

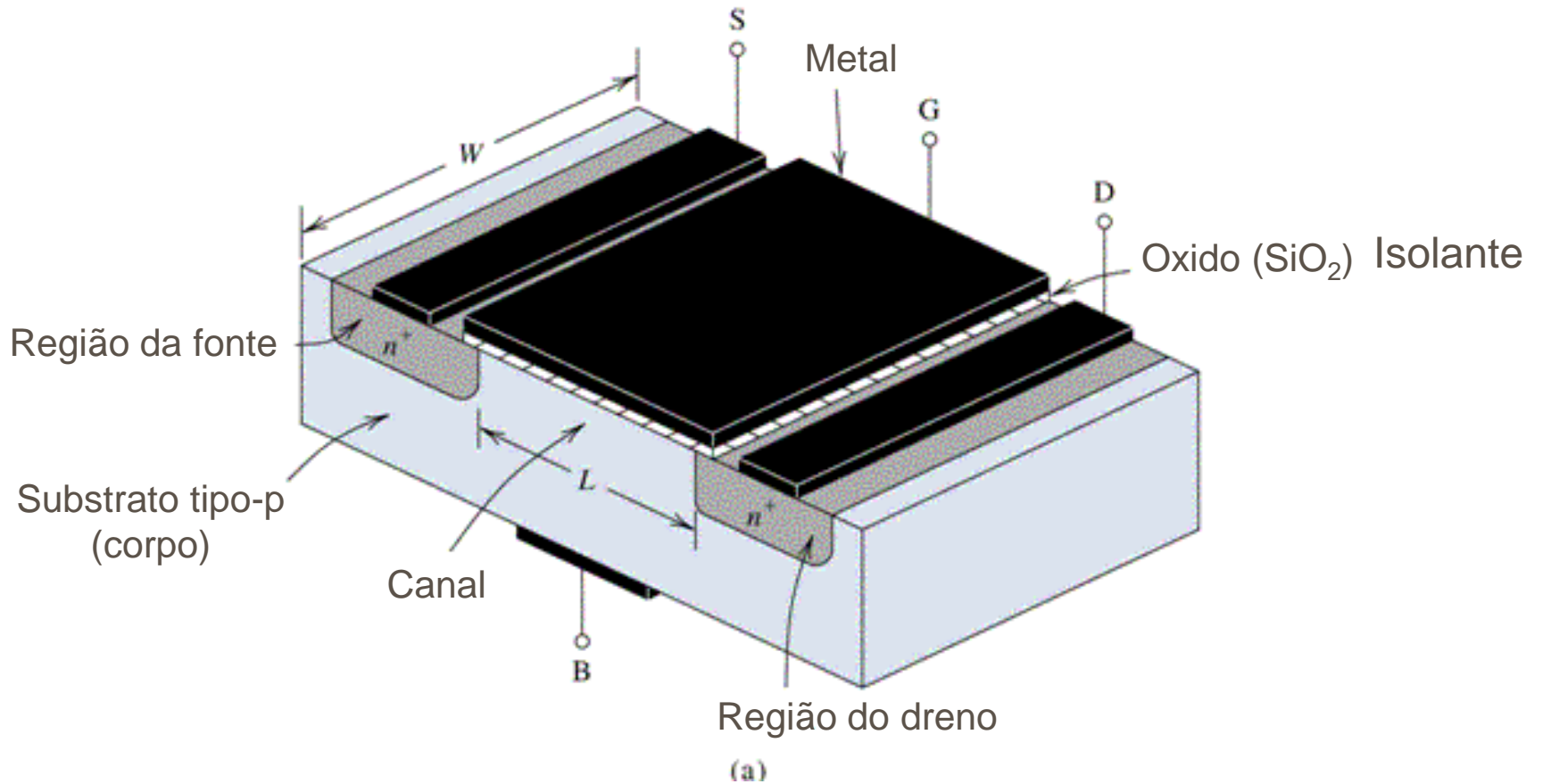
TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO

FETs

- O MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)
 - Dispositivo controlado por tensão
 - Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico
 - Impedância de entrada extremamente elevada (terminal de controlo isolado)
 - Mais simples de construir e ocupa menos espaço que o transístor bipolar
 - Disponível como componente discreto e em circuitos integrados
 - Mais de 90% dos IC's digitais utilizam esta tecnologia
 - Existem dois tipos de MOSFETS : O MOSFET de intensificação e o de depleção. Qualquer deles pode ter canal N ou P.

Transístores de Efeito de Campo

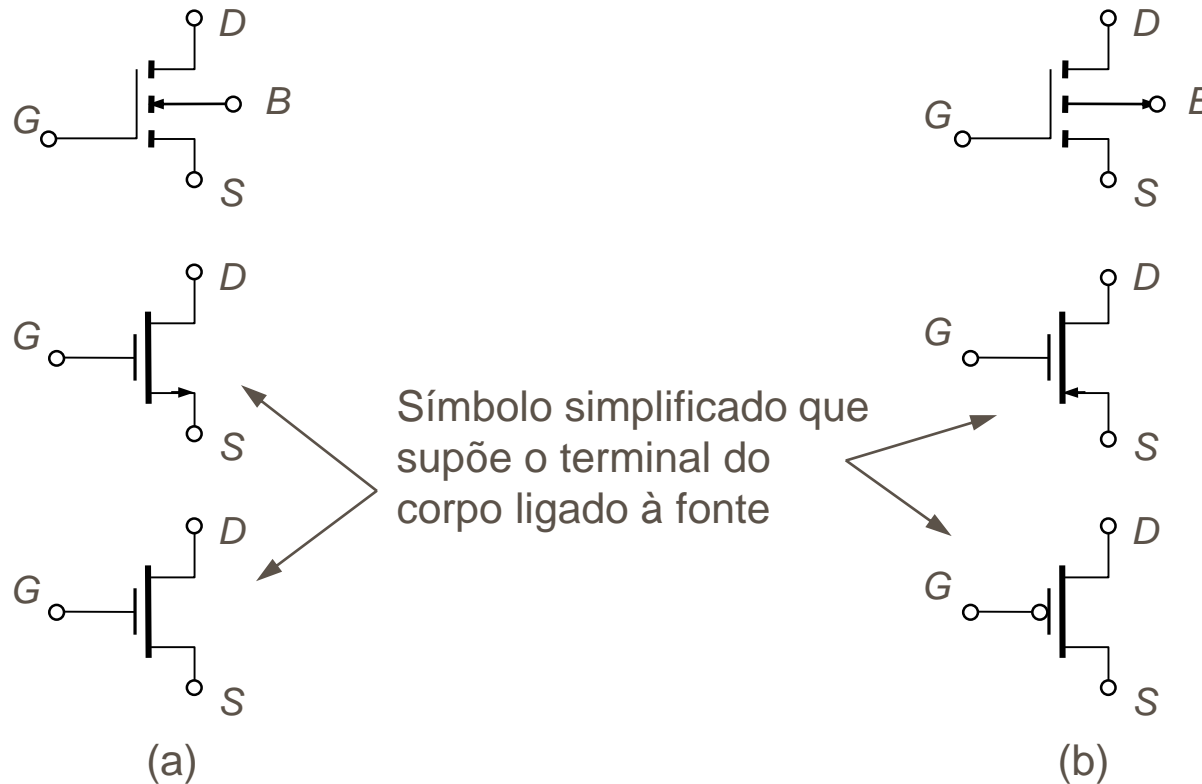
■ O MOSFET – estrutura



Estrutura física de um transístor NMOS do tipo intensificação

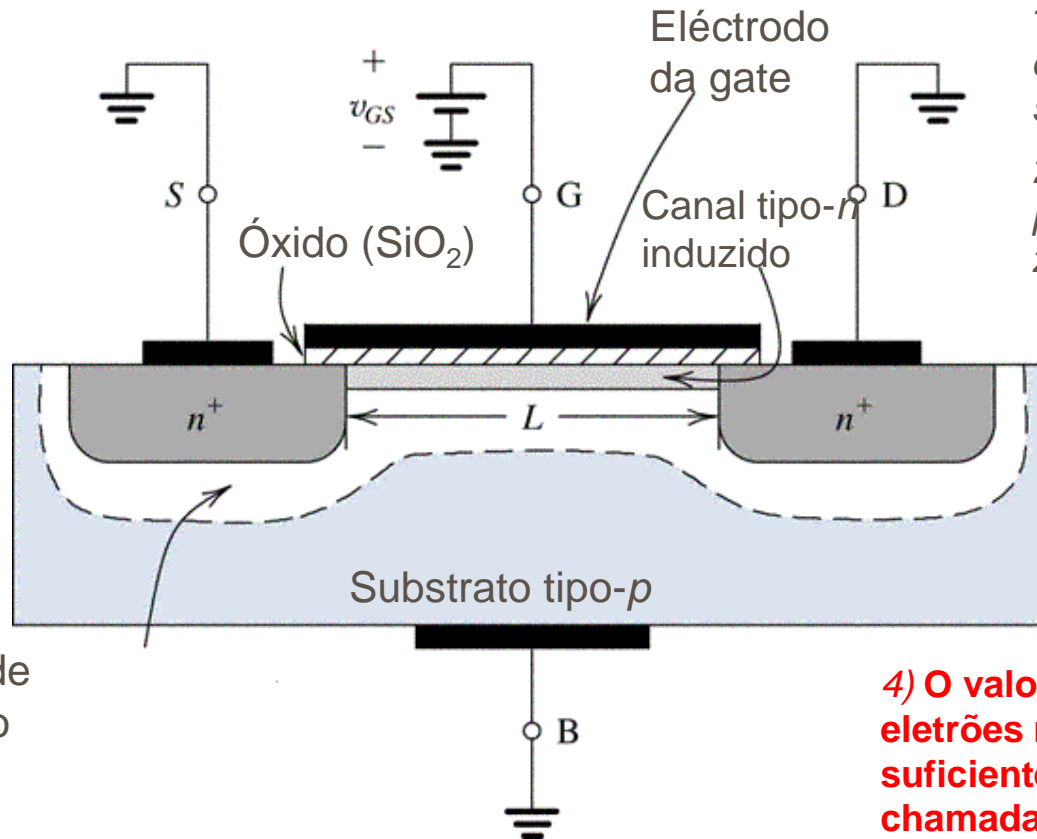
Transístores de Efeito de Campo

■ MOSFET



Símbolos do MOSFET do tipo intensificação: (a) NMOS; (b) PMOS

Transístores de Efeito de Campo-com $V_{GS} > 0$



1) O potencial positivo na gate cria um campo elétrico fazendo com que as lacunas se afastem da zona por baixo da gate.

2) Essas lacunas ao serem em “empurradas” para o interior do substrato, deixam uma zona sem cargas livres dita de depleção.

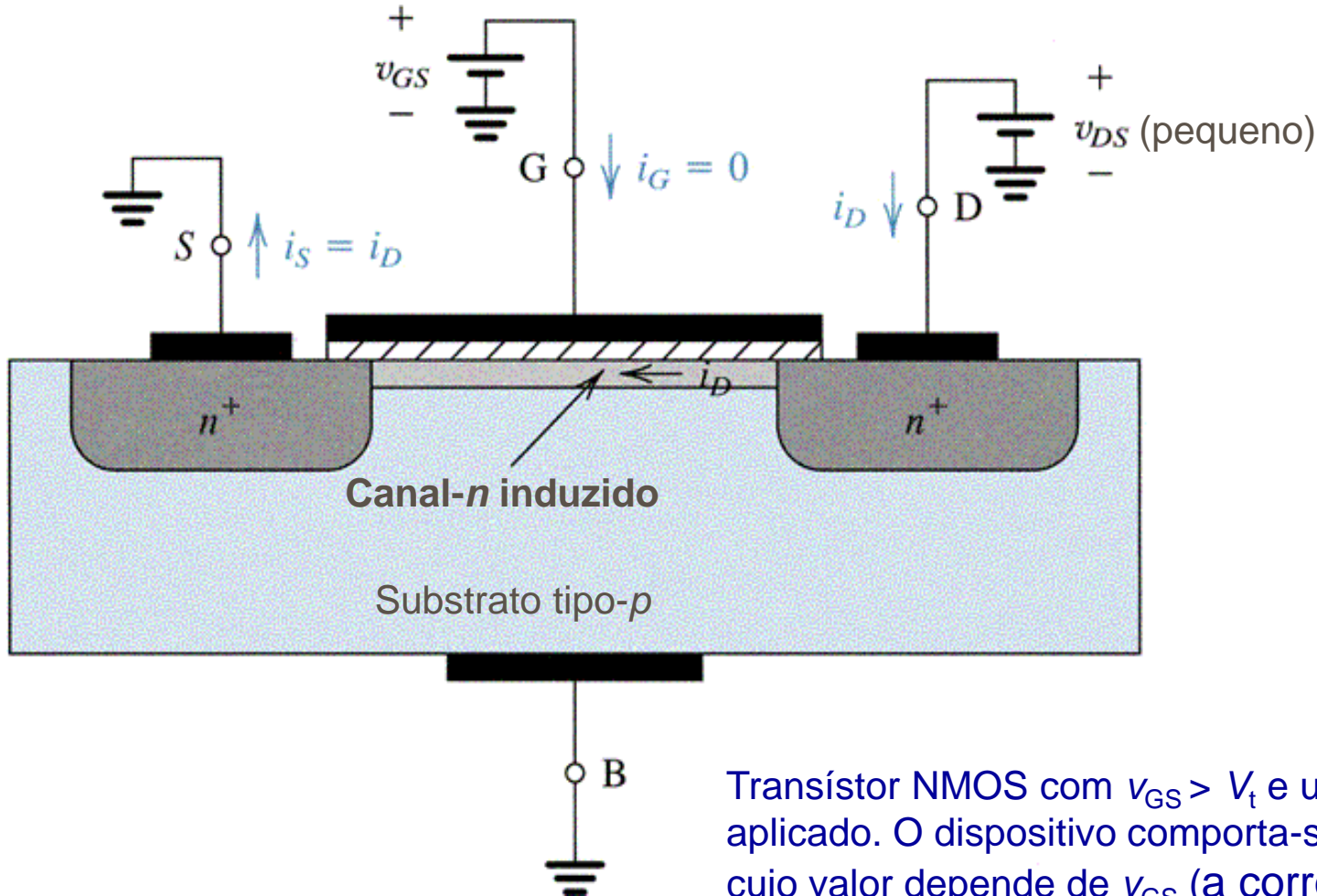
3) Essa zona vai ser ocupada pelos eletrões das zonas n^+ .

4) O potencial positivo da gate atrai esses eletrões até que se cria um canal que une o dreno à source constituído por eletrões. daí este tipo de MOSFET ser do tipo NMOS.

4) O valor de v_{gs} a partir do qual o número de eletrões móveis acumulados na região do canal é suficiente para formar uma região condutora é chamada de "tensão de threshold," (ou tensão limiar de condução) denotada V_t . Para um MOSFET de canal n , V_t é positiva. O seu valor é controlado pelo processo de fabrico e tipicamente varia de 1 V a 5 V.

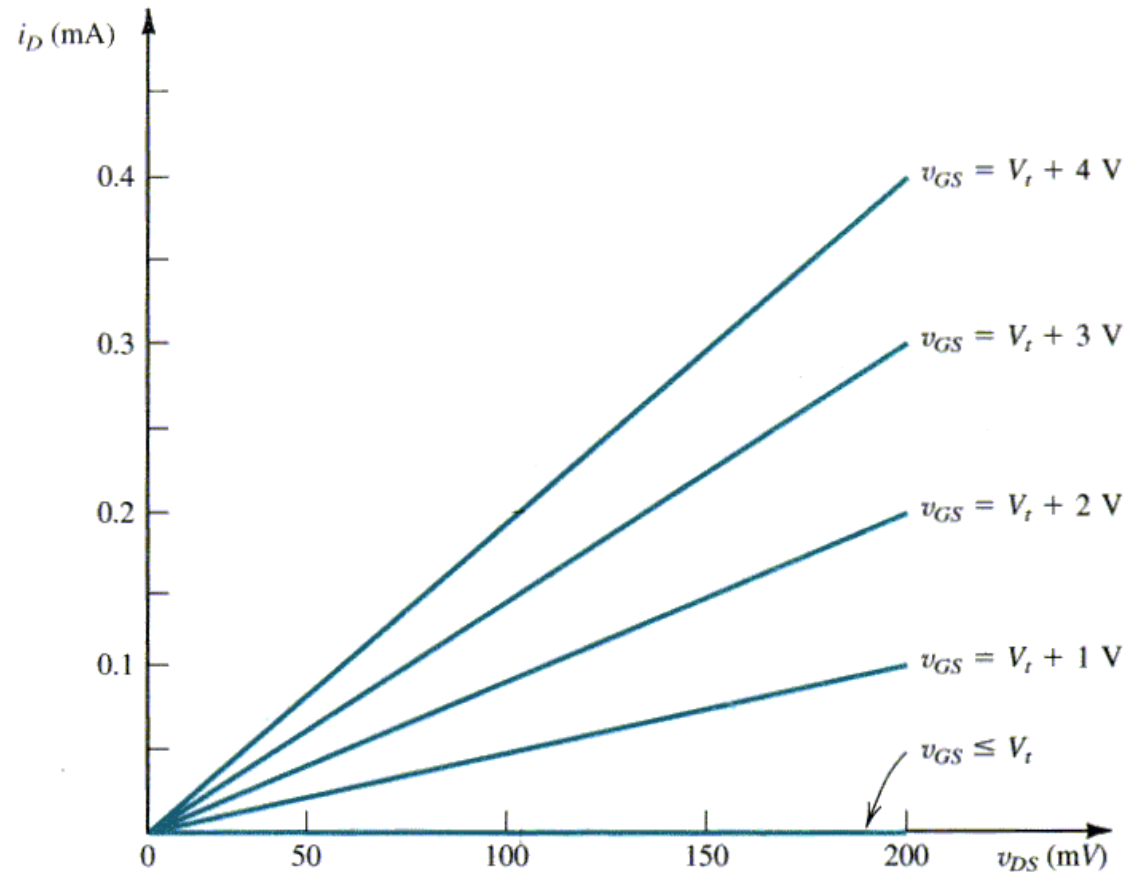
Transístor NMOS do tipo intensificação:
com $v_{GS} > V_t$ (tensão limiar) um canal n é induzido no topo do substrato (junto à gate)

Transístores de Efeito de Campo-com $V_{GS} > 0$



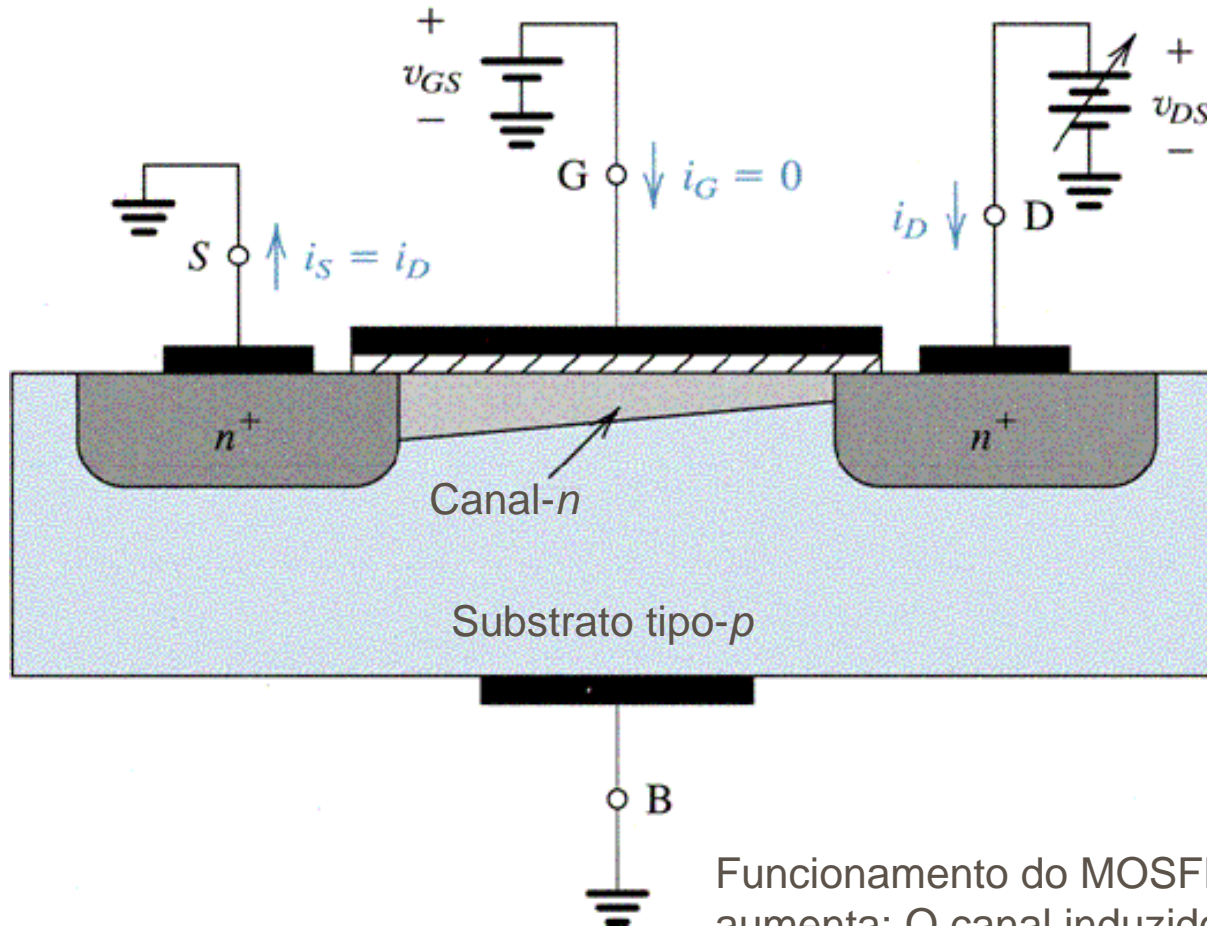
Transístor NMOS com $v_{GS} > V_t$ e um v_{DS} de pequeno valor aplicado. O dispositivo comporta-se como uma resistência cujo valor depende de v_{GS} (a corrente i_D é proporcional a $v_{GS} - V_t$) e também à tensão V_{ds} que a faz circular.

Transístores de Efeito de Campo



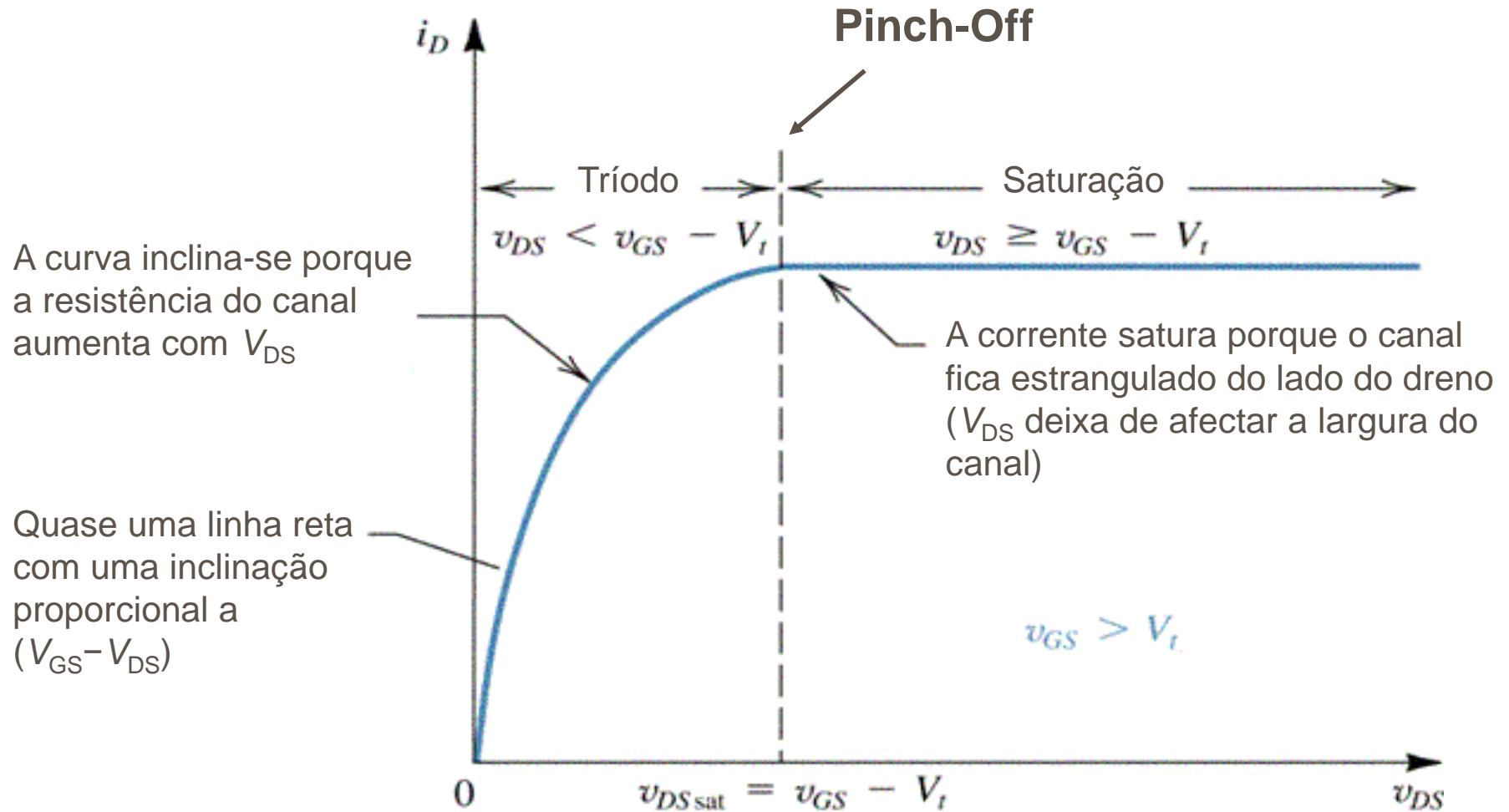
Característica i_D - v_{DS} do MOSFET de intensificação para pequenos valores de v_{DS} : o dispositivo comporta-se como uma resistência linear controlada pela tensão v_{GS} .

Transístores de Efeito de Campo quando V_{DS} Aumenta



Funcionamento do MOSFET de intensificação quando v_{DS} aumenta: O canal induzido torna-se afunilado e a sua resistência aumenta. Supõe-se que v_{GS} é mantido constante (maior do que V_t)

Transístores de Efeito de Campo



MOSFET de intensificação: corrente de dreno i_D versus v_{DS} para $v_{GS} > V_t$

Transístores de Efeito de Campo

■ Característica i_D - v_{DS} do MOSFET de intensificação

■ Funcionamento como tríodo

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

Para valores de v_{DS} pequenos,

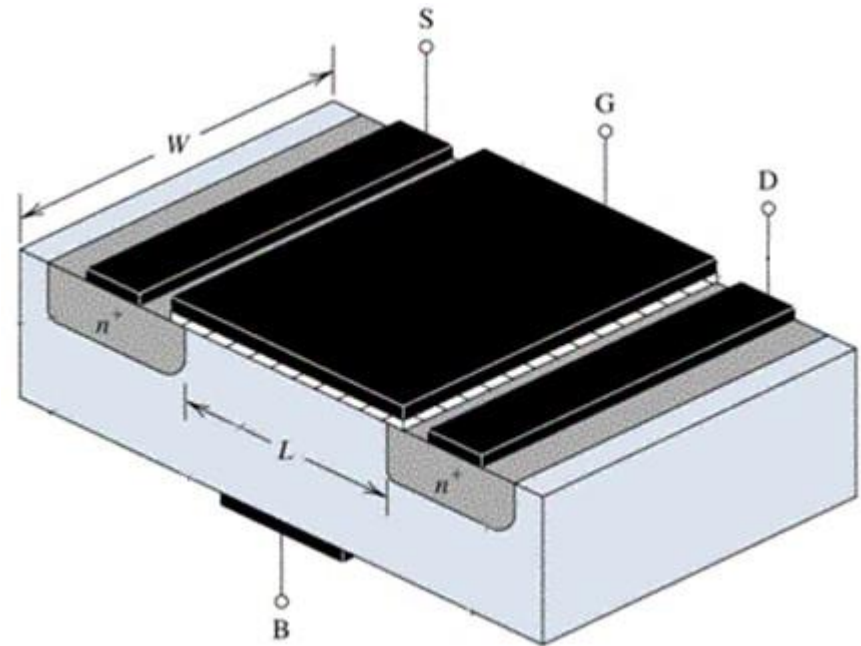
$$\rightarrow i_D \approx k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t) v_{DS}$$

■ Saturação

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2$$

$W = 1$ a $10 \mu\text{m}$, $L = 2$ a $500 \mu\text{m}$

$k'_n = \mu_n C_{ox} \rightarrow$ depende tecnologia do processo utilizado no fabrico
(Constante de transcondutância do processo)



Transístores de Efeito de Campo

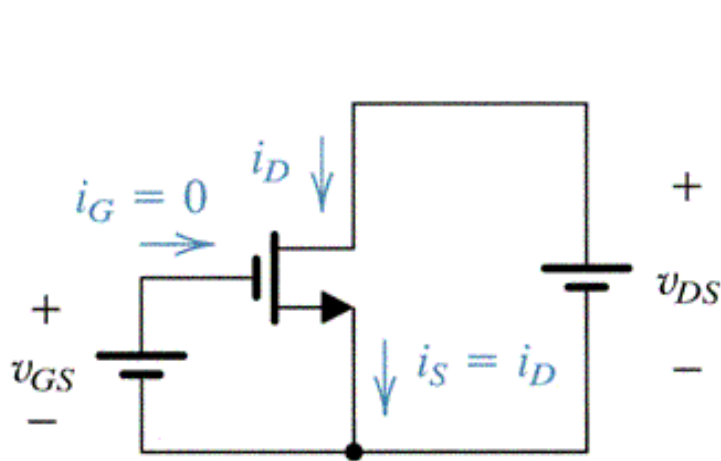
■ Característica i_D - i_{DS} do MOSFET de intensificação

Mobilidade do electrão:	$\mu_n = 580 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Espessura do óxido:	$t_{ox} = 0.02 \text{ a } 0.1 \text{ } \mu\text{m}$
Cte. dieléctrica do óxido:	$\epsilon_{ox} = 3.97\epsilon_0 = 3.5 \times 10^{-13} \text{ F/cm}$
Capacitância do óxido:	$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.75 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \text{ (para } t_{ox} = 0.02 \text{ } \mu\text{m})$ $= 0.35 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \text{ (para } t_{ox} = 0.1 \text{ } \mu\text{m})$
Constante de transcondutância:	$k'_n = \mu_n C_{ox}$ $\approx 100 \text{ } \mu\text{A/V}^2 \text{ (para } t_{ox} = 0.02 \text{ } \mu\text{m})$ $\approx 20 \text{ } \mu\text{A/V}^2 \text{ (para } t_{ox} = 0.1 \text{ } \mu\text{m})$

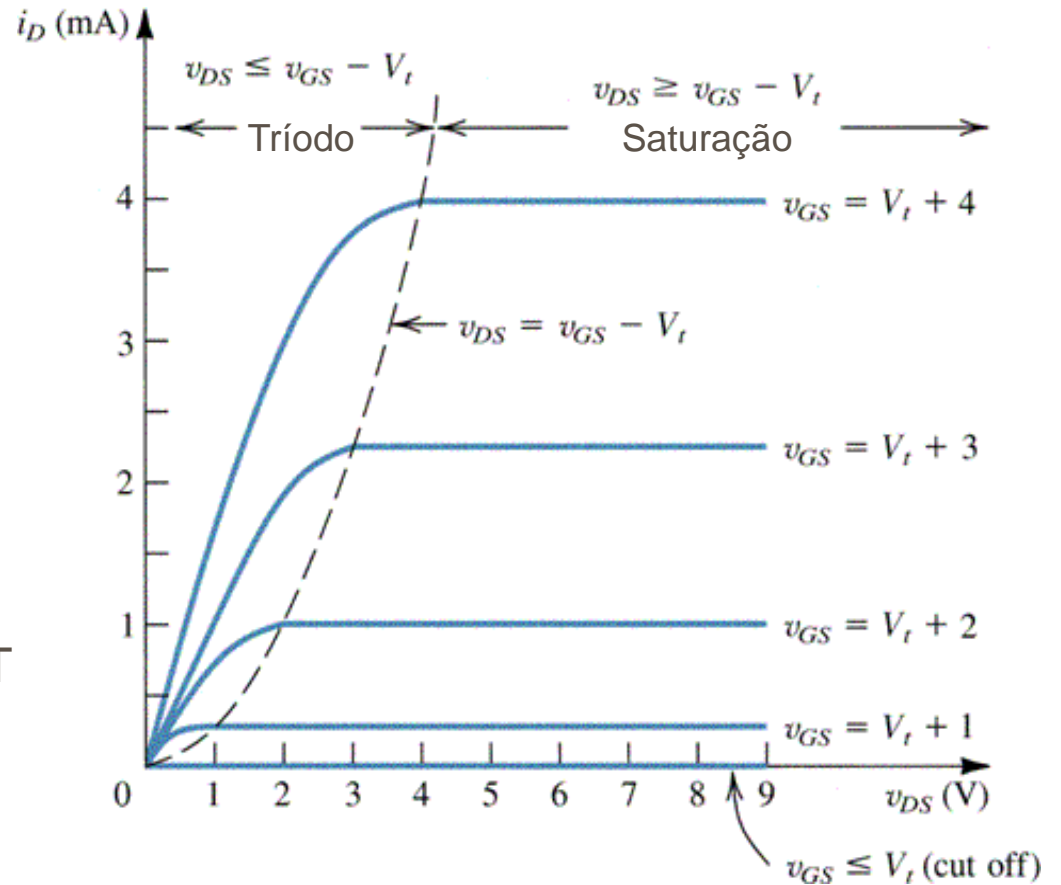
Parâmetros relativos ao processo/tecnologia de fabrico que afectam a característica i_D - i_{DS}

Transístores de Efeito de Campo

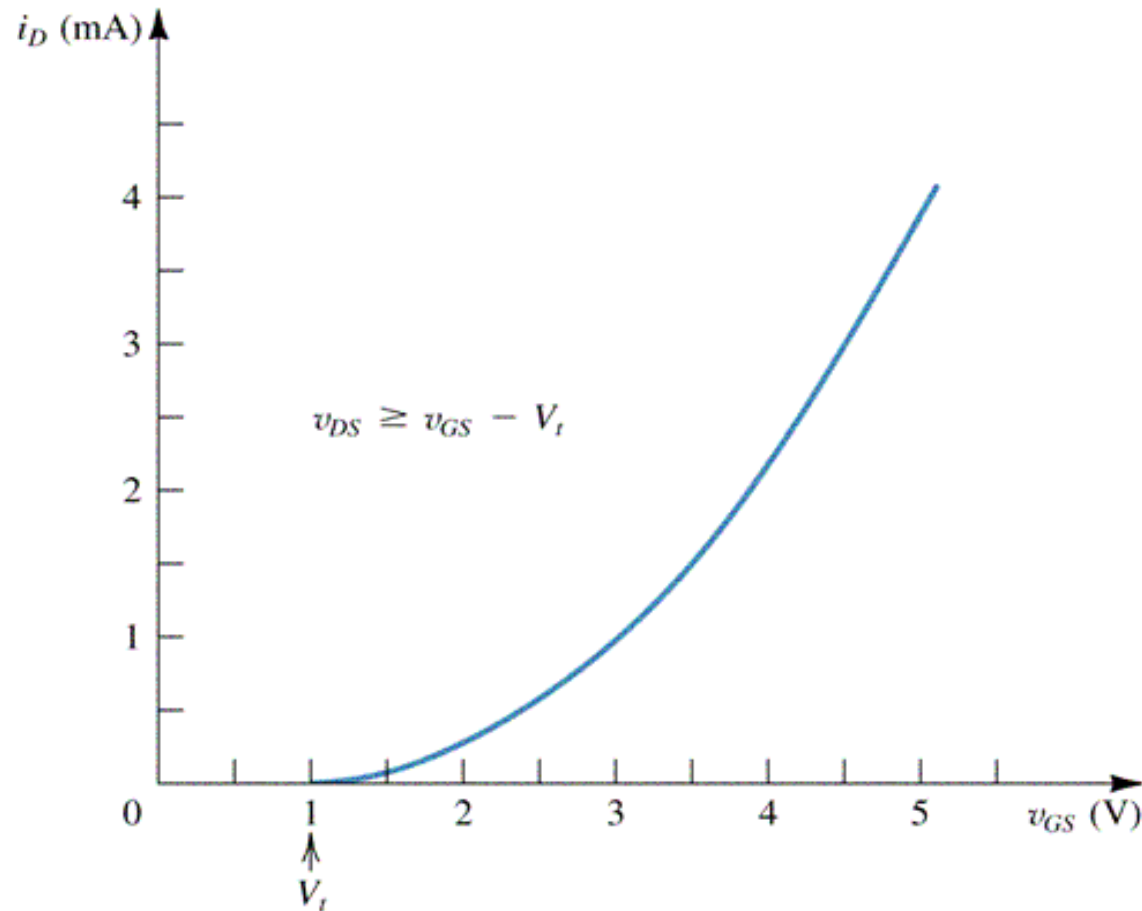
■ Característica i_D - v_{DS} do MOSFET de intensificação



Característica i_D - v_{DS} de um n -MOSFET de intensificação com $V_t = 1$ V



Transístores de Efeito de Campo

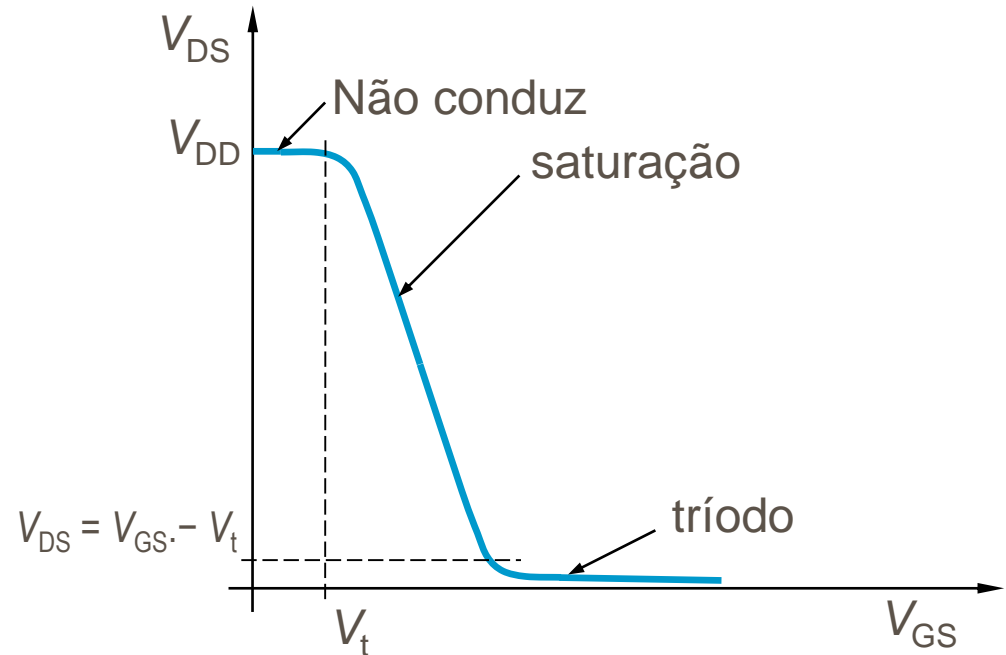
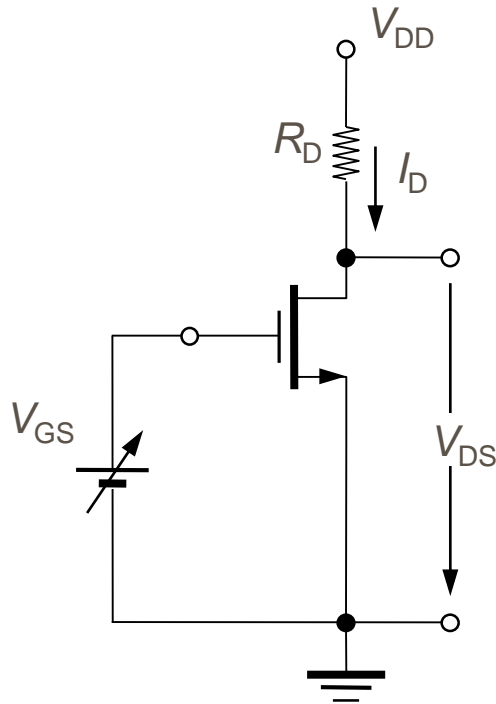


$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

Característica i_D - v_{GS} de um n -MOSFET de intensificação com $V_P = 1$ V

Transístores de Efeito de Campo

■ Polarização do MOSFET de intensificação (exemplo)



$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS}$$

Transístores de Efeito de Campo

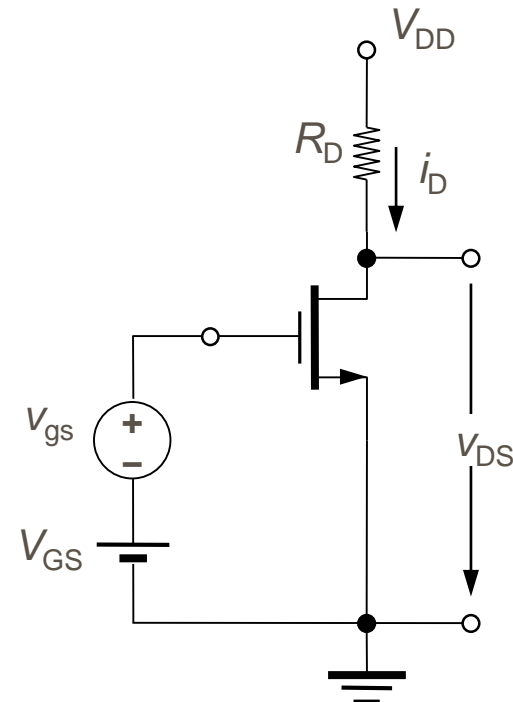
■ Funcionamento do MOSFET como amplificador

- O MOSFET deve ser polarizado na zona de saturação, onde:

$$\begin{cases} i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \\ V_{DD} = R_D i_D + v_{DS} \end{cases}$$

- Para garantir o funcionamento na zona de saturação deve ser:

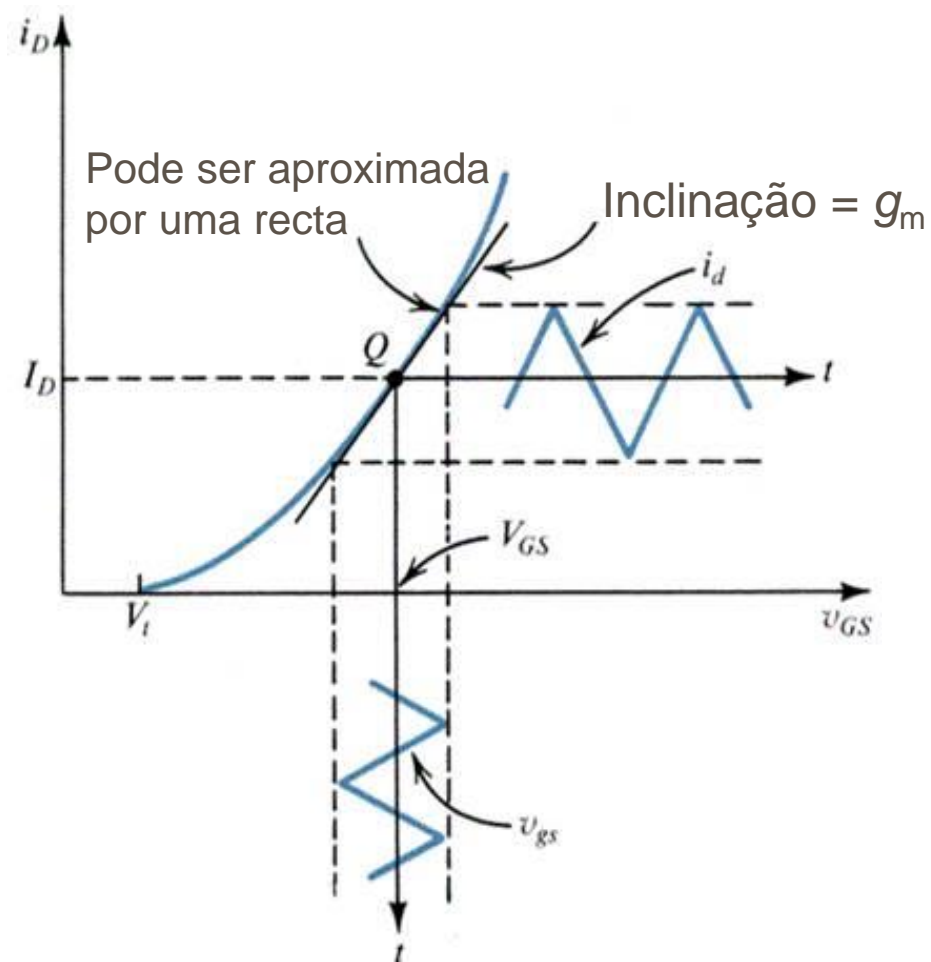
$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$$



Circuito utilizado para estudar o funcionamento do MOSFET como amplificador

Transístores de Efeito de Campo - Amplificador

■ Funcionamento do MOSFET como amplificador

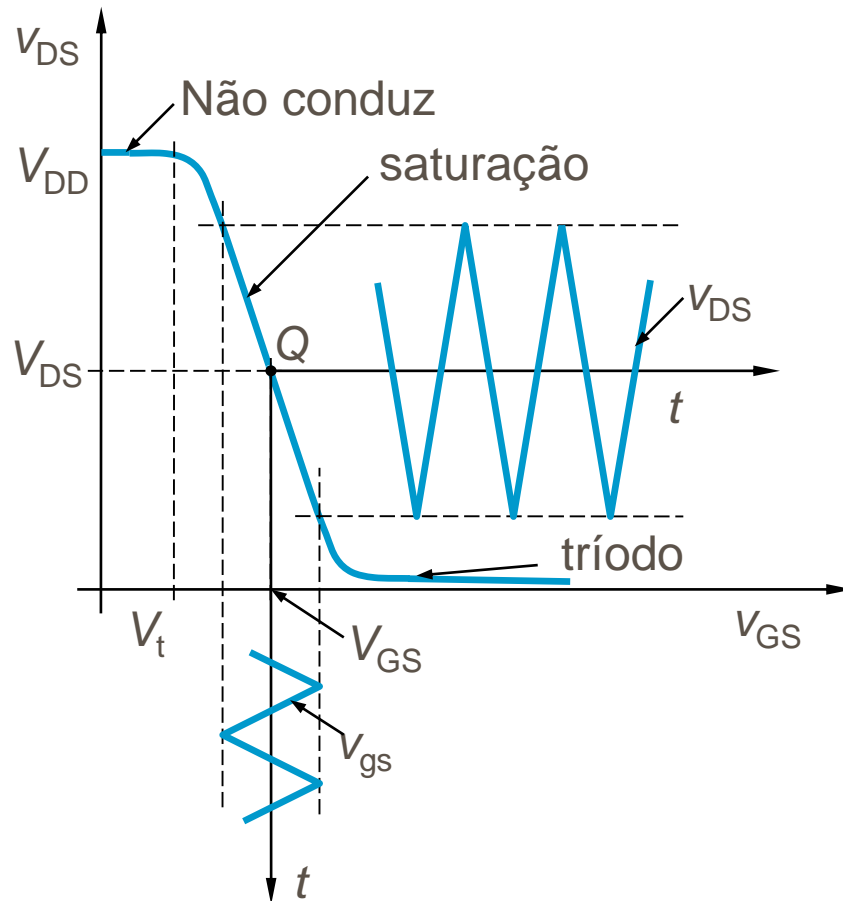


Transcondutância do MOSFET:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{GS}=V_{GS}}$$

Transístores de Efeito de Campo - Amplificador

■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



Ganho em tensão do MOSFET:

$$v_{DS} = V_{DD} - R_D i_D$$

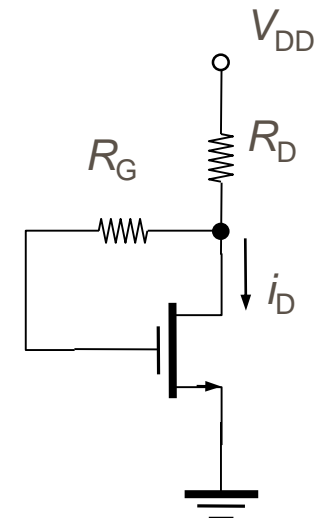
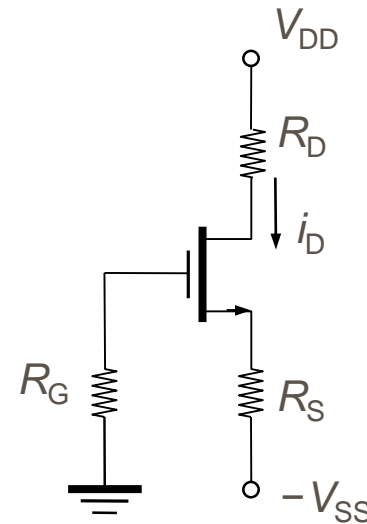
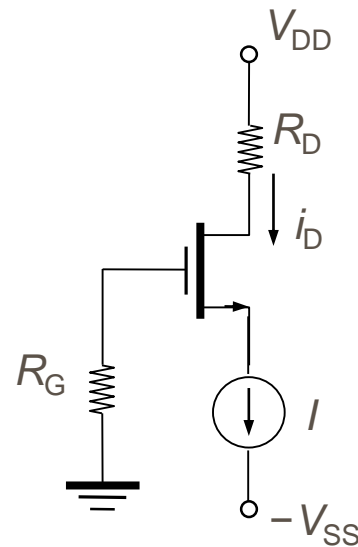
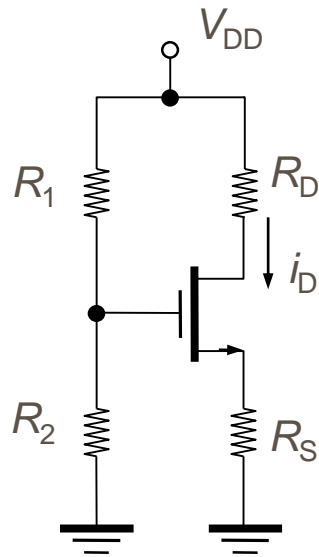
$$\begin{aligned} V_{DS} + v_{ds} &= V_{DD} - R_D (I_D + i_d) \\ &= \underbrace{V_{DD} - R_D I_D}_{V_{DS}} - \underbrace{R_D i_d}_{v_{ds}} \end{aligned}$$

Para pequenos sinais:

$$v_{ds} = -R_D i_d = -g_m R_D v_{gs}$$

$$\rightarrow \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$$

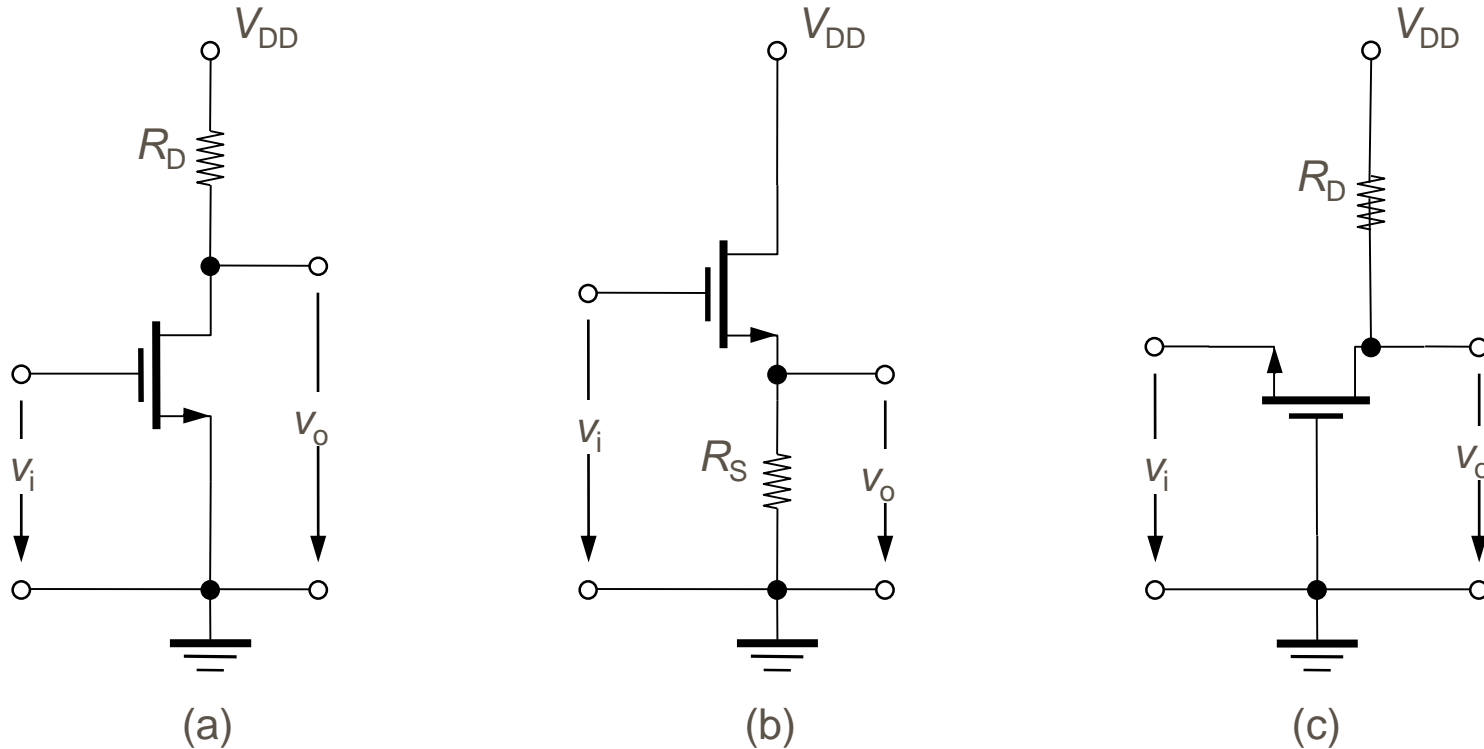
Transístores de Efeito de Campo - Amplificador



Diversos circuitos para polarização do MOSFET de intensificação

Transístores de Efeito de Campo - Amplificador

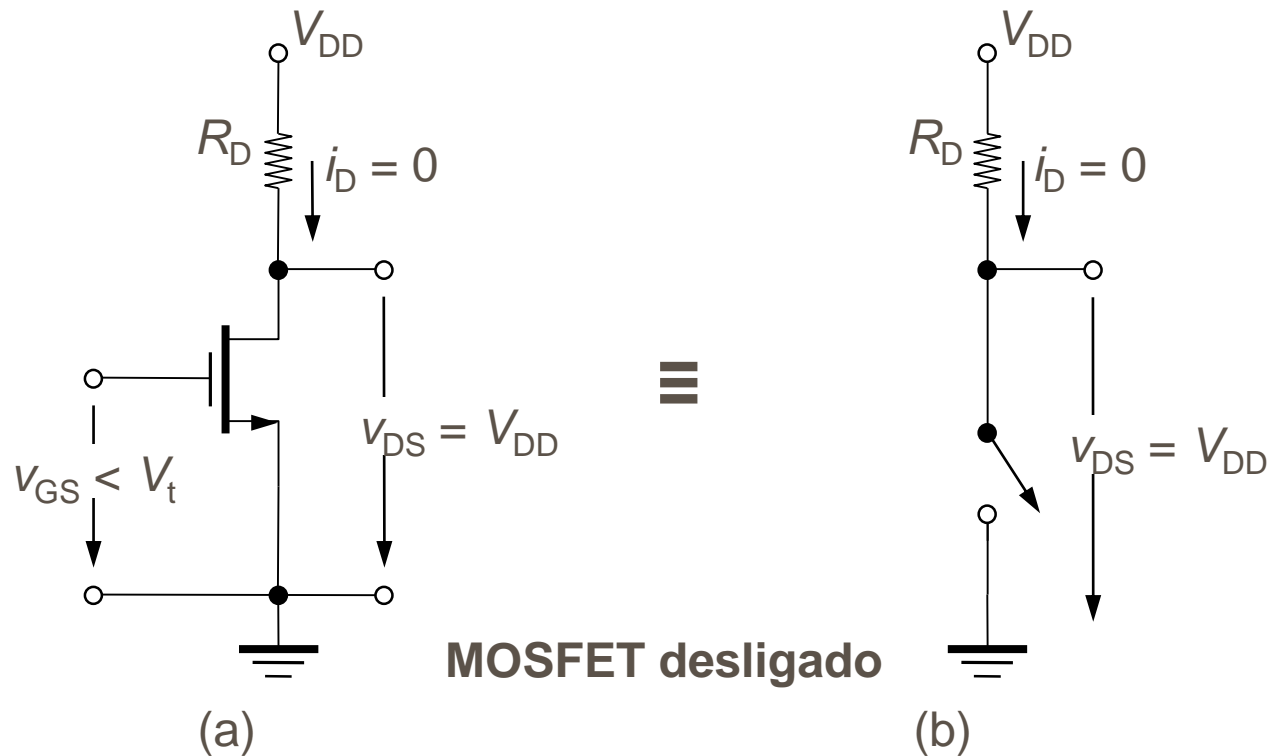
■ Funcionamento do MOSFET como amplificador



Amplificadores com 'n-MOSFET's – configurações básicas: (a) fonte comum; (b) dreno comum (ou seguidor de fonte); (c) gate comum

Transístores de Efeito de Campo - interruptor

■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital (interruptor)

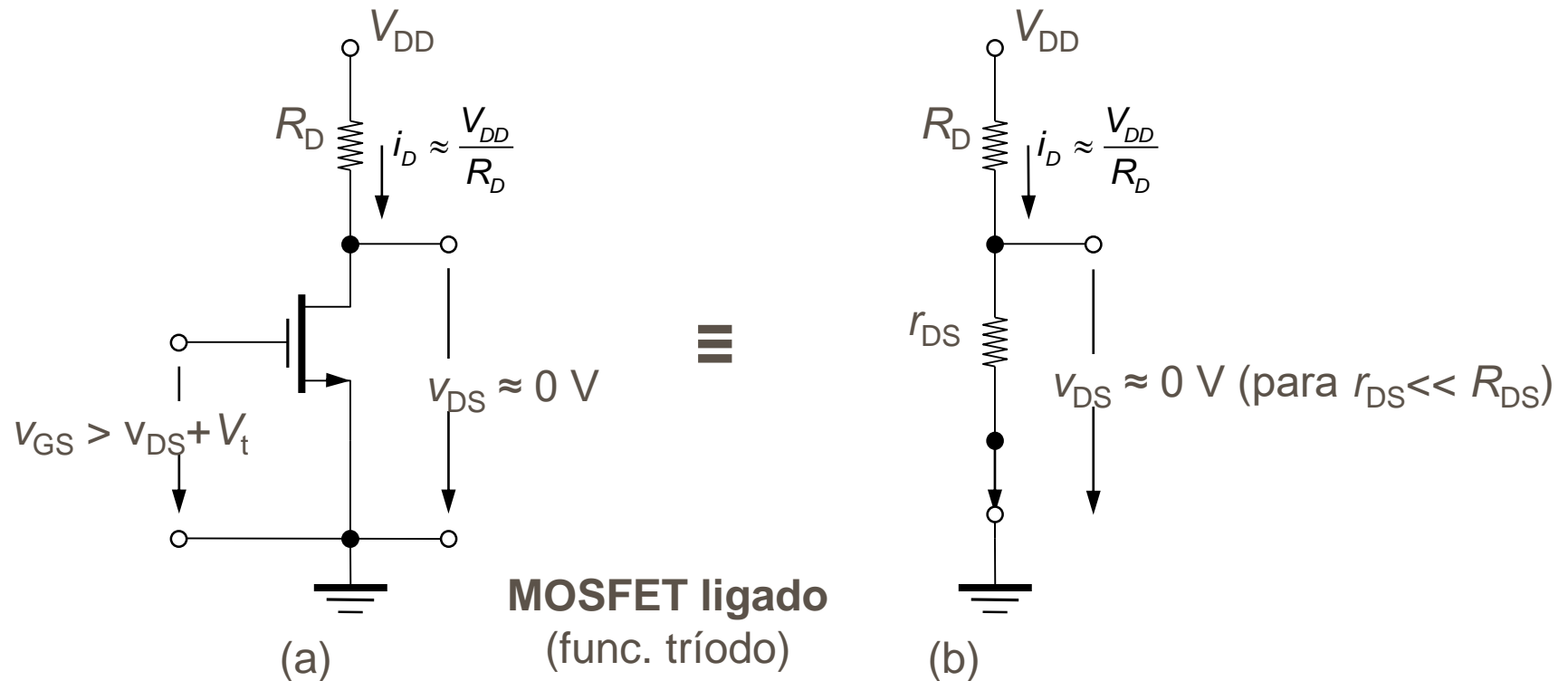


Funcionamento para um nível de tensão de entrada (v_{GS}) baixo:

(a) circuito com $v_{GS} < V_t$ (0 lógico); (b) circuito equivalente

Transístores de Efeito de Campo

■ Funcionamento do MOSFET como dispositivo digital (interruptor)



Funcionamento um nível de tensão de entrada (v_{GS}) elevado:
(a) circuito com $v_{GS} > v_{DS} + V_t$ (1 lógico); (b) circuito equivalente

Comparação entre transístores bipolares e Mosfet de intensificação - resumo

■ Comportamento como interruptor aberto

- Bipolar – Reg. Corte $\rightarrow V_{BE} < 0,7V$ e $I_C = I_B = I_E = 0A$
- Mosfet – Reg. Corte $\rightarrow V_{GS} < V_t$ e $I_D = 0A$

■ Comportamento interruptor fechado

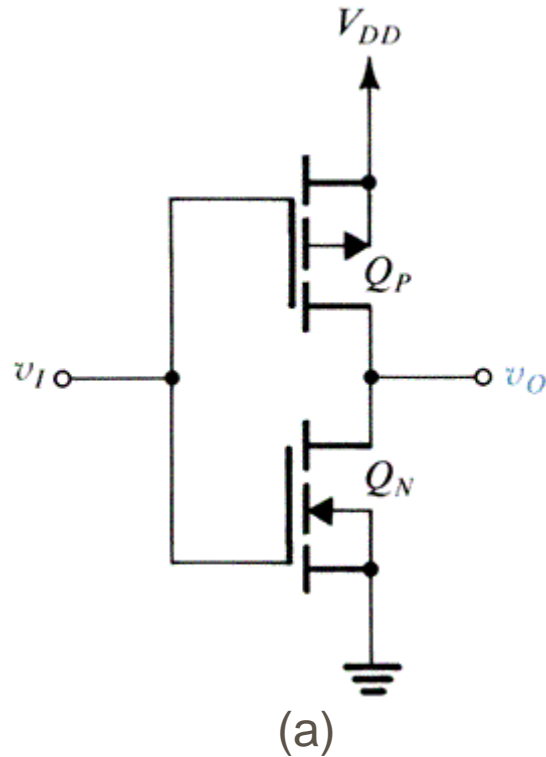
- Bipolar – Reg. Saturação $\rightarrow V_{CE} < 0,2V$ e $I_C = I_{C\text{ sat}}$
- Mosfet – Reg. Tródo $\rightarrow V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$ e $I_D \cong K (V_{GS} - V_t) V_{DS}$ (evitar zona não linear)

■ Comportamento como amplificador (fonte de corrente)

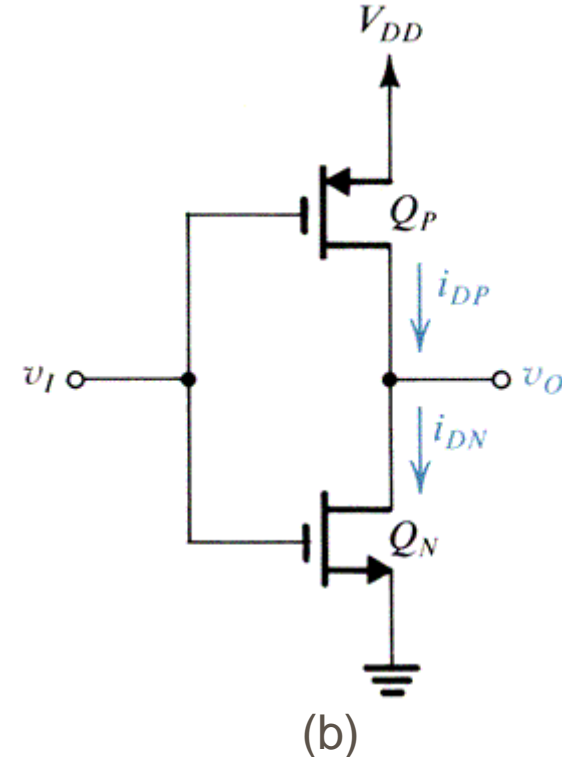
- Bipolar – Reg. ativa $\rightarrow V_{CE} > 0,2V$ e $I_C = \beta I_B$, $I_E = (\beta + 1) I_B$
- Mosfet – Reg. Saturação $\rightarrow V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ e $I_D \cong \frac{1}{2} K (V_{GS} - V_t)^2$

Transístores de Efeito de Campo - CMOS

■ Transístores CMOS



(a)

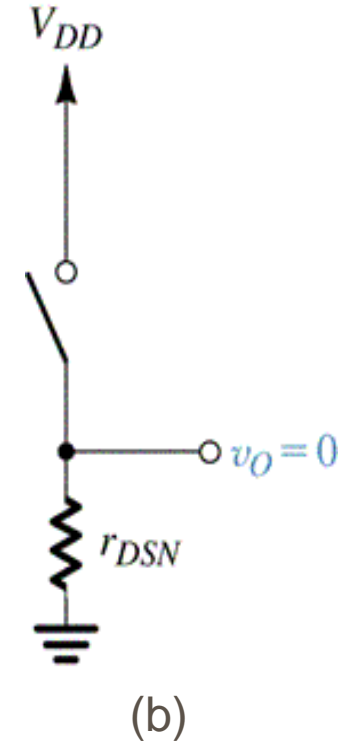
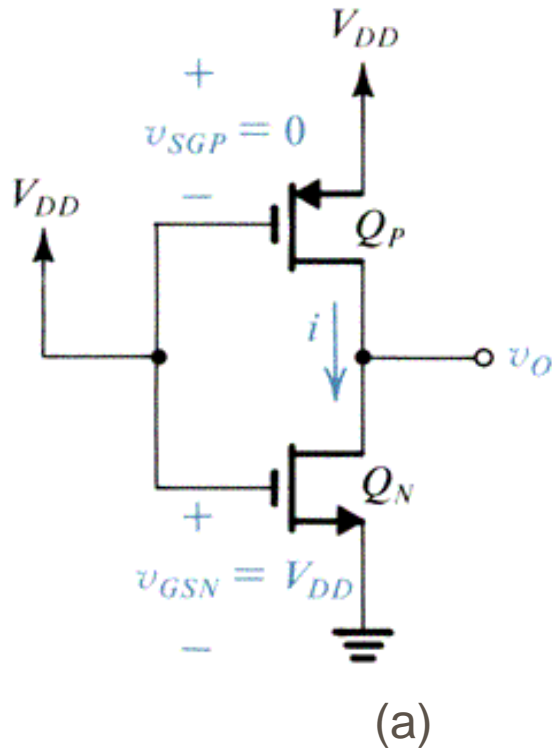


(b)

(a) Inversor CMOS; (b) circuito simplificado

Transístores de Efeito de Campo - CMOS

■ Transístores CMOS

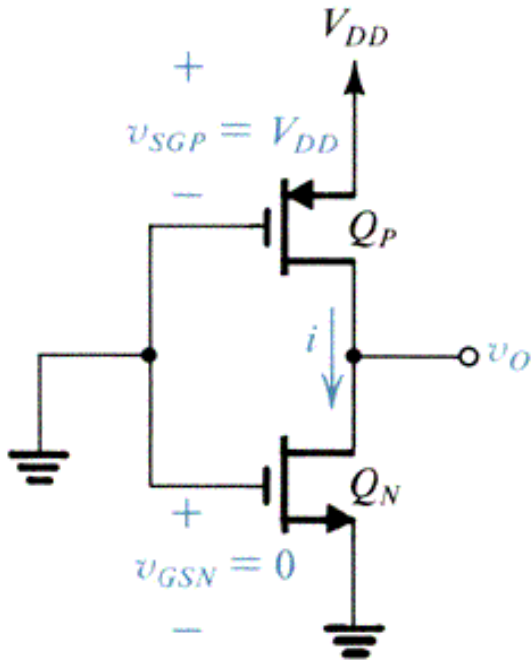


Funcionamento do inversor CMOS para v_i elevado:

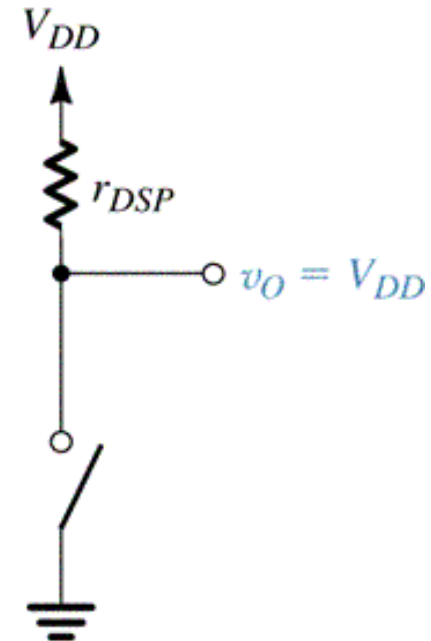
(a) circuito com $v_i = V_{DD}$ (1 lógico); (b) circuito equivalente

Transístores de Efeito de Campo - CMOS

■ Transístores CMOS



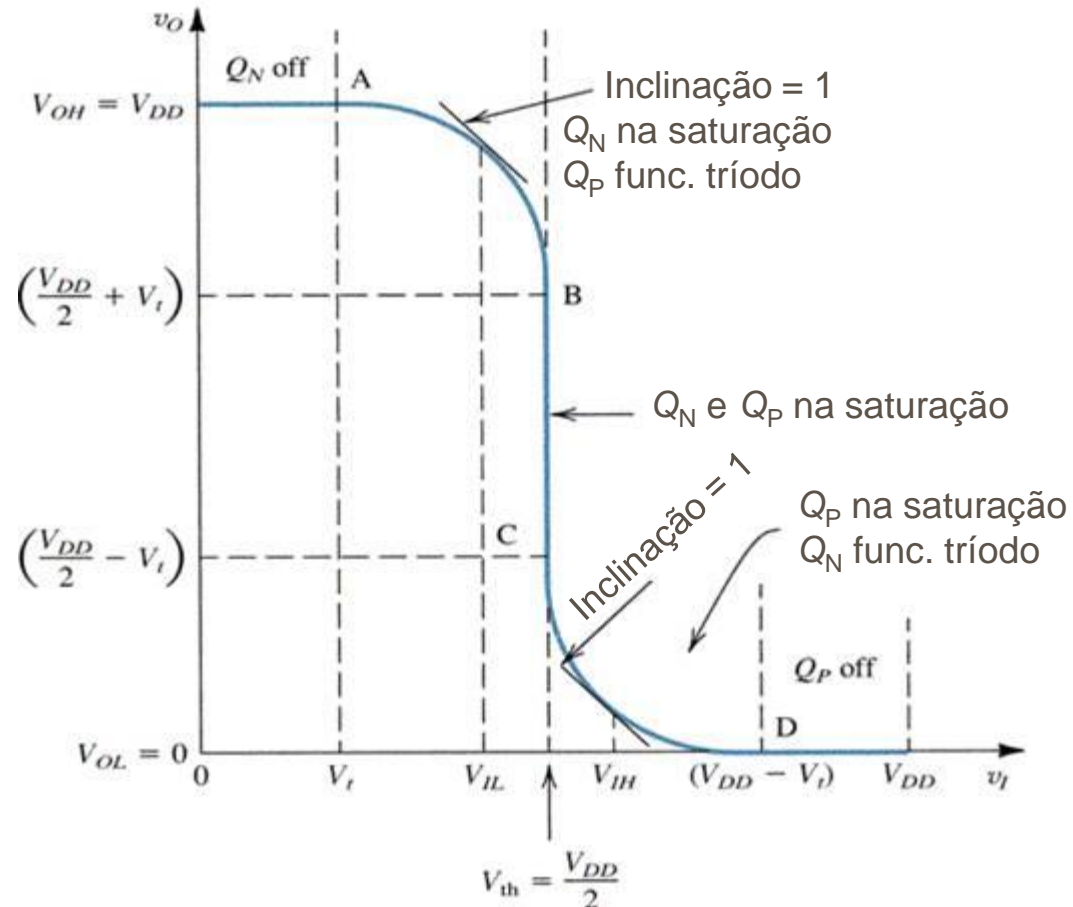
(a)



(b)

Funcionamento do inversor CMOS para v_i baixo:
(a) circuito com $v_i = 0$ V (0 lógico); (b) circuito equivalente

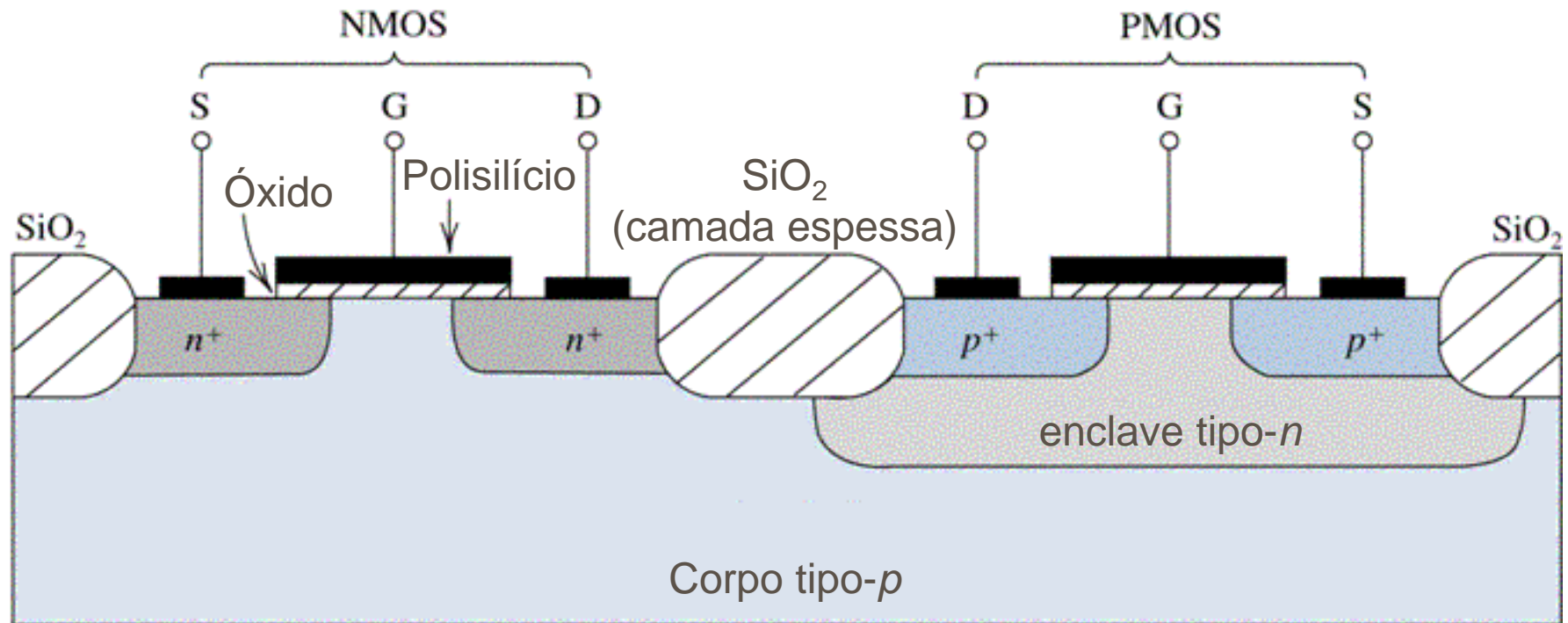
Transístores de Efeito de Campo



Característica de transferência do inversor CMOS

Transístores de Efeito de Campo

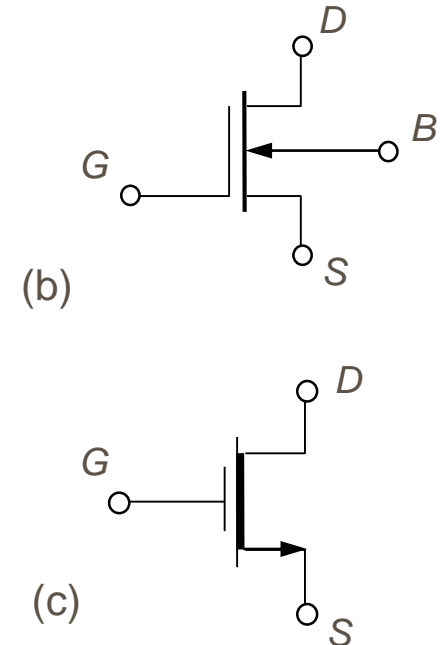
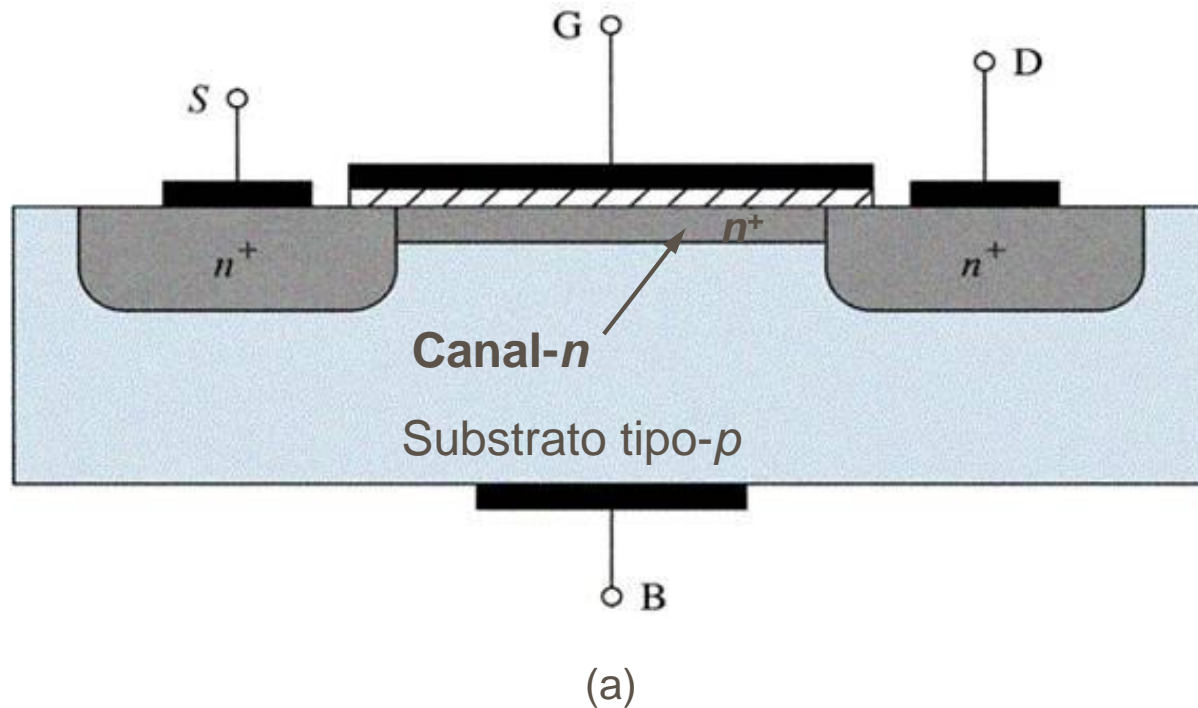
■ CMOS



Estrutura de um par de transístores CMOS

Transístores de Efeito de Campo

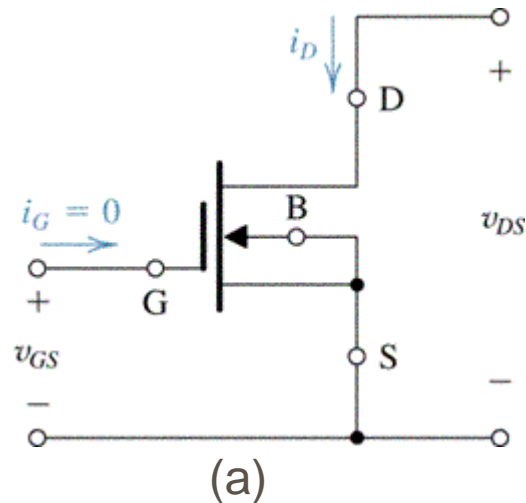
■ MOSFET de depleção



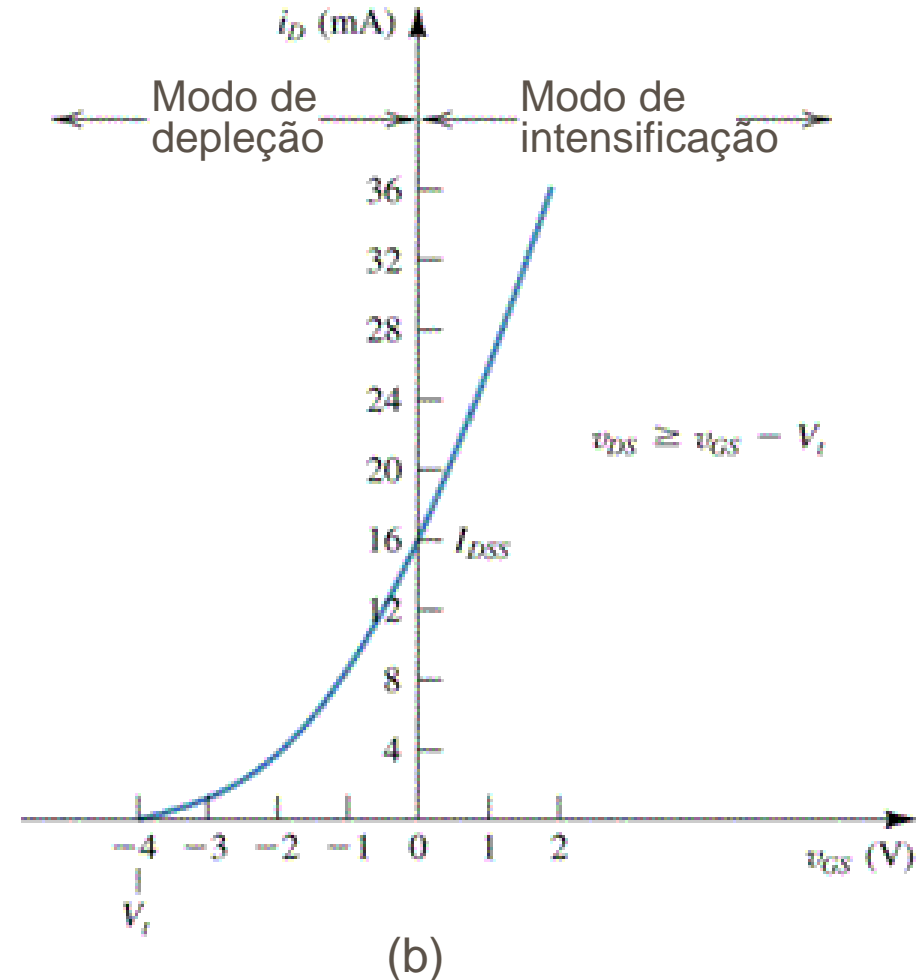
Transístor NMOS do tipo depleção: (a) estrutura física; (b) símbolo; (c) símbolo simplificado admitindo que o terminal do corpo está ligado à fonte

Transístores de Efeito de Campo

■ Característica i_D - v_{GS} do MOSFET de depleção



Característica i_D - i_{GS} de um n -MOSFET de depleção com $V_t = -4V$

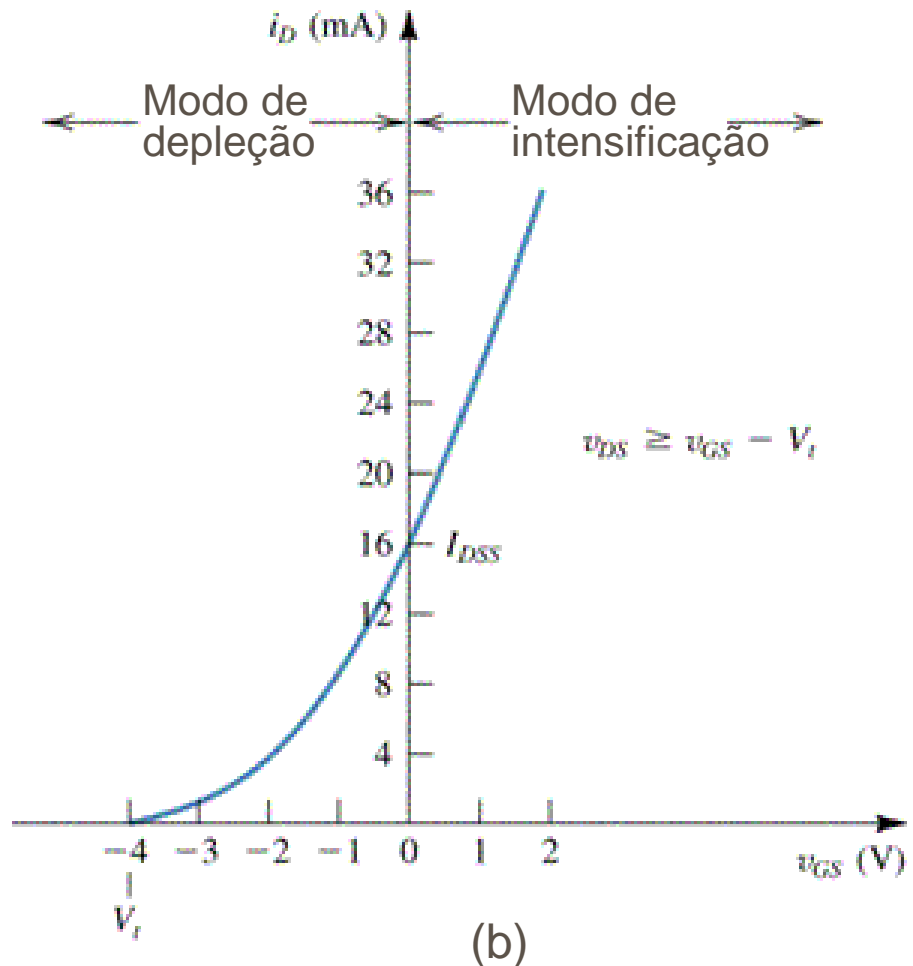


■ Característica i_D - v_{GS} do MOSFET de depleção

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 =$$
$$= \underbrace{\frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_t^2}_{I_{DSS}} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2$$

$$\rightarrow i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t} \right)^2$$
$$\left(I_{DSS} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_t^2 \right)$$

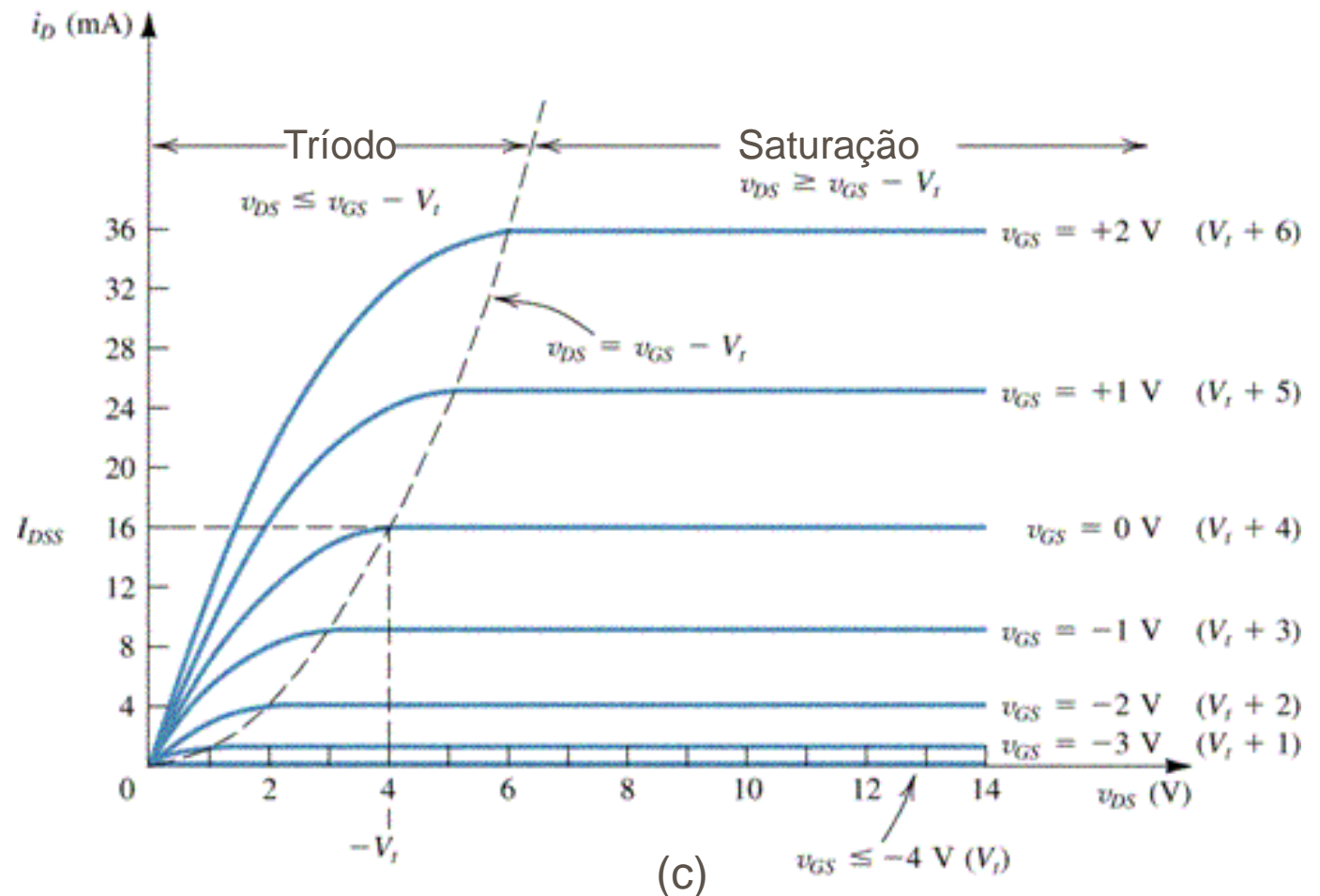
Característica i_D - v_{GS} de um n -MOSFET de depleção com $V_t = -4V$



Transístores de Efeito de Campo

■ Característica i_D - i_{DS} do MOSFET de depleção

Característica i_D - i_{DS}
de um n -MOSFET
de depleção

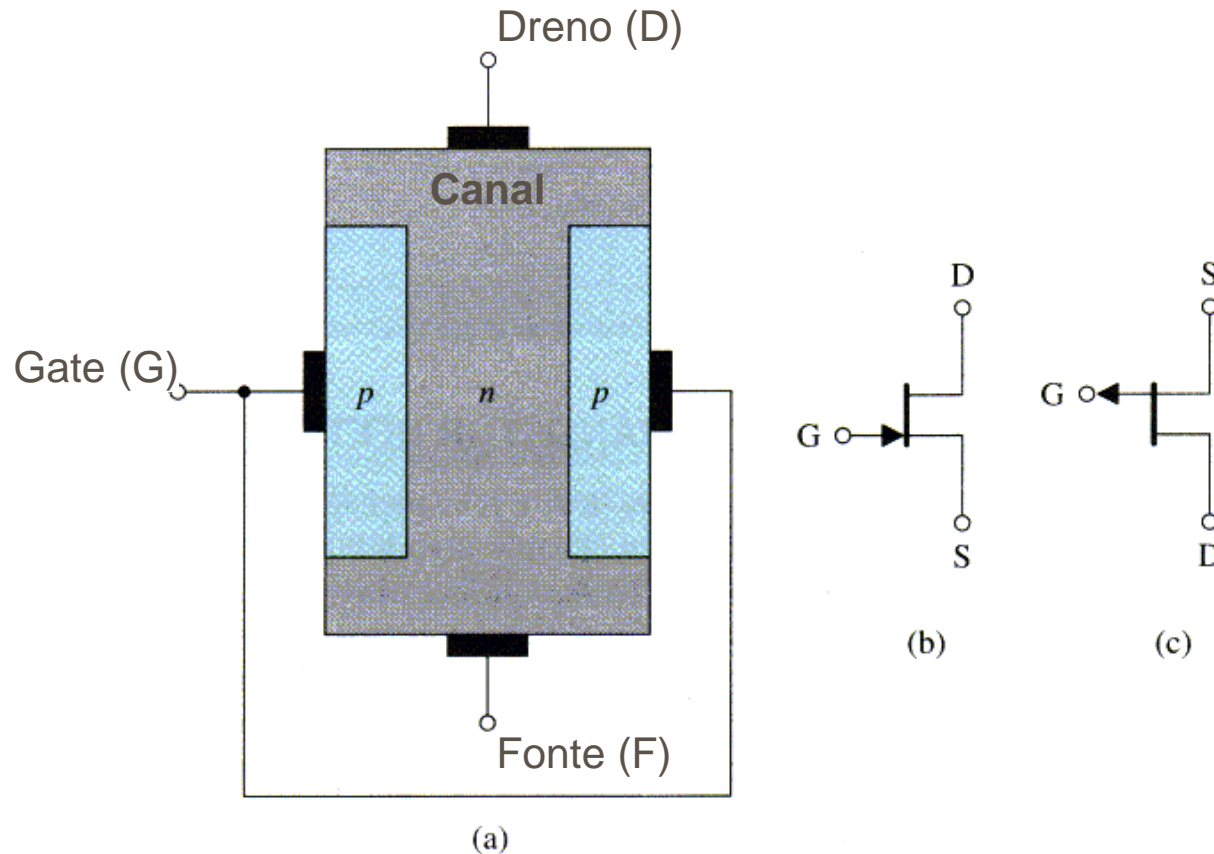


■ O JFET (Junction Field-Effect Transistor)

- Dispositivo controlado por tensão
- Corrente de entrada desprezável (da ordem do pA ou inferior)
- Pode funcionar como amplificador ou como comutador electrónico

Transístores de Efeito de Campo

■ O JFET



JFET canal-n: (a) Estrutura básica (b) símbolo para o JFET canal-n;
símbolo para o JFET canal-p

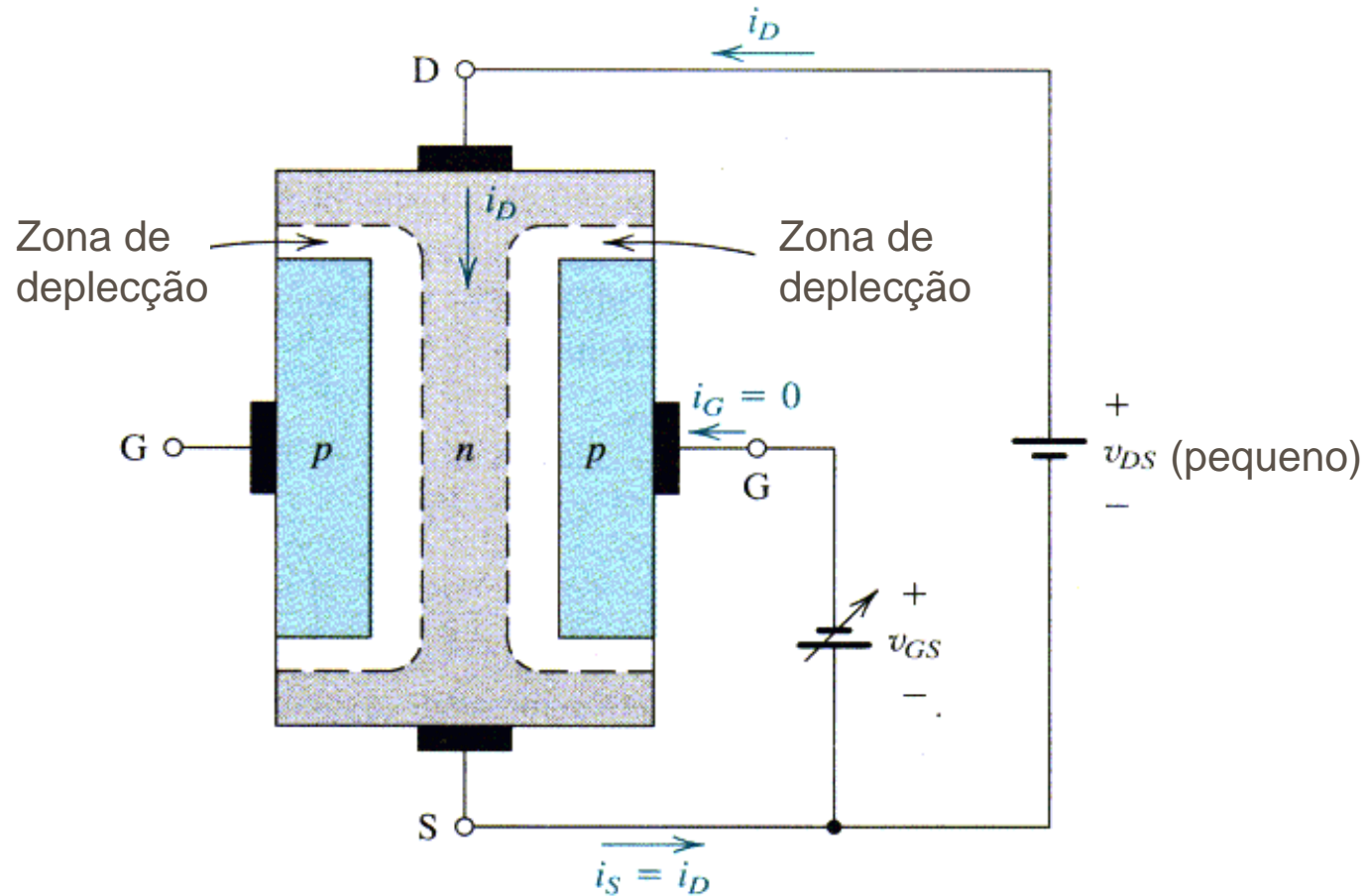
Transístores de Efeito de Campo

- Analogia para o mecanismo de controle do JFET:
 - Fonte: Pressão de água comparada a tensão aplicada entre o dreno e a fonte (V_{DS});
 - Fluxo de água = fluxo de elétrons a partir da fonte em direção ao dreno;
 - Porta – controla o fluxo de elétrons por meio de um sinal de controle (V_{GS}) para o dreno.



Transístores de Efeito de Campo

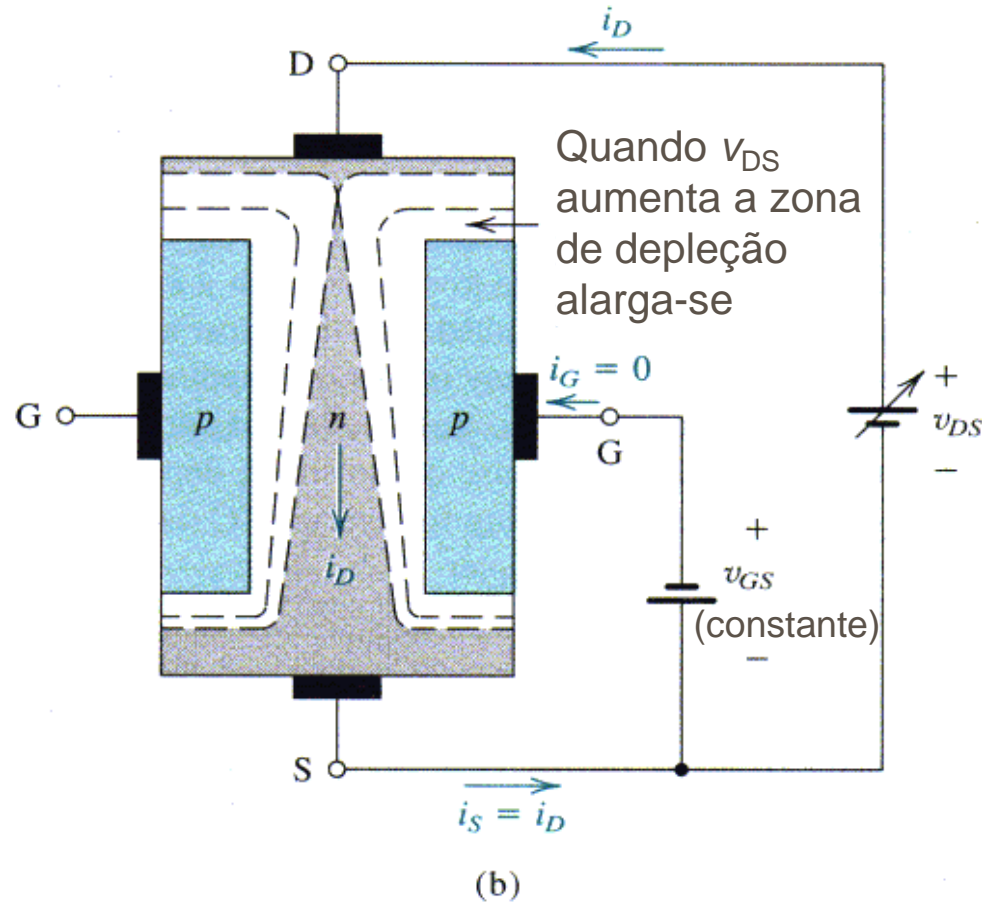
■ O JFET



Princípio de funcionamento do JFET canal-n: (a) pequenos valores de v_{DS}

Transístores de Efeito de Campo

■ O JFET

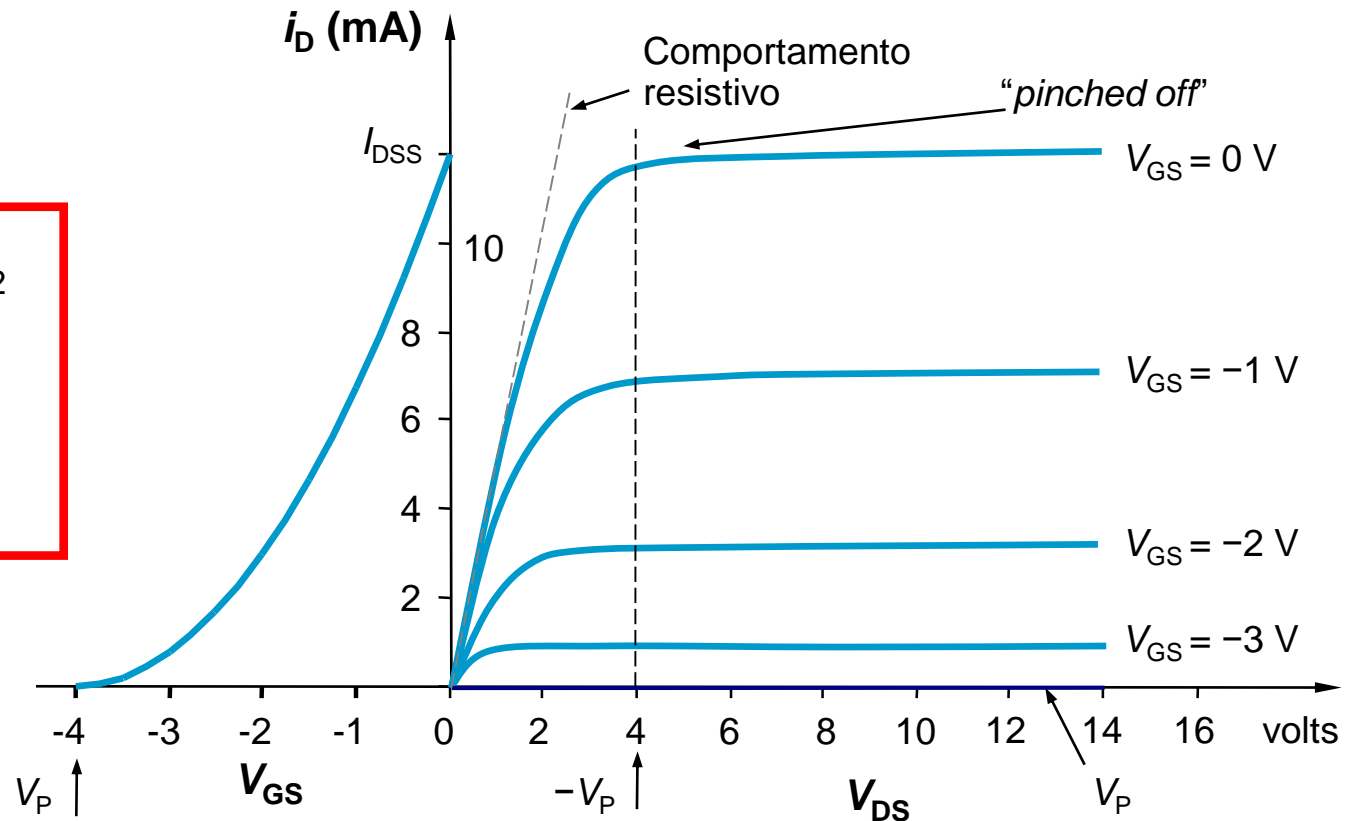


Princípio de funcionamento do JFET canal- n : (b) valores crescentes de v_{DS}

Transístores de Efeito de Campo

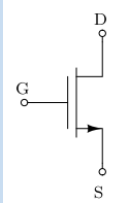
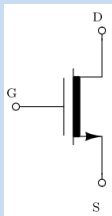
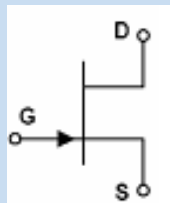
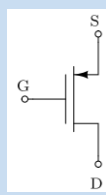
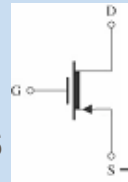
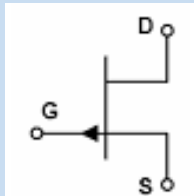
■ 0 JFET

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



Características de saída de um JFET canal-n

Tabela Resumo

	Intensificação	Depleção	JFET canal N	Intensificação	Depleção	JFET canal P
	<div>NMOS</div>	<div>NMOS</div>	<div></div>	<div>PMOS</div>	<div>PMOS</div>	<div></div>
Vt	+	-	-	-	+	+
ON	$V_{GS} > V_t$			$V_{GS} < V_t$		
Tríodo	$V_{DS} < V_{GS} - V_t$			$V_{DS} > V_{GS} - V_t$		
	$I_D \approx K'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{DS}$					
Saturação	$V_{DS} > V_{GS} - V_t$			$V_{DS} < V_{GS} - V_t$		
	$I_D \approx \frac{1}{2} K'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$					