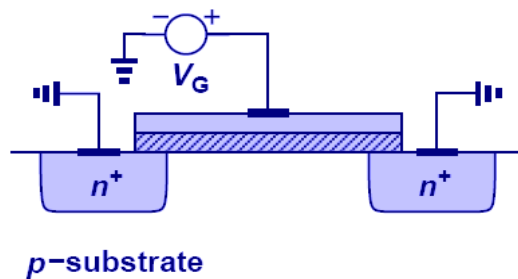
State of the Art MOSFET Structure



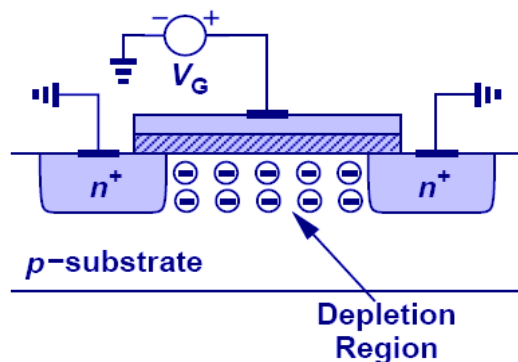
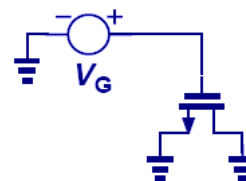
گیت ماسفت های امروزی از پلی سیلیکون، و عایق همان اکسید سیلیکون می باشد.



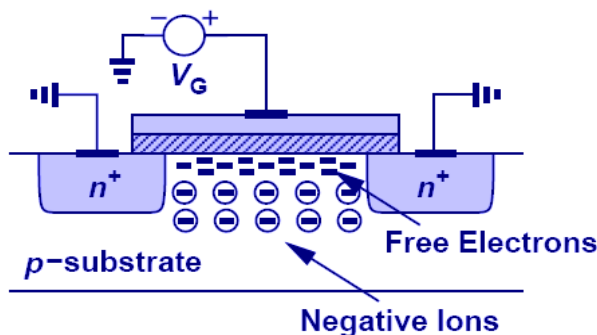
Formation of Channel



(a)



(b)

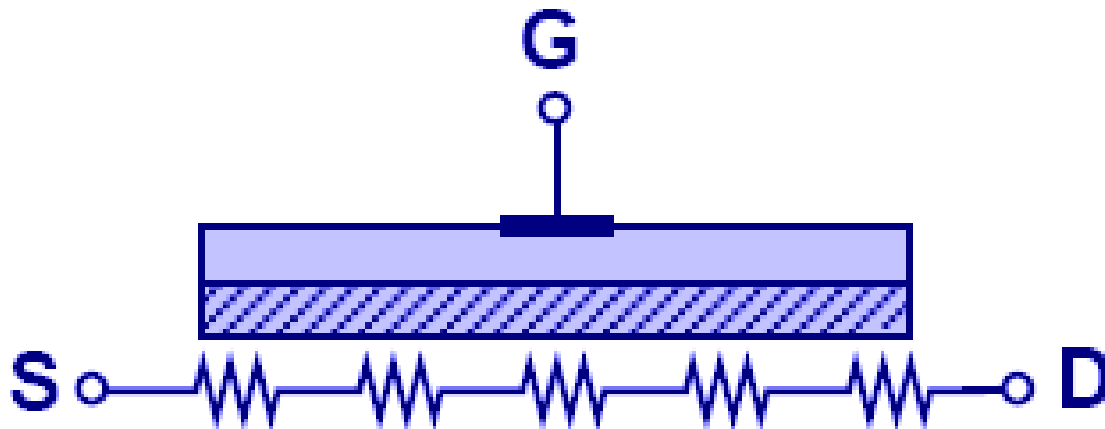


(c)

ابتدا حفره ها به سمت پایین کشیده میشوند: تشکیل ناحیه تهی و هنوز حالت خاموش بودن باقی است
سپس با افزایش ولتاژ گیت، الکترونهای آزاد به سمت مرز اکسید- سیلیکون، کشیده میشوند و یک کانال
رسانا تشکیل میدهند: ماسفت روشن میشود و حالت وارونه شدن ناحیه بستر در قسمت بالایی رخ میدهد



Voltage-Dependent Resistor

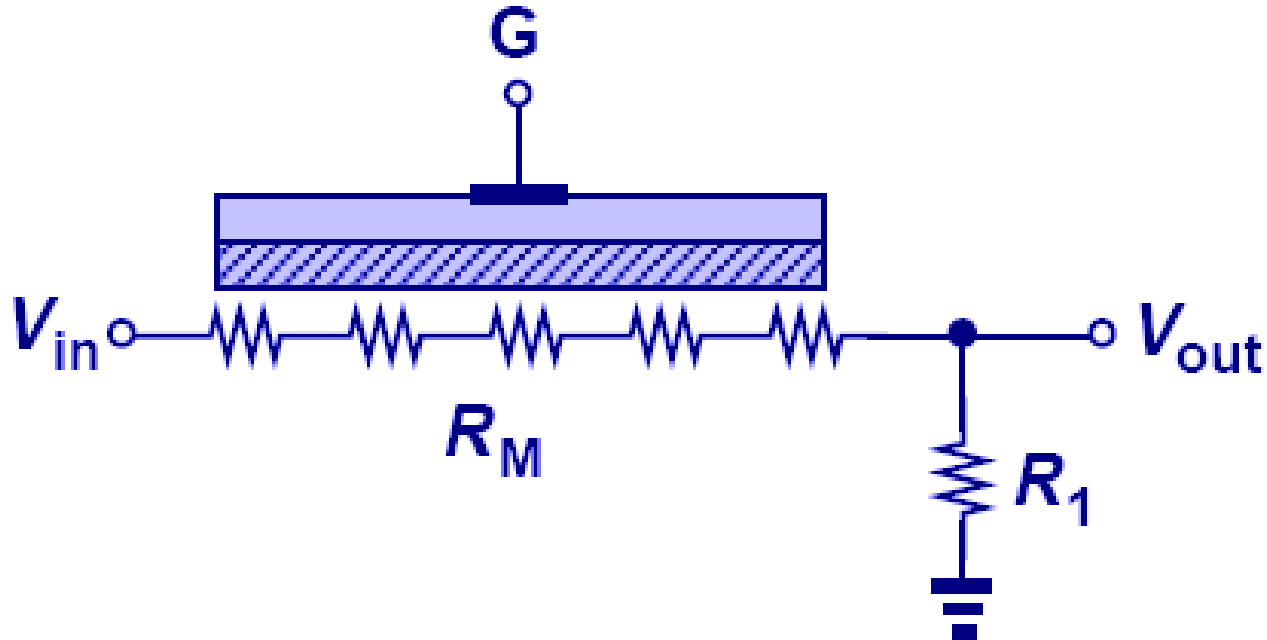


□ کانال وارونگی MOSFET را می توان به عنوان یک **مقاومت** مشاهده کرد.

□ چون **چگالی بار** داخل کانال به **ولتاژ گیت** بستگی دارد، این **مقاومت** نیز به **ولتاژ وابسته** است



Voltage-Controlled Attenuator



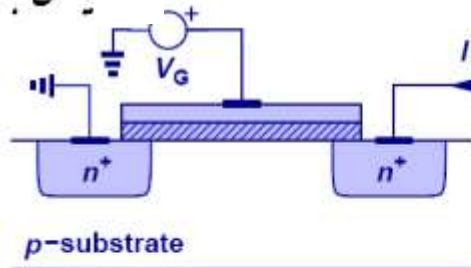
❖ با کاهش ولتاژ گیت، ولتاژ خروجی کاهش می یابد زیرا **مقاومت** کانال افزایش می یابد.

❖ این نوع **کنترل بهره** در تلفن های همراه کاربردی پیدا می کند تا از اشباع نزدیک ایستگاه های پایه جلوگیری کند.

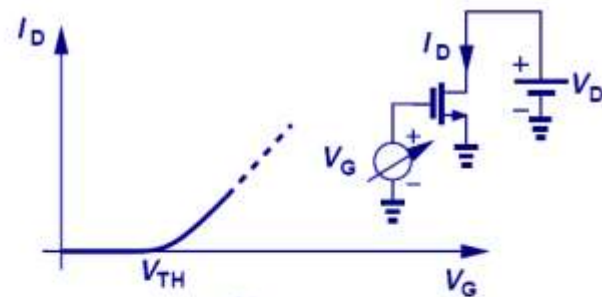
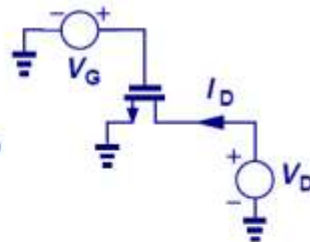


MOSFET Characteristics

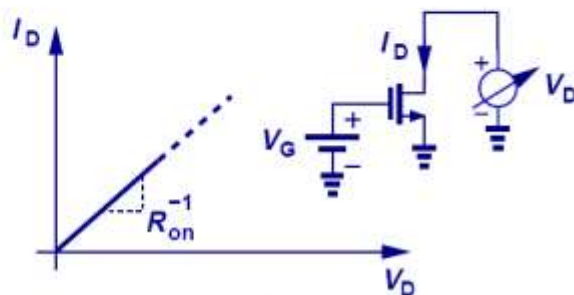
دانشگاه گیلان و بروجستان



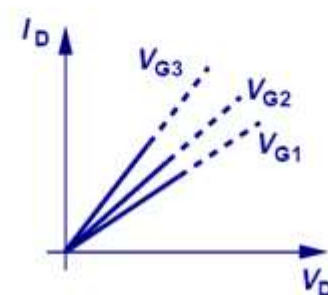
(a)



(b)



(c)



(d)

➤ (ب) مشخصه MOS با تغییر V_G در حالیکه V_D ثابت است.

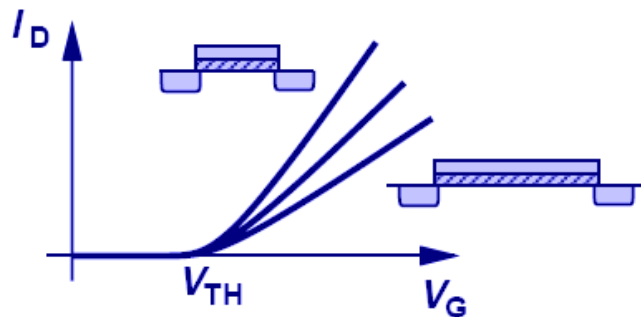
➤ (ج) مشخصه MOS با تغییر V_D در حالیکه V_G ثابت است.

➤ (د) وابستگی ولتاژ مقاومت کانال را نشان می دهد.

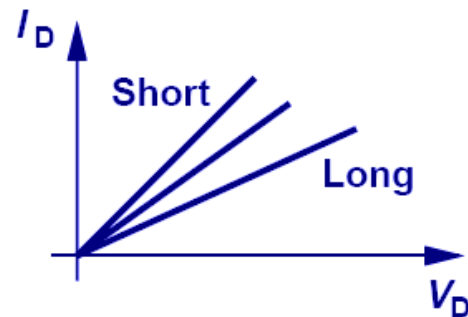


دانشگاه پشاور

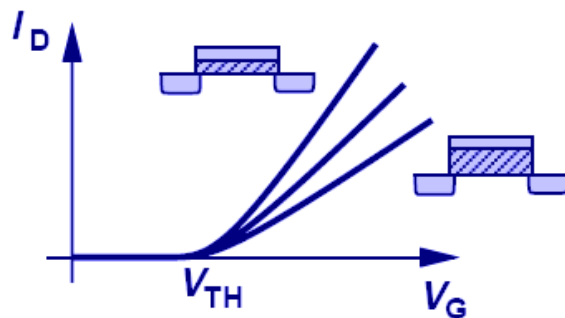
L and t_{ox} Dependence



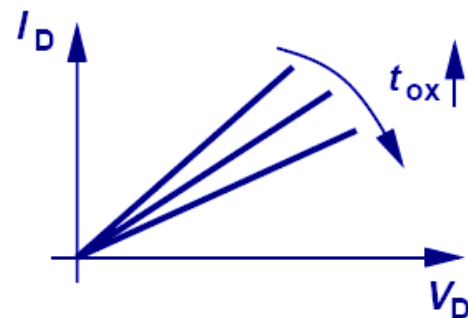
(a)



(b)



(c)

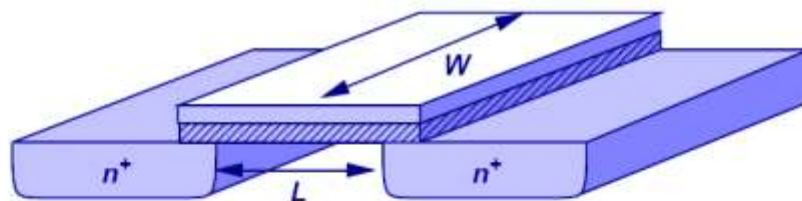


(d)

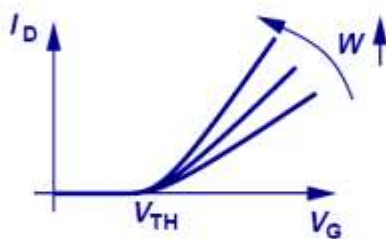
➤ **طول گیت و ضخامت اکسید کوچک، مقاومت کم** کانال را ایجاد می کند، که باعث افزایش جریان درین می شود.



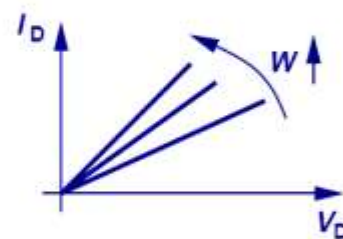
Effect of W



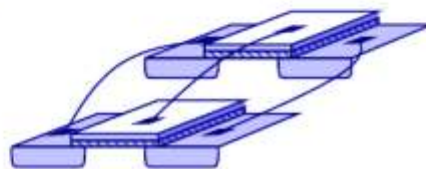
(a)



(b)



(c)

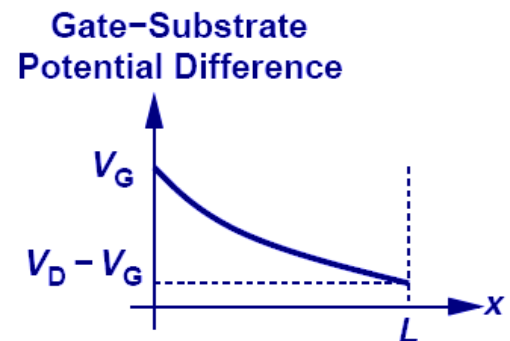
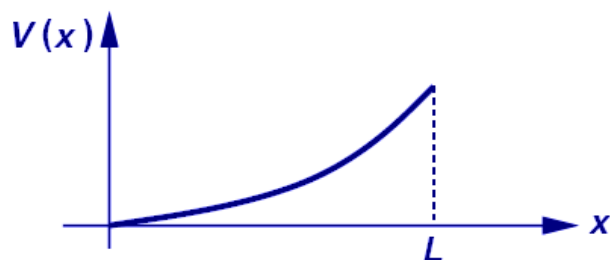
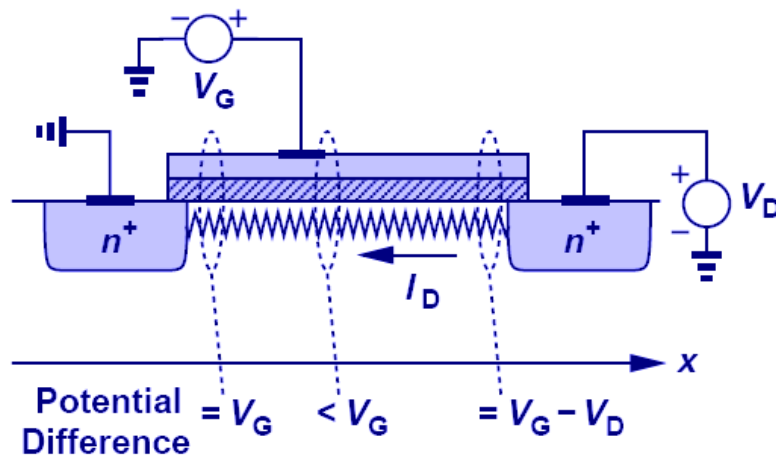


(d)

- با افزایش عرض گیت، جریان به دلیل کاهش مقاومت افزایش می یابد.
- با این وجود، ظرفیت گیت نیز افزایش می یابد و سرعت مدار را محدود می کند.
- افزایش W می تواند به صورت دو ترانزیستور به طور موازی دیده شود



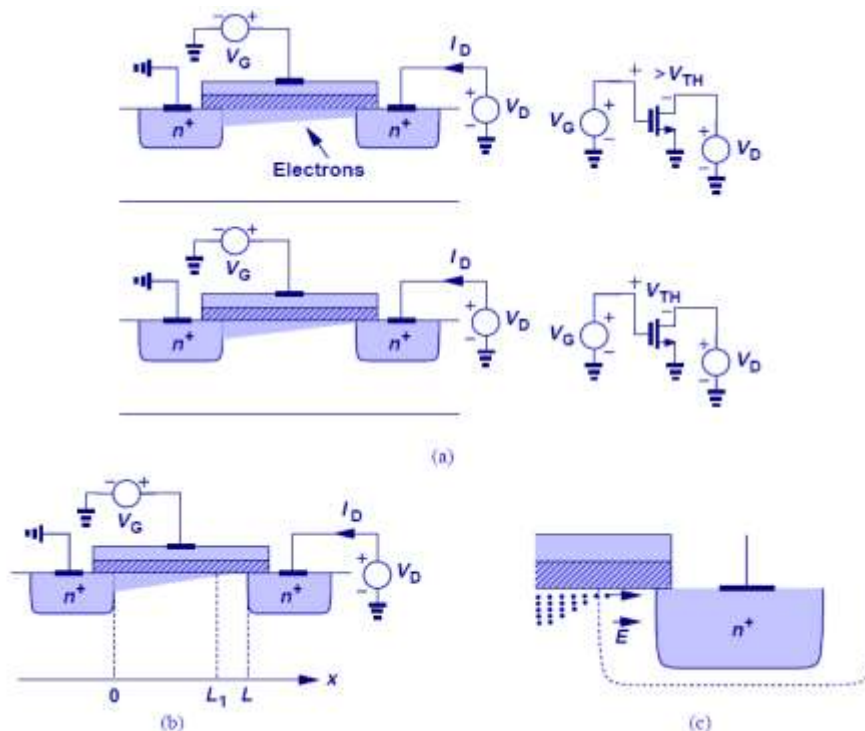
Channel Potential Variation



از آنجا که مقاومت کانال بین درین و سورس وجود دارد، اگر ولتاژ درین بالاتر از سورس باشد، پتانسیل کانال از سورس به درین افزایش می یابد و پتانسیل بین گیت و کانال از سورس به درین کاهش می یابد.



Channel Pinch-Off



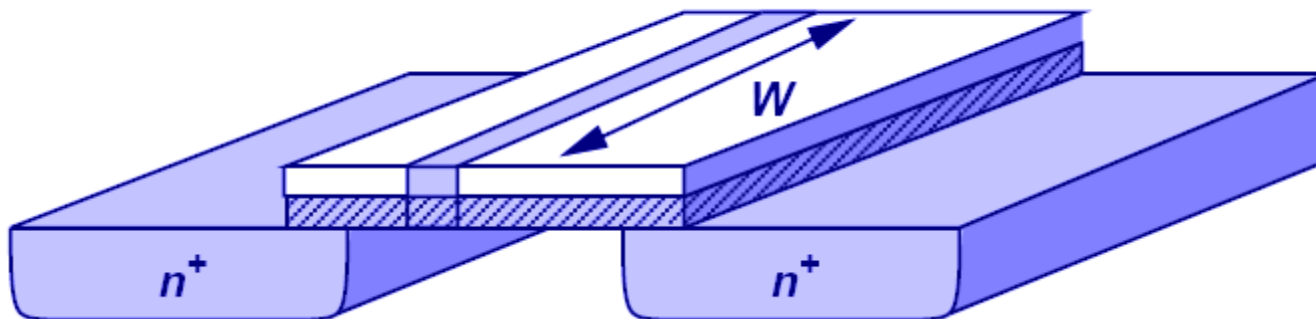
همانطور که اختلاف پتانسیل بین درین و گیت مثبت تر می شود ، لایه وارونگی در بستر شروع به کم شدن در اطراف درین می کند.

وقتی $V_D - V_G = V_{th}$ ، کاملا مسدود میشود و

وقتی $V_D - V_G > V_{th}$ طول کانال شروع به کاهش میکند.



Channel Charge Density



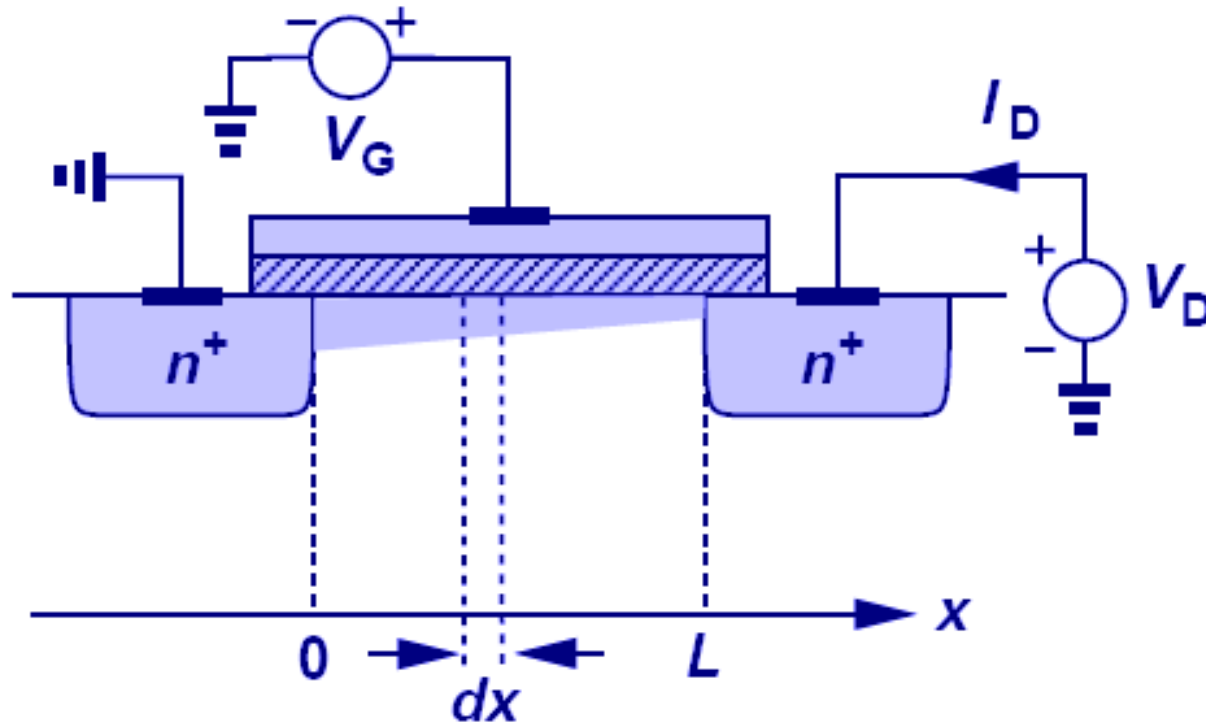
$$I = Q \cdot v$$

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

چگالی بار کانال برابر است با خازن گیت، ضربدر ولتاژ گیت بیش از ولتاژ آستانه.



Charge Density at a Point

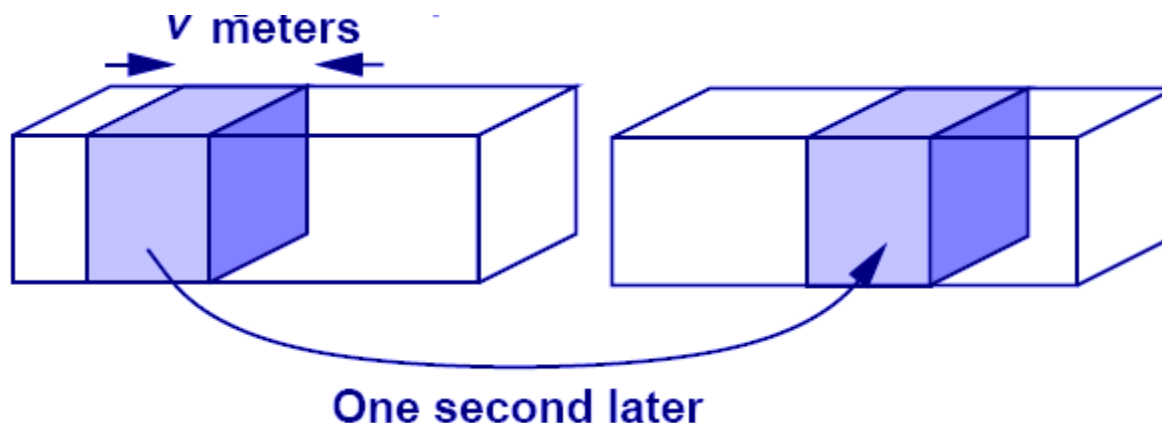


$$Q(x) = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}]$$

اگر x یک نقطه در امتداد کانال از سورس به درین باشد و $V(x)$ پتانسیل آن باشد. عبارت فوق چگالی بار (در واحد طول) را نشان می دهد.



Charge Density and Current



$$I = Q \cdot v$$

جریانی که از سورس به سمت درین می رود (الکترن ها) مربوط به چگالی بار موجود در کانال توسط سرعت بار است.



Drain Current

$$I = Q \cdot v$$

$$v = +\mu_n \frac{dV}{dx}$$

$$I_D = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}] \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$$

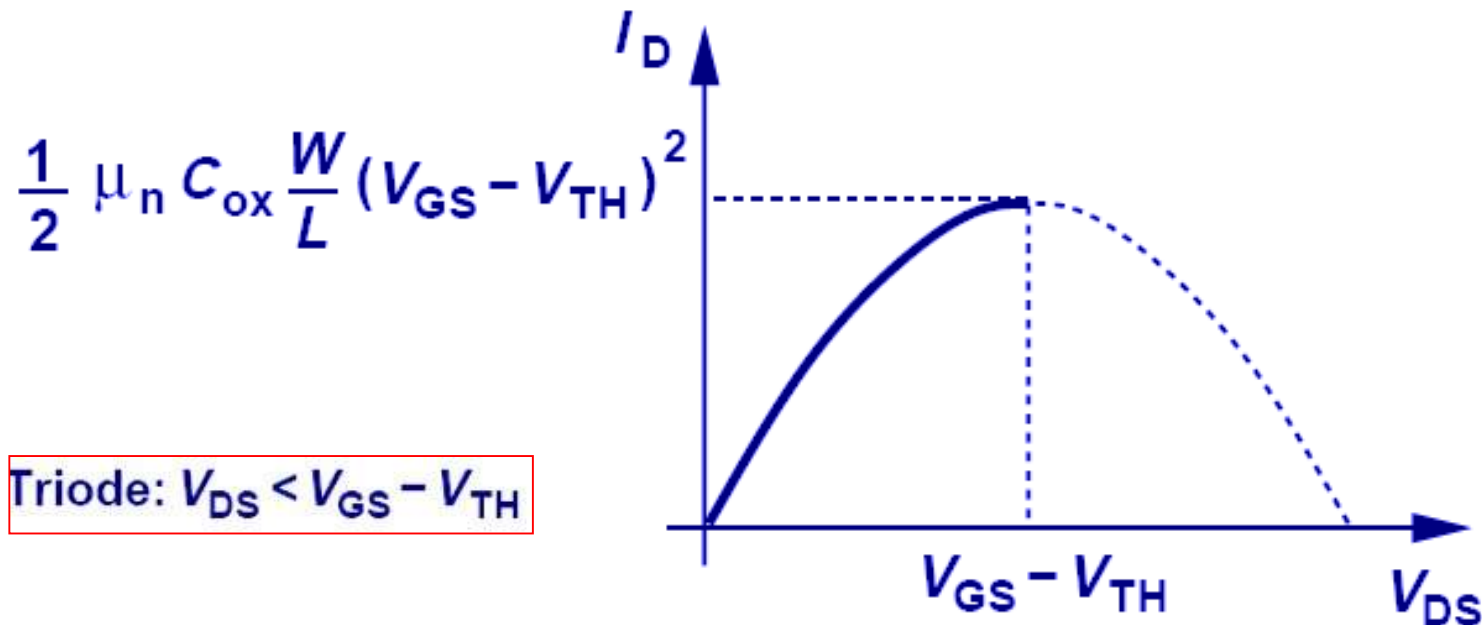
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$



Parabolic I_D - V_{DS} Relationship

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



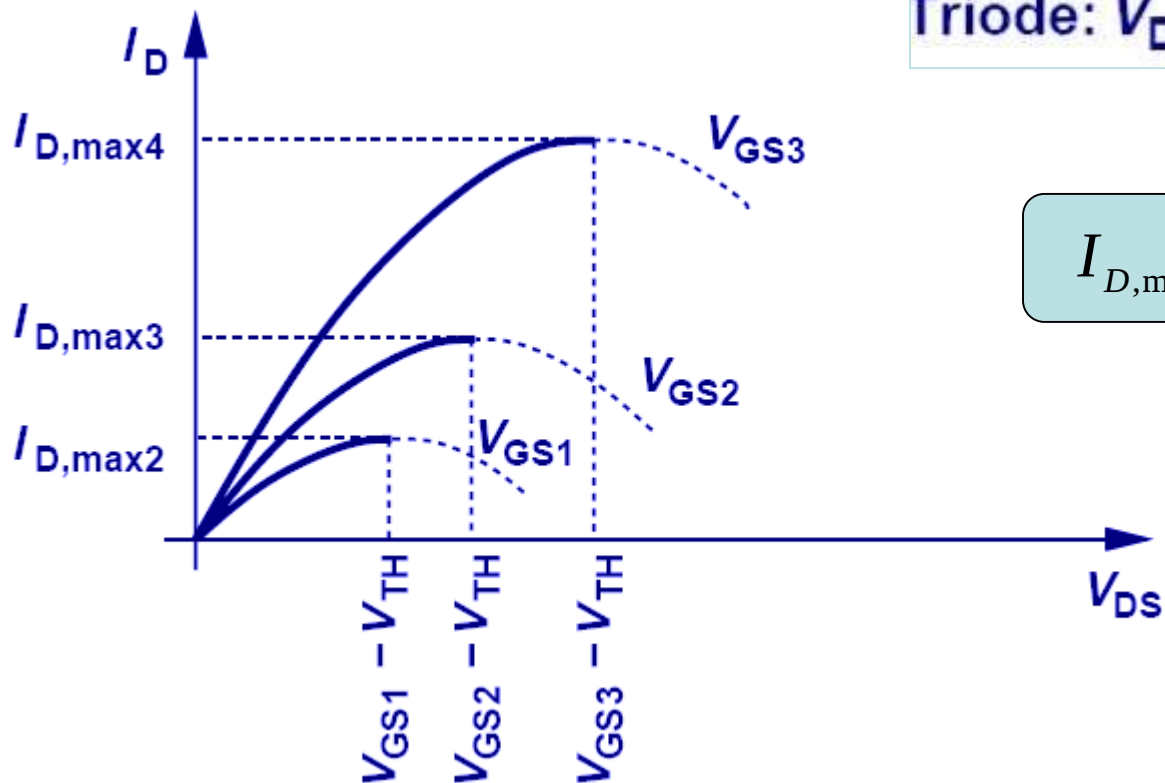
- ☐ با ثابت نگه داشتن V_G و تغییر V_{DS} ، ما یک رابطه سهموی به دست می آوریم.
- ☐ حداکثر جریان وقتی اتفاق می افتد که V_{DS} برابر با $V_{GS} - V_{TH}$ باشد.



I_D - V_{DS} for Different Values of V_{GS}

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

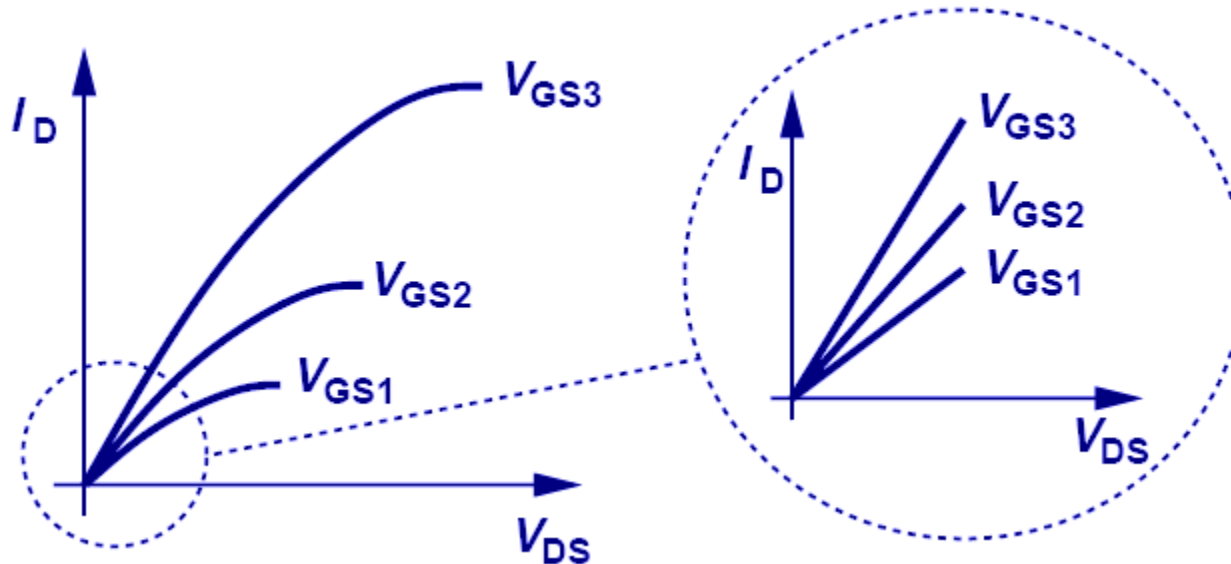
Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$



$$I_{D,max} \propto (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Linear Resistance



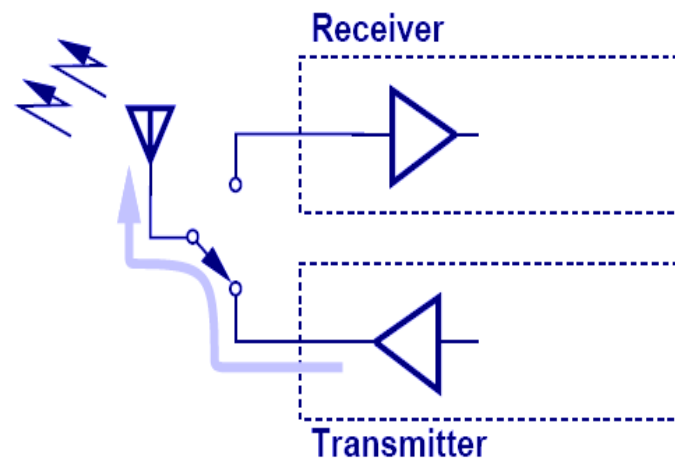
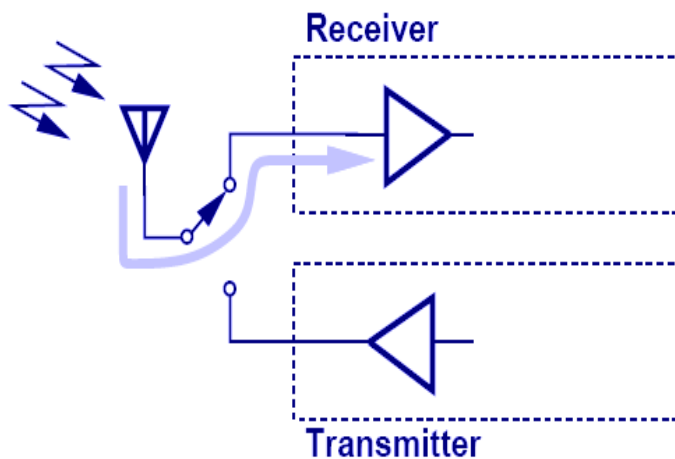
$$R_{on} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})}$$

در V_{DS} کوچک ، ترانزیستور را می توان به عنوان یک **مقاومت** در نظر گرفت ، که مقاومت به ولتاژ گیت بستگی دارد.

این کاربرد ترانزیستور به عنوان یک **سوئیچ الکترونیکی** می باشد.



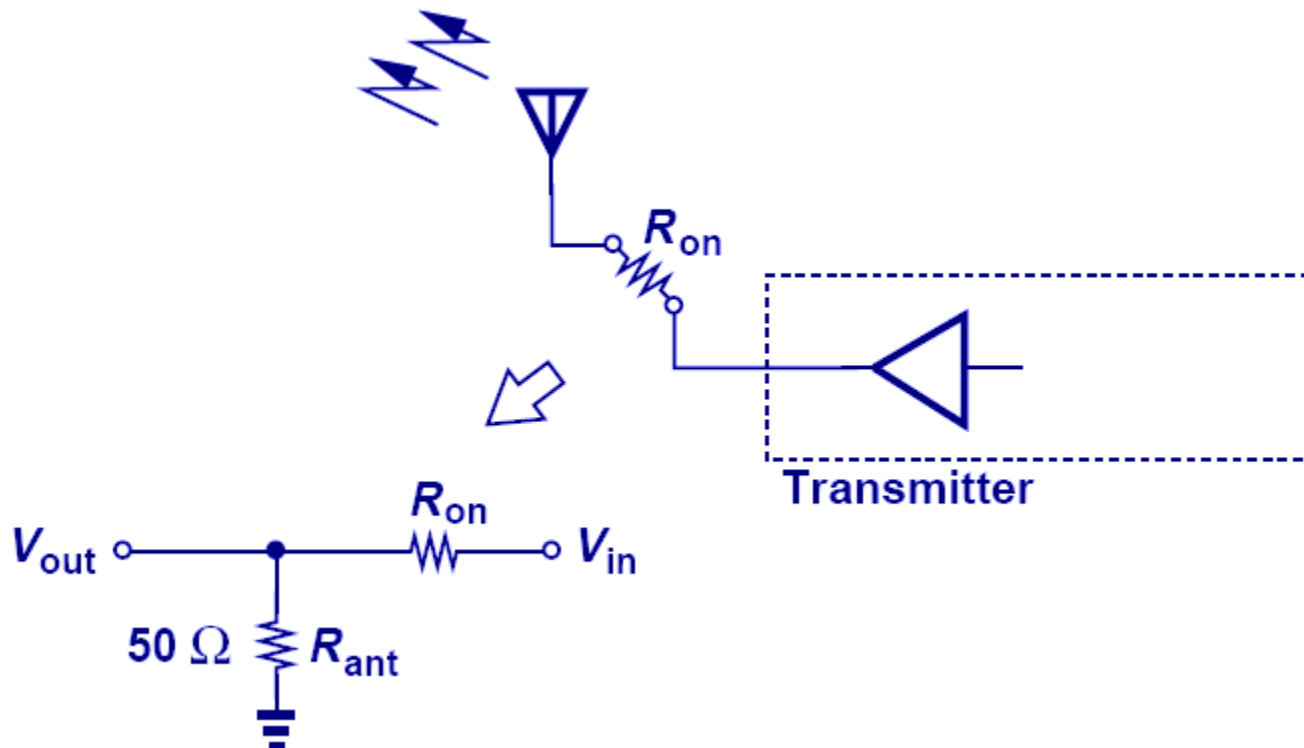
Application of Electronic Switches



در سیستم تلفنی بی سیم که در آن از یک آنتن برای فرستنده و گیرنده استفاده می شود، از سوئیچ برای اتصال گیرنده یا فرستنده به آنتن استفاده می شود.



Effects of On-Resistance



برای به حداقل رساندن میرایی سیگنال ، R_{on} سوئیچ باید تا حد ممکن کوچک باشد.
این به معنای نسبت ابعاد W / L بزرگتر و V_{GS} بیشتر است.



دانشگاه سیستان و بلوچستان

Chapter 6.2 Physics of MOS Transistor

الکترونیک ۲ - فصل ۶ - قسمت دوم

مرجع: مدارهای میکروالکترونیک (ویراست پنجم)، تالیف: صدرا - اسمیت

Mohammad Ali Mansouri- Birjandi

Majid Ghardran

**Faculty of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)**

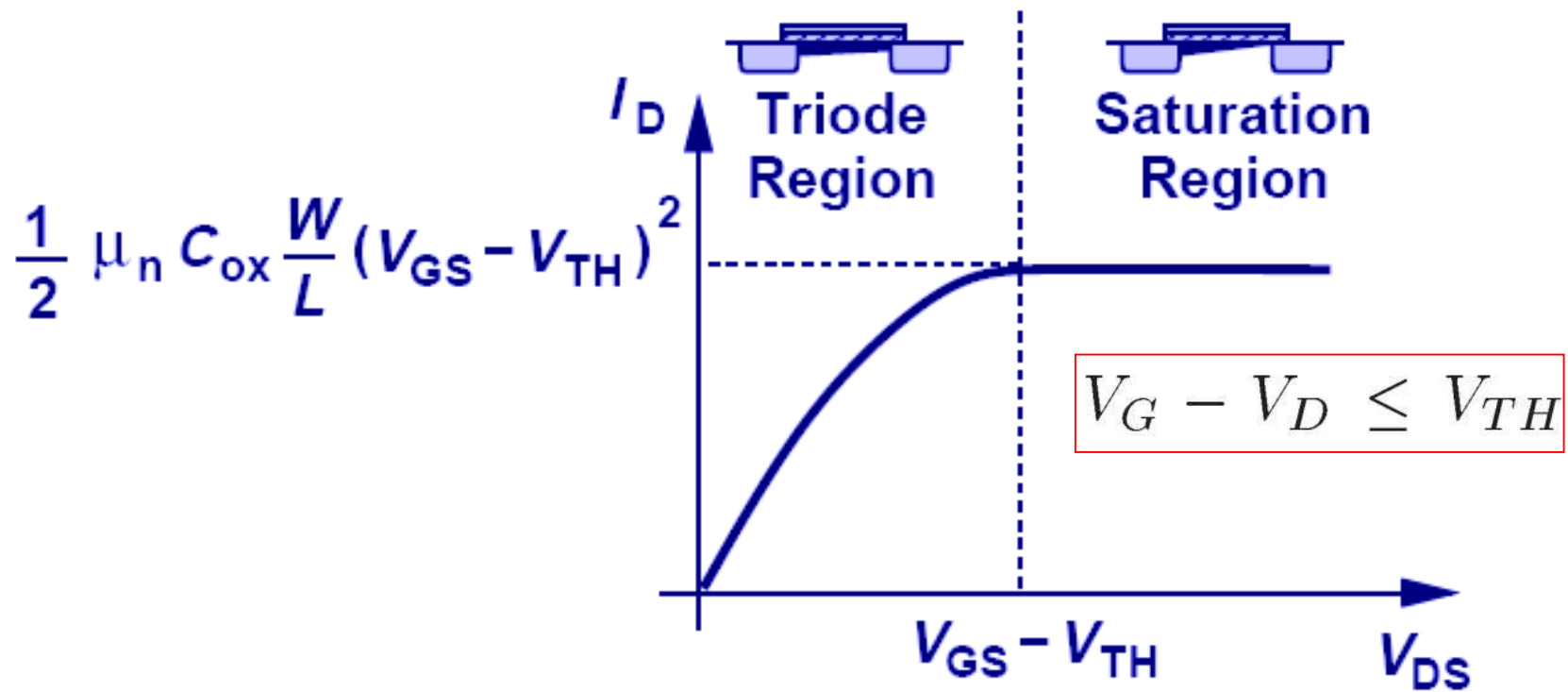
**mansouri@ece.usb.ac.ir ,
mamansouri@yahoo.com**



Different Regions of Operation

Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

Saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

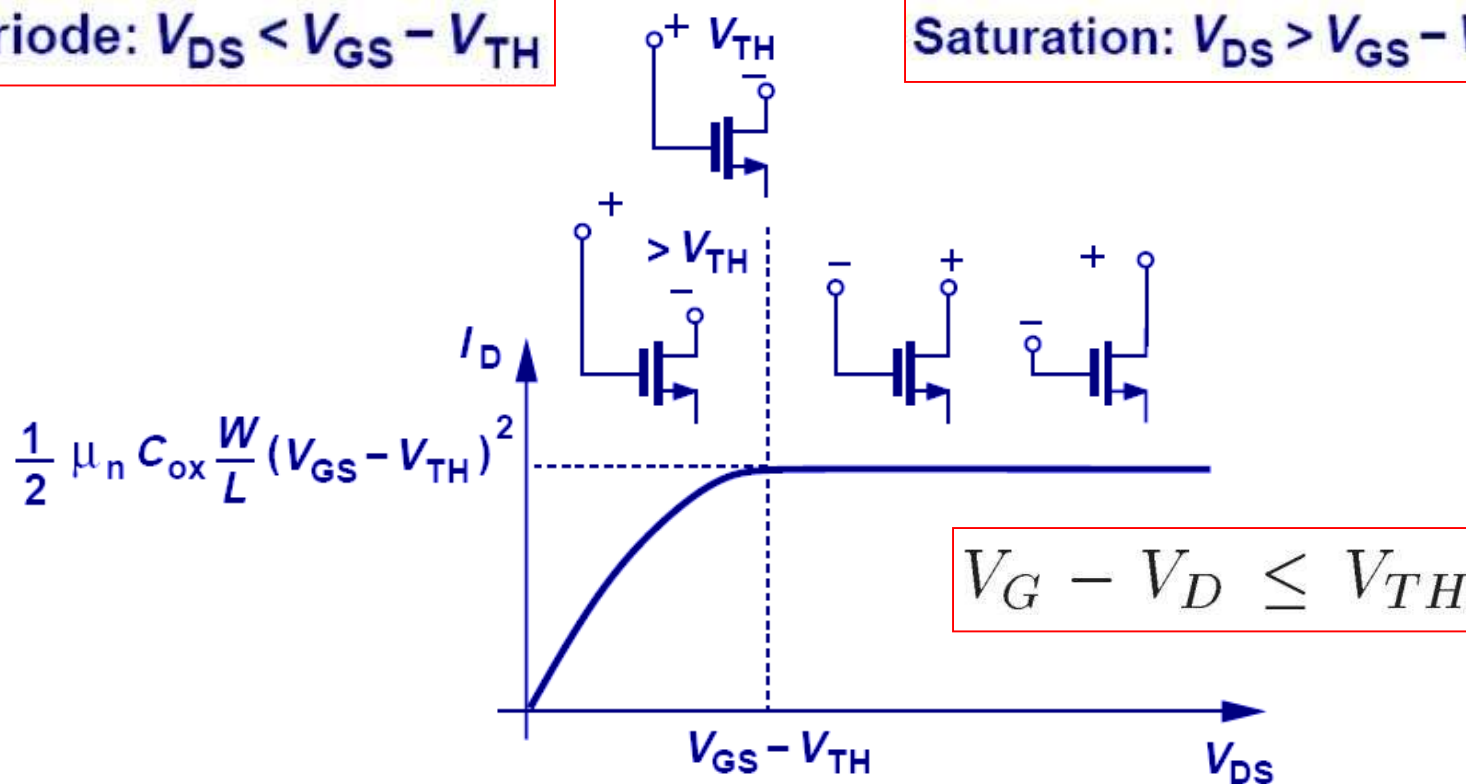
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_1} (V_{GS} - V_{TH})^2,$$



How to Determine 'Region of Operation'

Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

Saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$





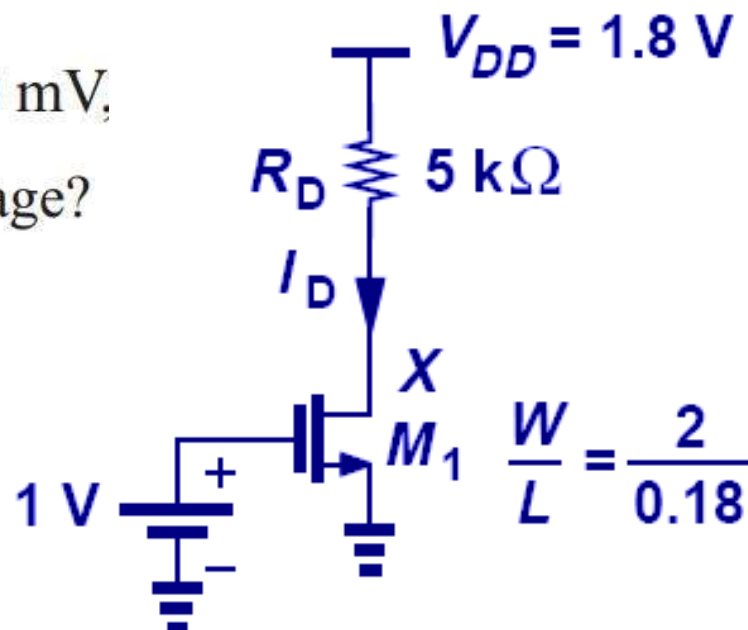
دانشگاه پشاور
University of Peshawar

Example 6.6: Triode or Saturation?

Calculate the bias current of M_1

$$\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2 \text{ and } V_{TH} = 0.4 \text{ V.}$$

If the gate voltage increases by 10 mV,
what is the change in the drain voltage?





Example 6.6

Calculate the bias current of M_1 in Fig. 6.23. Assume $\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$ and $V_{TH} = 0.4 \text{ V}$. If the gate voltage increases by 10 mV, what is the change in the drain voltage?

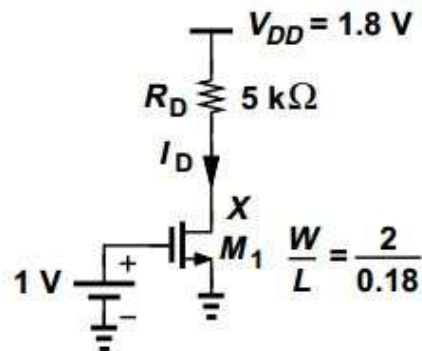


Figure 6.23 Simple MOS circuit.

Solution

It is unclear a priori in which region M_1 operates. Let us assume M_1 is saturated and proceed. Since $V_{GS} = 1 \text{ V}$,

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6.18)$$

$$= 200 \mu\text{A}. \quad (6.19)$$

We must check our assumption by calculating the drain potential:

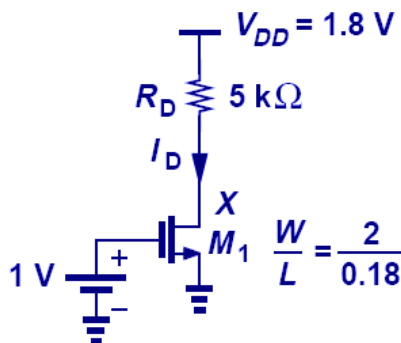
$$V_X = V_{DD} - R_D I_D \quad (6.20)$$

$$= 0.8 \text{ V}. \quad (6.21)$$



دانشگاه پشاور
University of Peshawar

Example 6.6: Triode or Saturation?



The drain voltage is lower than the gate voltage, but by less than V_{TH} . The illustration in Fig. 6.22 therefore indicates that M_1 indeed operates in saturation.

If the gate voltage increases to 1.01 V, then

$$I_D = 206.7 \mu\text{A}, \quad (6.22)$$

lowering V_X to

$$V_X = 0.766 \text{ V}. \quad (6.23)$$

Fortunately, M_1 is still saturated. The 34-mV change in V_X reveals that the circuit can *amplify* the input.

Example 6.7

Determine the value of W/L in Fig. 6.23 that places M_1 at the edge of saturation and calculate the drain voltage change for a 1-mV change at the gate. Assume $V_{TH} = 0.4$ V.

Solution

With $V_{GS} = +1$ V, the drain voltage must fall to $V_{GS} - V_{TH} = 0.6$ V for M_1 to enter the triode region. That is,

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \quad (6.24)$$

$$= 240 \mu\text{A}. \quad (6.25)$$

Since I_D scales linearly with W/L ,

$$\frac{W}{L}|_{max} = \frac{240 \mu\text{A}}{200 \mu\text{A}} \cdot \frac{2}{0.18} \quad (6.26)$$

$$= \frac{2.4}{0.18}. \quad (6.27)$$

If V_{GS} increases by 1 mV,

$$I_D = 248.04 \mu\text{A}, \quad (6.28)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_X &= \Delta I_D \cdot R_D \\ &= 4.02 \text{ mV}. \end{aligned}$$

Example 6.8

Calculate the maximum allowable gate voltage in Fig. 6.24 if M_1 must remain saturated.

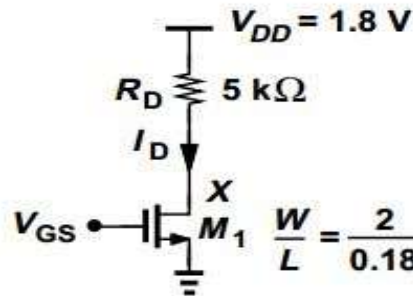


Figure 6.24 Simple MOS circuit.

Solution

At the edge of saturation, $V_{GS} - V_{TH} = V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$. Substituting for I_D from (6.17) gives

$$V_{GS} - V_{TH} = V_{DD} - \frac{R_D}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2, \quad (6.31)$$

and hence

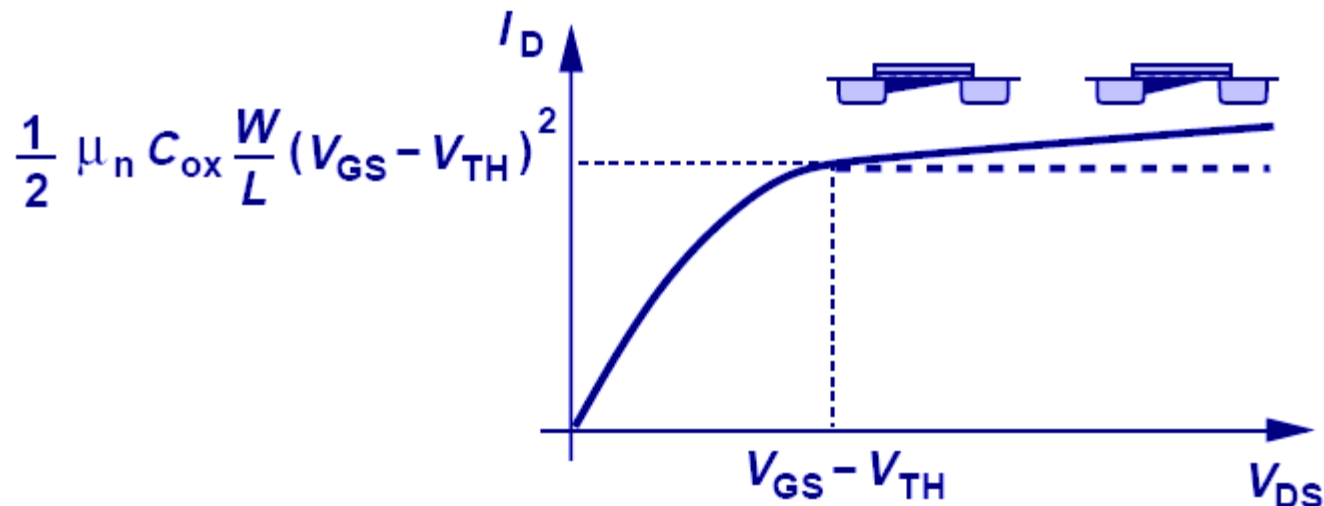
$$V_{GS} - V_{TH} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2R_D V_{DD} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}}{R_D \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}. \quad (6.32)$$

Thus,

$$V_{GS} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2R_D V_{DD} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}}{R_D \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} + V_{TH}. \quad (6.33)$$



Channel-Length Modulation



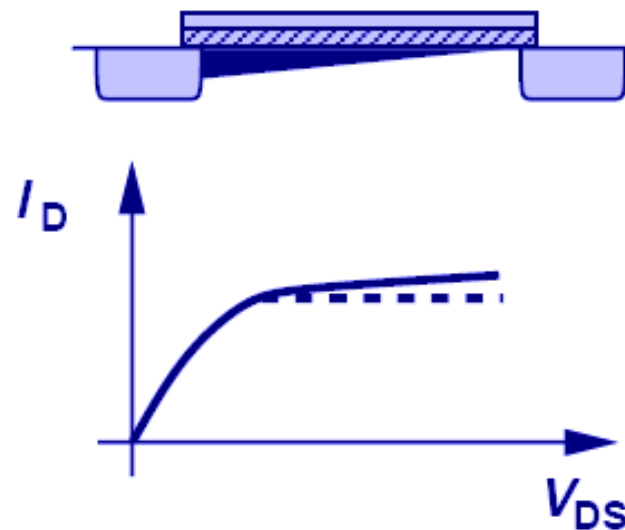
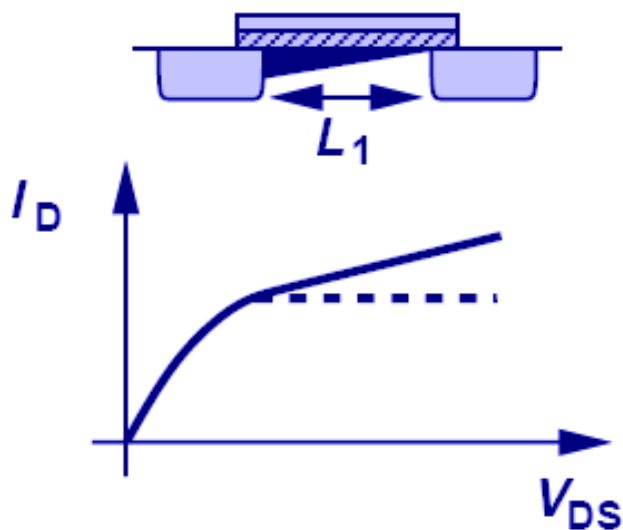
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

ثابت بودن جریان در منطقه اشباع کاملاً صحیح نیست.

نقطه پایانی کانال در واقع با افزایش V_D به سمت سورس حرکت می کند و I_D را افزایش می دهد. بنابراین ، جریان در منطقه اشباع تابع کمی از ولتاژ درین است.



λ and L



بر خلاف ولتاژ اری در BJT، ضریب مدولاسیون طول کانال میتواند توسط طراح کنترل شود.
برای L بلند، اثر مدولاسیون طول کانال کمتر از L کوتاه است.



دانشگاه پشاور

Transconductance

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}.$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_1} (V_{GS} - V_{TH})^2,$$

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}),$$

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}},$$

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D}.$$

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \quad g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$



Transconductance

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}.$$

$\frac{W}{L}$ Constant $V_{GS} - V_{TH}$ Variable	$\frac{W}{L}$ Variable $V_{GS} - V_{TH}$ Constant	$\frac{W}{L}$ Variable $V_{GS} - V_{TH}$ Constant
$g_m \propto \sqrt{I_D}$ $g_m \propto V_{GS} - V_{TH}$	$g_m \propto I_D$ $g_m \propto \frac{W}{L}$	$g_m \propto \sqrt{\frac{W}{L}}$ $g_m \propto \frac{1}{V_{GS} - V_{TH}}$

$$g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) \quad g_m = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} \quad g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}}$$

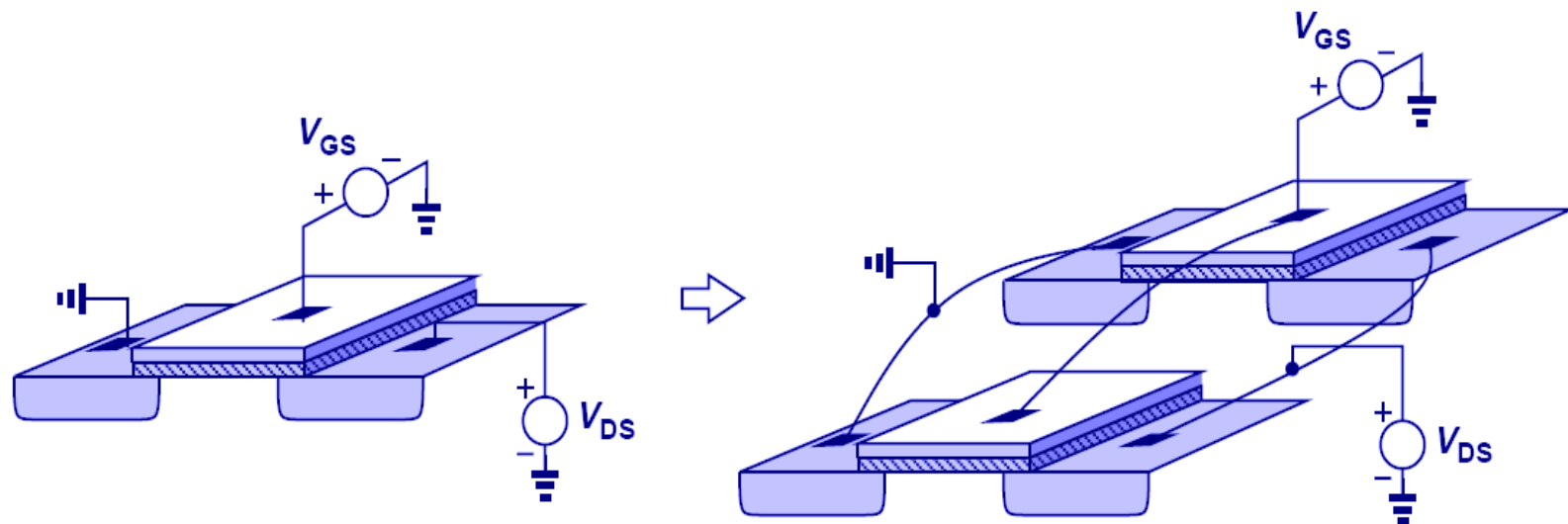
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_1} (V_{GS} - V_{TH})^2,$$

$$\text{Saturation: } V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

$$V_G - V_D \leq V_{TH}$$



Doubling of g_m Due to Doubling W/L



اگر W/L دو برابر شود، در واقع دو ترانزیستور معادل به طور موازی اضافه می شوند، بنابراین جریان (اگر $V_{GS} - V_{TH}$ ثابت باشد) و از این رو g_m دو برابر می شود.



Velocity Saturation

$$I_D = v_{sat} \cdot Q = v_{sat} \cdot WC_{ox} (V_{GS} - V_{TH})$$

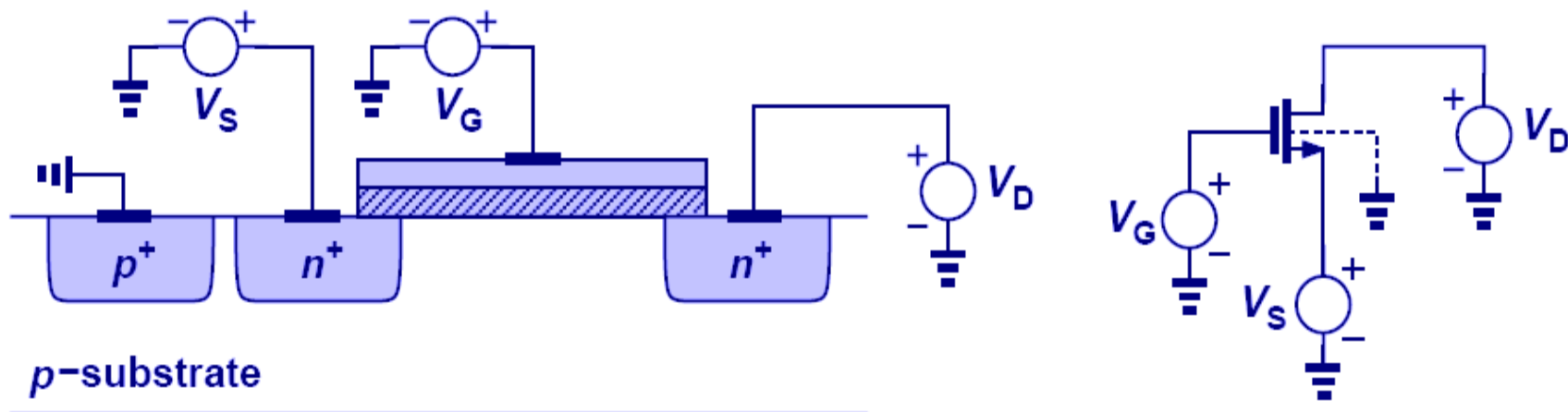
$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = v_{sat} WC_{ox}$$

چون کانال بسیار کوتاه است ، ولتاژ درین بسیار زیادی لازم نیست تا سرعت ذرات بار را اشباع کند.
در اشباع سرعت، جریان درین به یک تابع خطی از ولتاژ گیت تبدیل می شود و g_m به تابعی از W تبدیل می شود.



دانشگاه پشاور

Body Effect

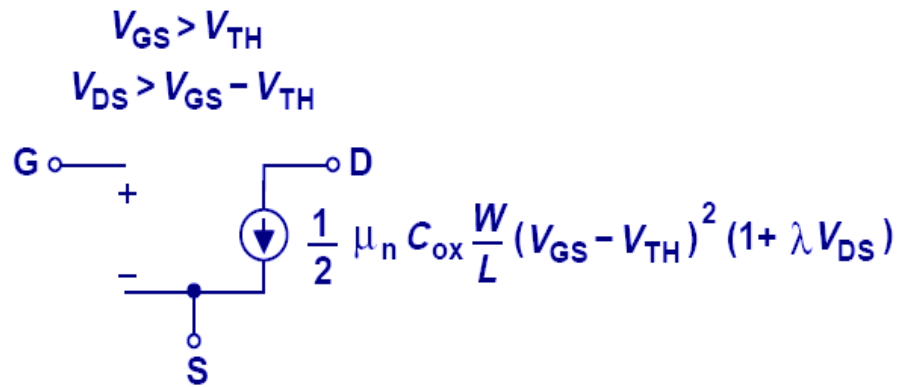


$$V_{TH} = V_{TH0} + \rho(\sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F})$$

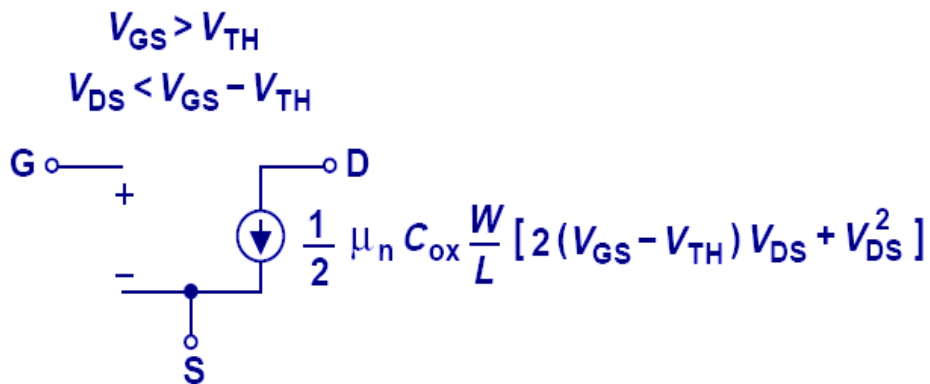
با متفاوت بودن پتانسیل سورس با پتانسیل بستر، ولتاژ آستانه تغییر می کند.



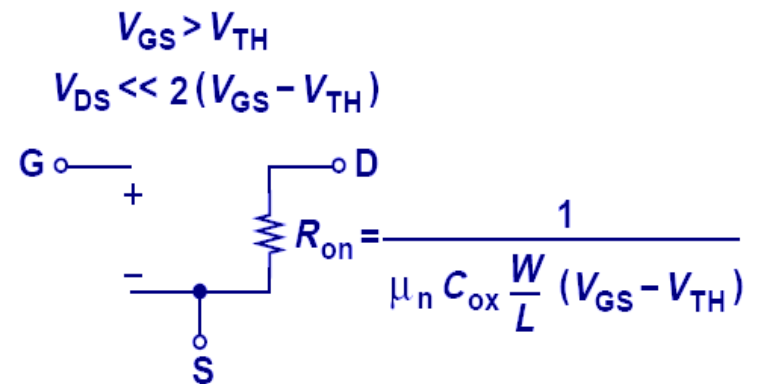
Large-Signal Models



(a)

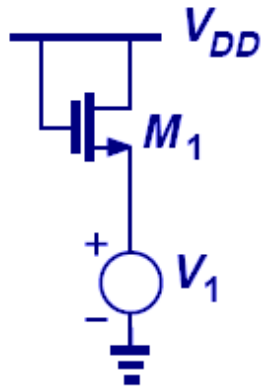


(b)

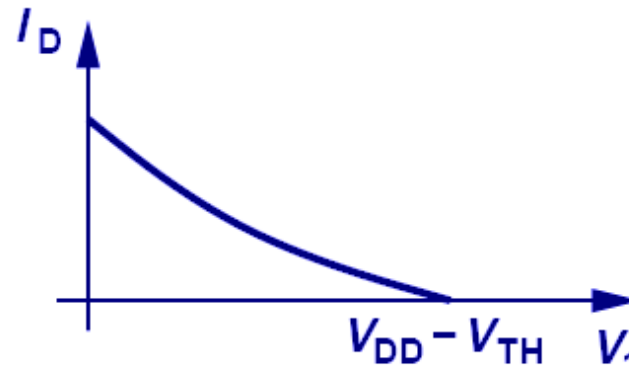


(c)

Example 6.13: Behavior of I_D with V_1 as a Function



(a)



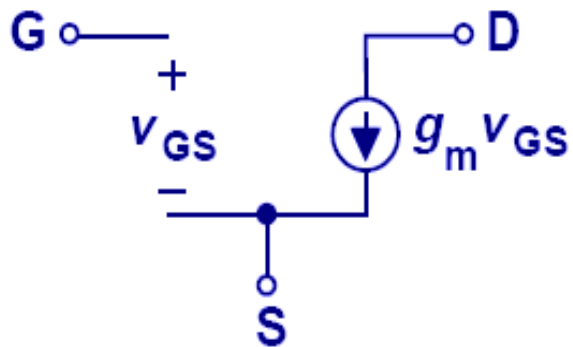
(b)

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{DD} - V_1 - V_{TH})^2. \quad (6.59)$$

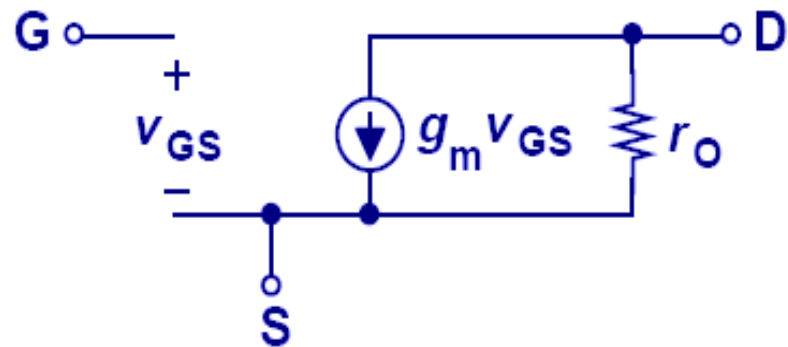
At $V_1 = 0$, $V_{GS} = V_{DD}$ and the device carries maximum current. As V_1 rises, V_{GS} falls and so does I_D . If V_1 reaches $V_{DD} - V_{TH}$, V_{GS} drops to V_{TH} , turning the transistor off. The drain current thus varies as illustrated in Fig. 6.30(b). Note that, owing to body effect, V_{TH} varies with V_1 if the substrate is tied to ground.



Small-Signal Model



(a)



(b)

$$r_o \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

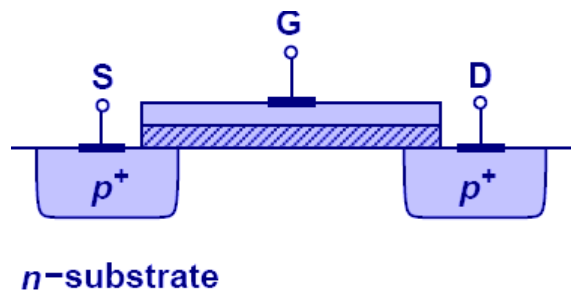
Saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

$$V_G - V_D \leq V_{TH}$$

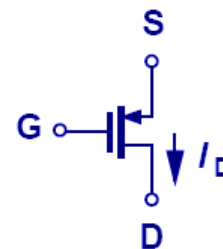
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_1} (V_{GS} - V_{TH})^2,$$



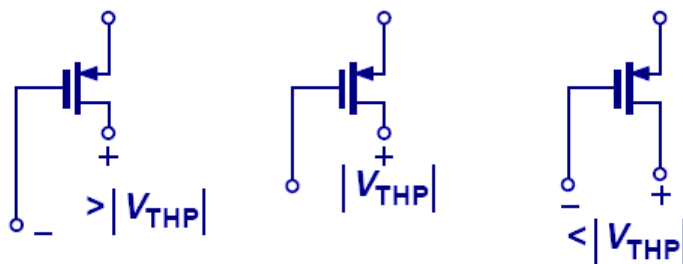
PMOS Transistor



(a)



(b)

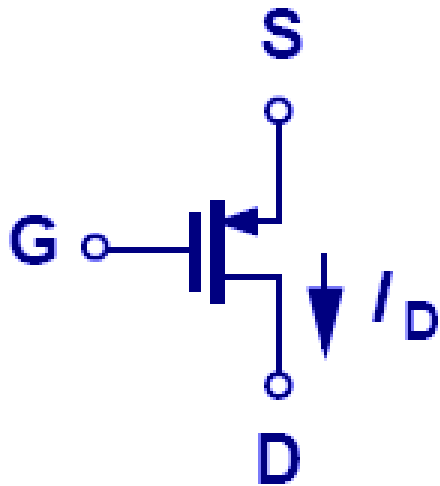


(c)

درست مانند ترانزیستور PNP در فناوری دو قطبی، ایجاد یک قطعه MOS که حفره ها حامل غالب هستند نیز امکان پذیر است که ترانزیستور PMOS نامیده می شود. رفتار آن مانند یک قطعه NMOS با پلاریته های معکوس است.



PMOS Equations



$$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 - \lambda V_{DS})$$

$$I_{D,tri} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [2(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

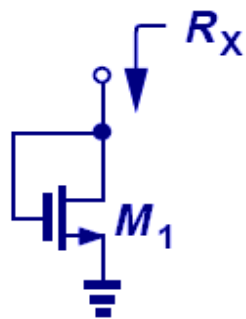
$$I_{D,sat} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (|V_{GS}| - |V_{TH}|)^2 (1 + \lambda |V_{DS}|)$$

$$I_{D,tri} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} [2(|V_{GS}| - |V_{TH}|)|V_{DS}| - V_{DS}^2]$$

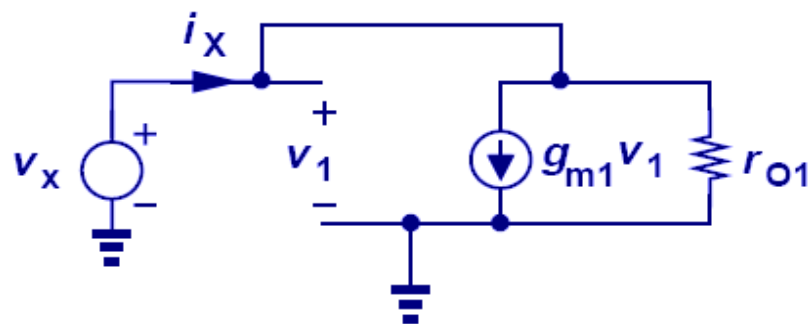
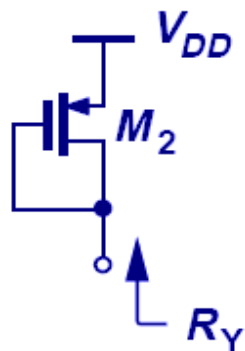


دانشگاه پشاور
University of Peshawar

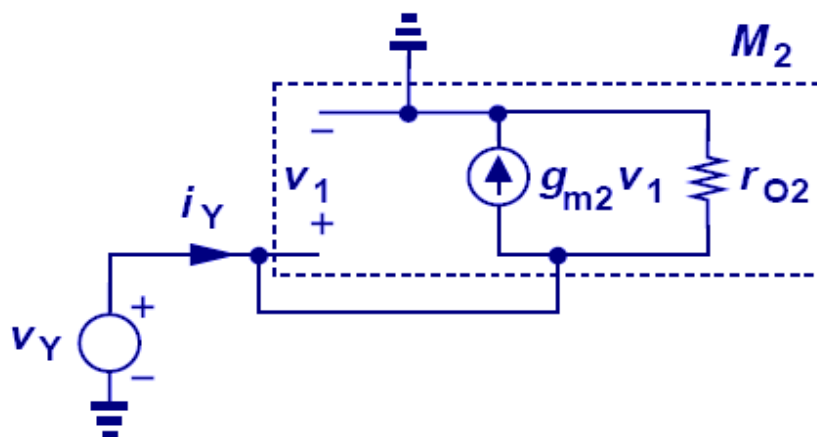
Small-Signal Model of PMOS Device



(a)



(b)

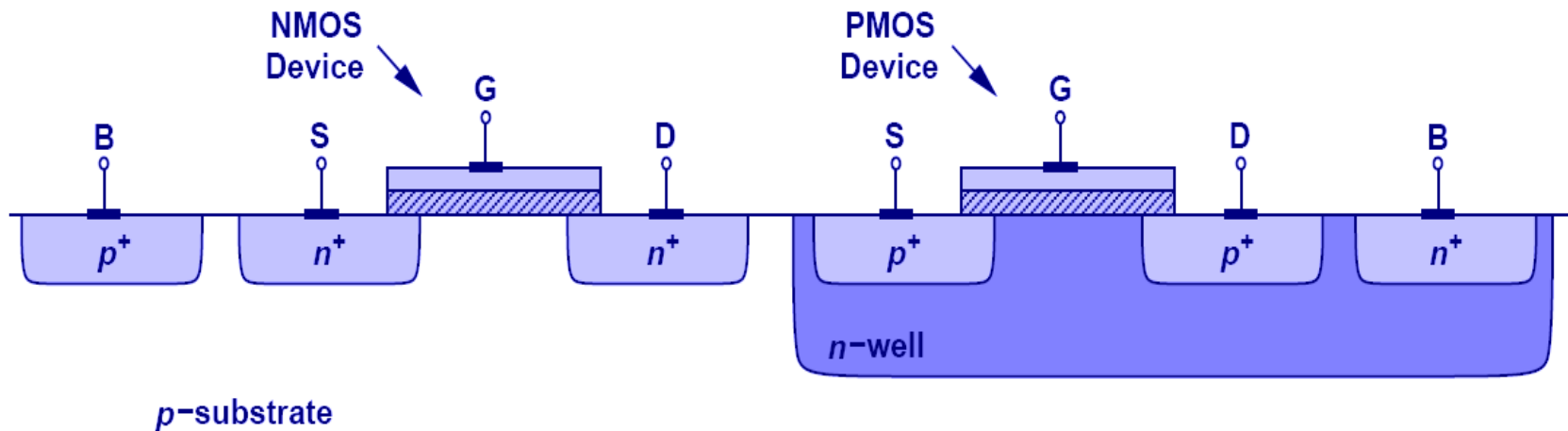


(c)



دانشگاه گجرات

CMOS Technology



رشد یک چاه n در داخل زیرلایه p برای ایجاد فناوری که هر دو NMOS و PMOS بتوانند همزمان وجود داشته باشند امکان پذیر است.

CMOS یا "MOS مکمل" شناخته می شود.



Comparison of Bipolar and MOS Transistors

Bipolar Transistor	MOSFET
Exponential Characteristic Active: $V_{CB} > 0$ Saturation: $V_{CB} < 0$ Finite Base Current Early Effect Diffusion Current –	Quadratic Characteristic Saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ Zero Gate Current Channel-Length Modulation Drift Current Voltage-Dependent Resistor

افزاره های دو قطبی به دلیل ویژگی های نمایی IV دارای یک g_m بالاتر از MOSFET به ازای جریان بایاس مشخص هستند.

