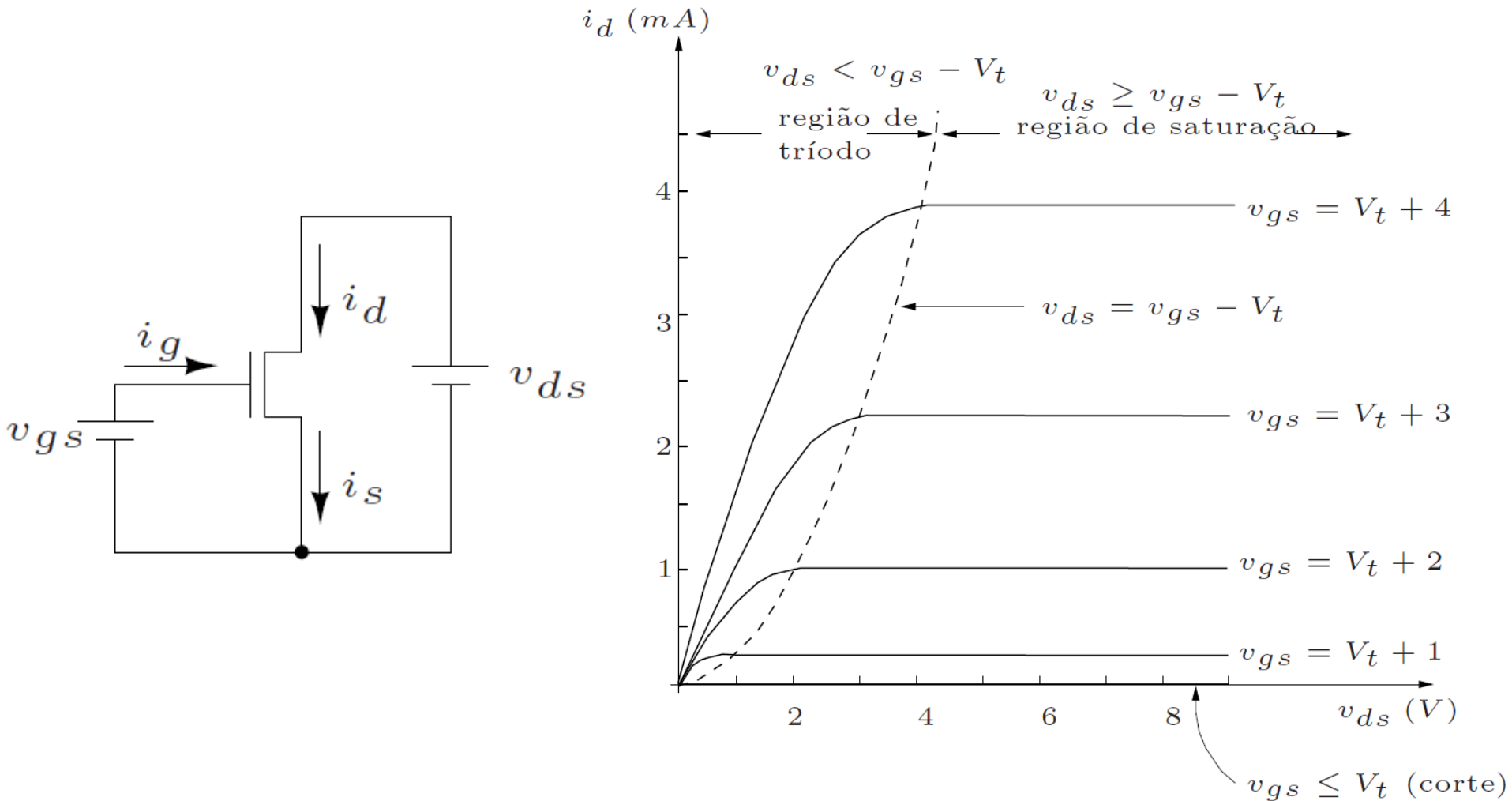


# Aula 3

## Características $I_d \times V_{gs}$ dos MoSFets

Gerardo Rocha

# Características $I_d$ x $V_{gs}$



# Características $I_d \times V_{gs}$

- Existem três regiões de operação distintas:
  - A região de corte.
  - A região de triodo.
  - A região de saturação.
- A região de saturação é usada para o MOSFET funcionar como amplificador.
- Para operações de comutação, são usadas a região de corte e de triodo.

# Características $I_d \times V_{gs}$

- Região de corte:  $v_{gs} < V_t$   $I_d = 0$ .
- Região de triodo:
  - Primeiro é necessário induzir um canal:  $v_{gs} \geq V_t$ .
  - Depois é necessário manter  $v_{ds}$  baixo o suficiente para que o canal permaneça contínuo:  $v_{gd} > V_t$ .
  - Como:
$$v_{gd} = v_{gs} - v_{ds}, \quad v_{ds} < v_{gs} - V_t.$$
  - A característica  $i_d \times v_{ds}$ , é:

$$i_d = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{gs} - V_t) v_{ds} - \frac{1}{2} v_{ds}^2 \right]$$

# Características $I_d \times V_{gs}$

- Característica  $i_d \times v_{ds}$  perto da origem:

$$i_d \simeq k'_n \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t) v_{ds}$$

- Representa a operação do MOSFET como uma resistência  $r_{ds}$ :

$$r_{ds} = \frac{v_{ds}}{i_d} = \left[ k'_n \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t) \right]^{-1}$$

- cujo valor é controlado por  $v_{gs}$ .

# Características $I_d$ x $V_{gs}$

- Região de saturação:
  - Canal induzido:  $v_{gs} \geq V_t$ .
  - Depois é afunilado até ficar estrangulado. Para isso:

$$v_{gd} \leq V_t, \quad \text{ou} \quad v_{ds} \geq v_{gs} - V_t$$

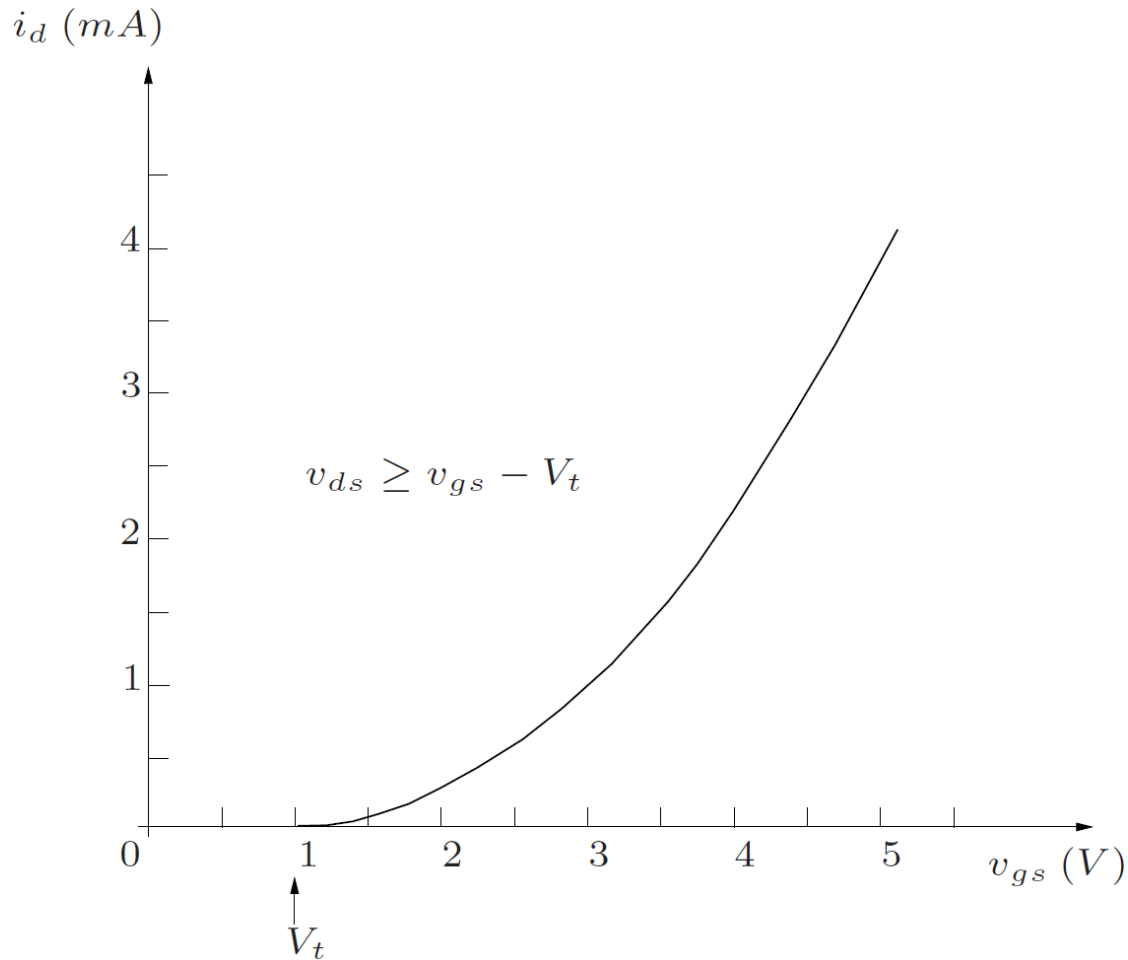
- Na fronteira entre a região de triodo e a região de saturação:

$$v_{ds} = v_{gs} - V_t$$

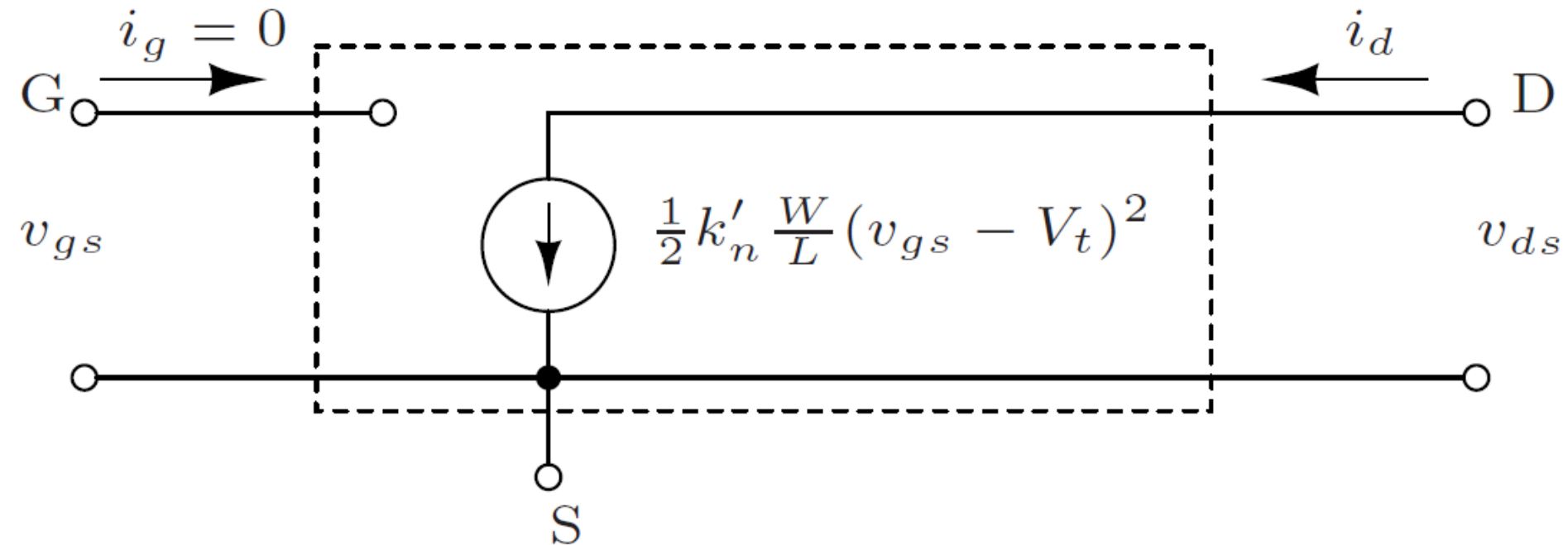
$$I_d = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t)^2.$$

# Características $I_d$ x $V_{gs}$

Na saturação, o MOSFET garante  $I_d$  independente de  $v_{ds}$  e determinada apenas por  $v_{gs}$ , de acordo com uma relação quadrática:



# Modelo equivalente para sinais grandes na saturação





# Resistência de saída na saturação

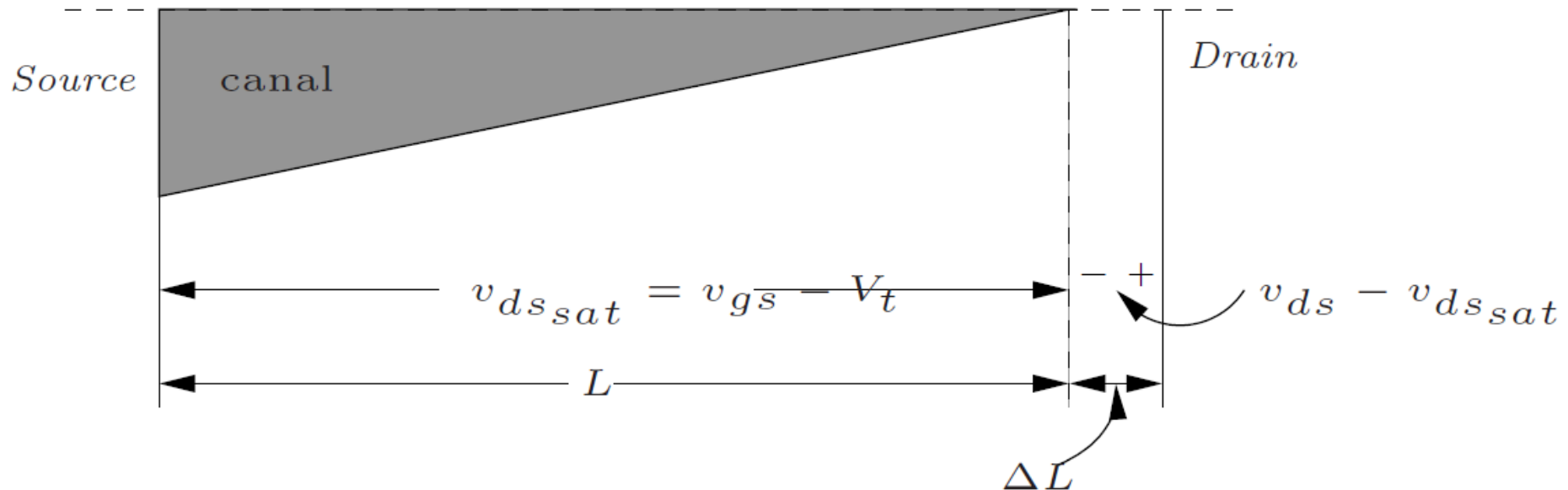
- A independência entre  $i_d$  e  $v_{ds}$  na saturação e a correspondente resistência de saída infinita no drain é uma idealização baseada na premissa de que uma vez que o canal fica estrangulado do lado do drain, qualquer aumento em  $v_{ds}$  não produz qualquer efeito na geometria do canal.
- Na prática, aumentando  $v_{ds}$  para além de  $v_{dssat}$  afeta a geometria do canal.
- Se  $v_{ds}$  aumentar, o ponto de estrangulamento vai mover-se um pouco do drain em direção à source.
- A tensão nas extremidades do canal permanece constante:

$$v_{ds_{sat}} = v_{gs} - V_t$$

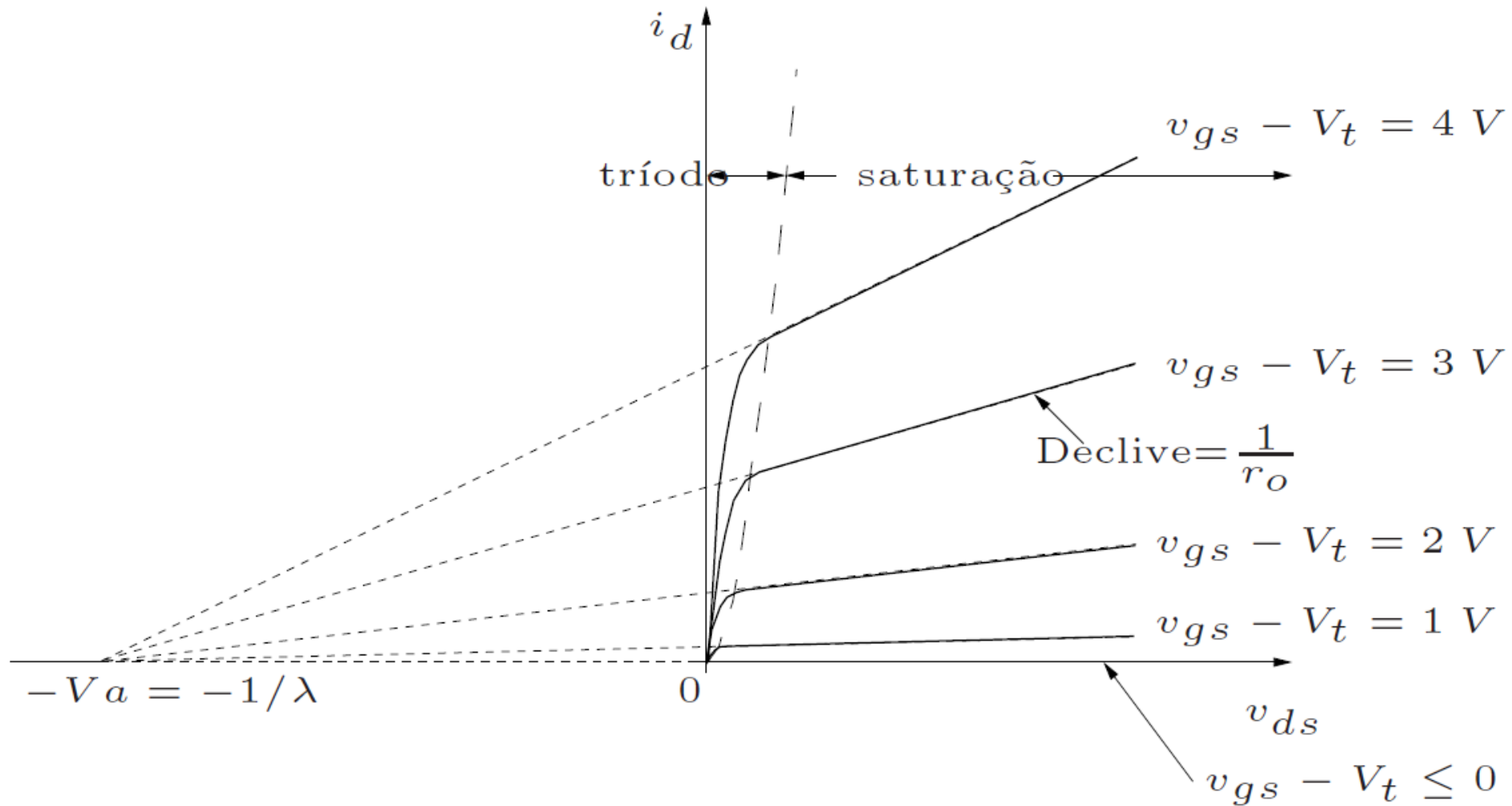
- A tensão adicional aplicada ao drain aparece como uma queda de tensão ao longo da zona de depleção entre a extremidade do canal e o drain.

# Resistência de saída na saturação

- O comprimento efectivo do canal é reduzido, um fenómeno a que se dá o nome de “modulação do comprimento do canal”. Como  $i_d$  é inversamente proporcional ao comprimento do canal, se este diminui,  $i_d$  aumenta.



# Resistência de saída na saturação



# Resistência de saída na saturação

- Deve introduzir-se o factor:

$$(1 + \lambda v_{ds})$$

- Na equação:

$$I_d = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{ds})$$

- onde a constante positiva  $\lambda$  é um parâmetro do MOSFET.

# Resistência de saída na saturação

- O prolongamento das linhas rectas das características do MOSFET interceptam o eixo  $v_{ds}$  no ponto  $v_{ds} = -1/\lambda = -V_A$ , em que  $V_A$  é uma tensão positiva à qual se chama “tensão de Early”.
- Tipicamente,  $\lambda$  varia entre  $0.005 \text{ V}^{-1}$  e  $0.03 \text{ V}^{-1}$ .
- Correspondentemente,  $V_A$  está na gama dos 30 V aos 200 V.
- Os dispositivos com comprimentos de canal menores sofrem mais o efeito da modulação do comprimento do canal já que  $V_A$  é directamente proporcional a  $L$ .

# Resistência de saída na saturação

- A modulação do comprimento do canal faz com que a resistência de saída na saturação seja finita.

$$r_o = \left[ \frac{\partial i_d}{\partial v_{ds}} \right]_{v_{gs}=\text{constante}}^{-1}$$

- resulta em:

$$r_o = \left[ \lambda \frac{k'_n}{2} \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t)^2 \right]$$

# Resistência de saída na saturação

- desprezando  $1 + v_{ds}$ ,  $r_o$  pode ser aproximada por:

$$r_o \simeq (\lambda I_D)^{-1}$$

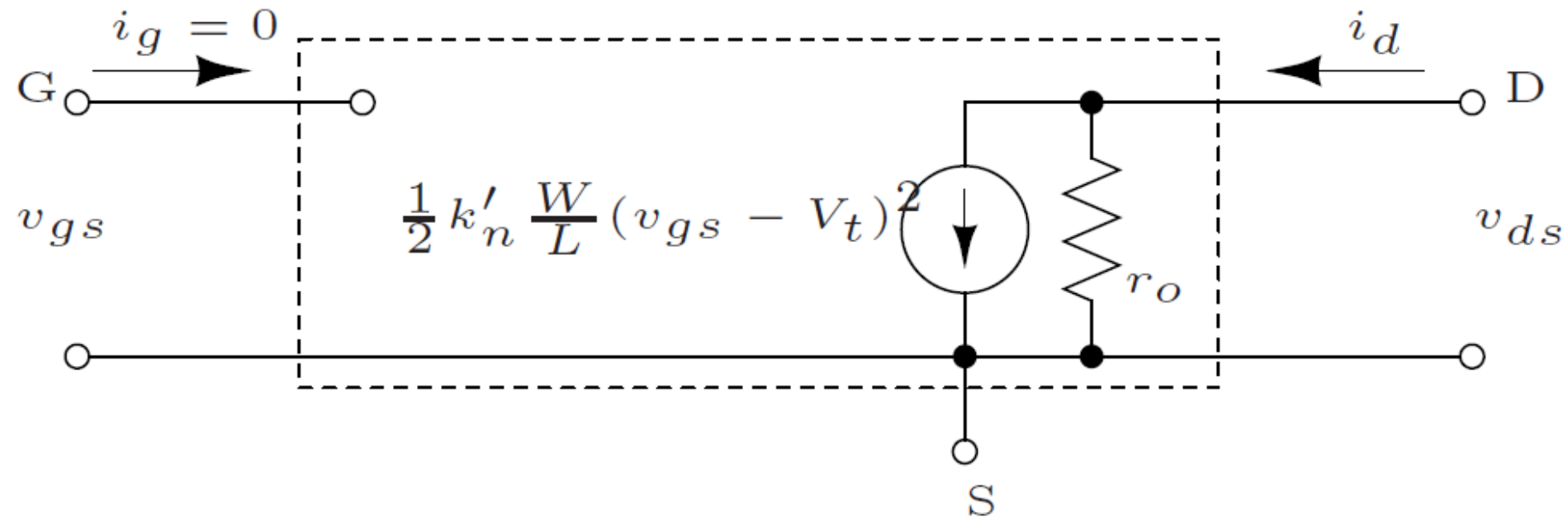
- Outra forma:

$$r_o \simeq \frac{V_A}{I_D}$$

- Note-se que a resistência de saída é inversamente proporcional à corrente de polarização de drain.

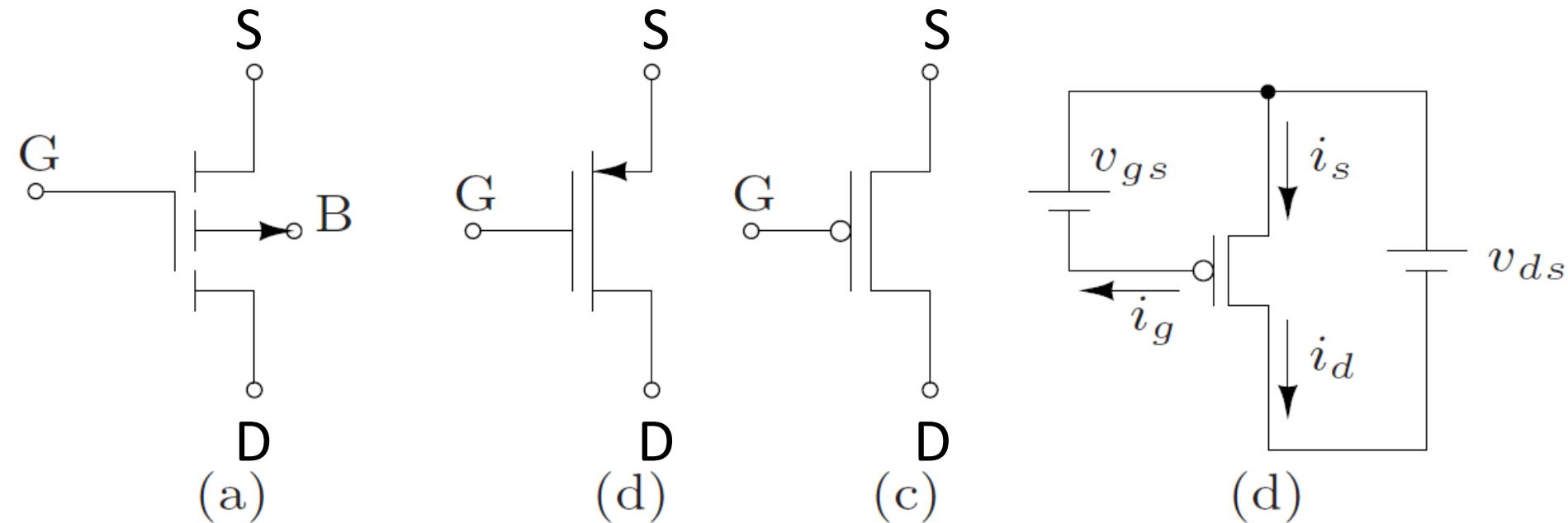
# Resistência de saída na saturação

- Novo modelo para grandes sinais do MOSFET de intensificação de canal n:





# MOSFET de canal p



- (a) Símbolo do MOSFET de canal p do tipo intensificação.
- (b) Símbolo simplificado para o caso do substrato estar ligado à source.
- (c) Símbolo simplificado para o caso do substrato estar ligado à terra.
- (d) O MOSFET com tensões aplicadas e as correntes a circularem nos sentidos indicados:  $i_g = 0$  e  $i_s = i_d$ .

# MOSFET de canal p

- No dispositivo de canal p, a tensão de threshold é negativa.
- Para que o canal do tipo p seja induzido, é necessário que a tensão aplicada à gate seja mais negativa do que  $V_t$ :

$$v_{gs} \leq V_t \quad \text{ou} \quad |v_{gs}| \geq |V_t| \quad \text{ou} \quad v_{sg} \geq |V_t|$$

- A tensão aplicada ao drain deverá ser mais negativa do que a tensão da source.
- A corrente  $i_d$  circula da source para o drain.

# MOSFET de canal p

- Para que o MOSFET de canal p opere na região de triodo:

$$v_{sd} < v_{sg} - |v_t|$$

$$i_d = k'_p \frac{W}{L} \left[ (v_{sg} - |v_t|) v_{sd} - \frac{1}{2} v_{sd}^2 \right]$$

$$k'_p = \mu_p C_{ox}$$

- em que  $\mu_p$  é a mobilidade das lacunas no canal p.
- Para operar na saturação:

$$v_{sd} \geq v_{sg} - |v_t|$$

$$i_d = \frac{1}{2} k'_p \frac{W}{L} (v_{sg} - |v_t|)^2 (1 + \lambda v_{sd})$$

# O papel do substrato

- O substrato normalmente é ligado ao terminal da source, o que resulta numa junção pn entre o substrato e o canal induzido, com uma tensão de polarização nula.
- Neste caso, o substrato não desempenha nenhum papel na operação do circuito e pode pura e simplesmente ser ignorado.
- Em circuitos integrados o substrato é normalmente comum a vários MOSFETs.
- Para que seja mantida a condição de corte (não condução) em todas as junções substrato-canal, o substrato dos transístores NMOS é normalmente ligado à tensão mais negativa existente no circuito.
- Nos transístores PMOS é ligado à tensão mais positiva do circuito.

# O papel do substrato

- A tensão de polarização inversa entre a source e o substrato  $V_{sb}$  vai influenciar a operação do dispositivo.
- Uma tensão de polarização inversa irá alargar a região de depleção, o que reduz a profundidade do canal.
- Para que o canal volte à sua forma inicial,  $v_{gs}$  tem que aumentar.
- O efeito de  $V_{sb}$  no canal pode ser representado por uma alteração na tensão de threshold  $V_t$ .

# O papel do substrato

- Aumentando a tensão  $V_{sb}$ , resulta num aumento de  $V_t$ :

$$V_t = V_{to} + \gamma \left[ \sqrt{2\phi_f + V_{sb}} - \sqrt{2\phi_f} \right]$$

- $V_{to}$  é a tensão de threshold para  $V_{sb} = 0$ .
- $\phi_f$  é um parâmetro físico, em que  $2\phi_f$  tem tipicamente o valor de 0.6 V.
- $\gamma$  é um parâmetro do processo de fabrico dado por:

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q N_A \epsilon_s}}{C_{ox}}$$

- $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C 'é a carga do eletrão.
- $N_A$  é a concentração de dopantes do substrato p.
- $\epsilon_s = 1.04 \times 10^{-12}$  F/cm é a permitividade do silício.

# O papel do substrato

- Um aumento em  $V_{sb}$  produz um aumento em  $V_t$ , que resulta numa descida do valor de  $i_d$ , mesmo com  $V_{gs}$  constante.
- Isto significa que a tensão do substrato também controla  $i_d$ .
- Portanto o substrato actua como outra gate para o MOSFET.
- Este fenómeno chama-se “efeito de corpo” (body effect) e o parâmetro  $\gamma$  é conhecido como “parâmetro do efeito de corpo”.

# Efeitos da temperatura

- Tanto  $V_t$  como  $k'_n$  são sensíveis à temperatura.
- O valor de  $V_t$  diminui cerca de 2 mV para cada aumento de 1°C.
- Esta diminuição em  $V_t$  traduz-se num aumento da corrente  $i_d$ .
- Por outro lado,  $k'$  diminui com a temperatura, diminuindo a corrente de drain.
- Este último efeito é dominante em relação ao primeiro, o que faz com que globalmente a corrente de drain diminua com a temperatura.
- Este resultado aumenta o interesse pelos MOSFETs em circuitos de potência.



# Tensões de rutura

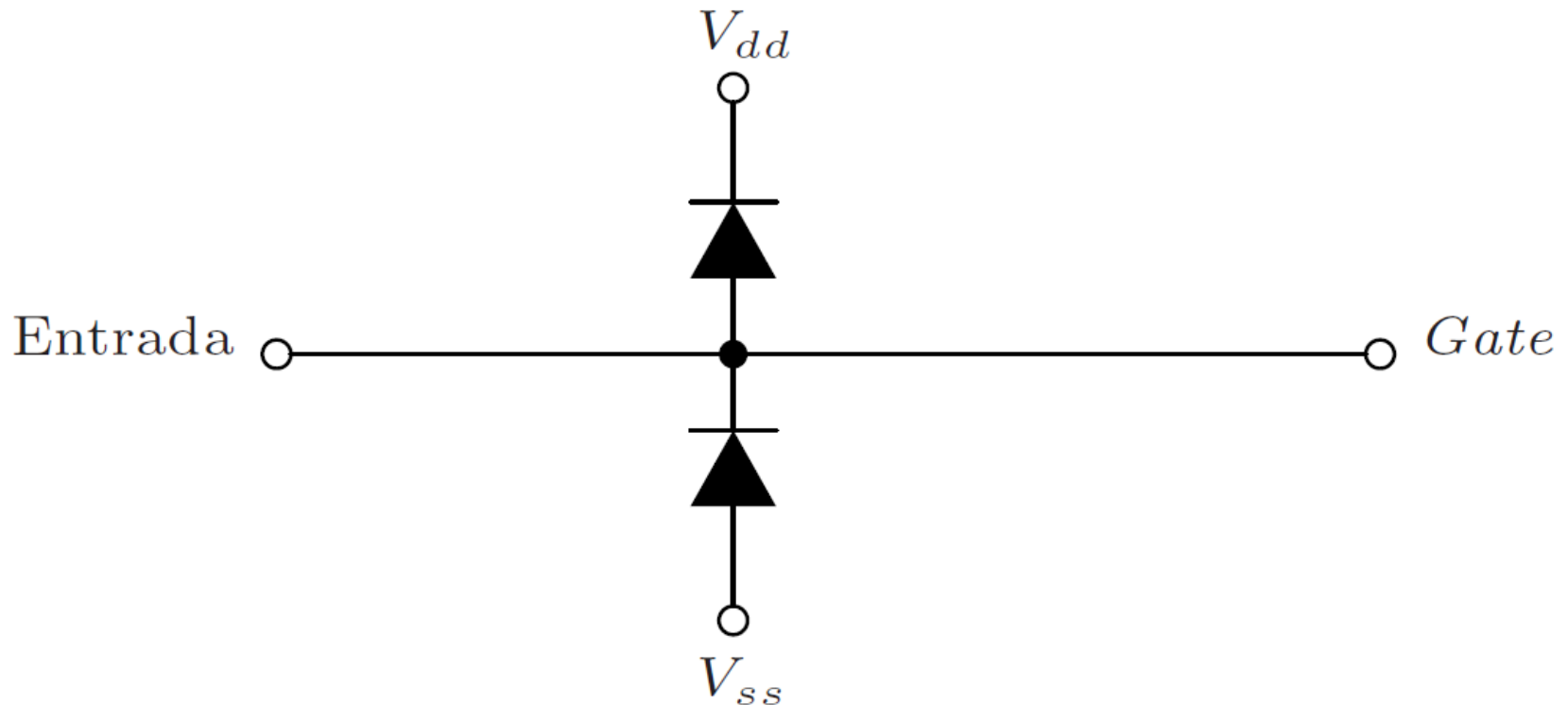
- Quando a tensão entre o drain e a source aumenta, pode ser atingido um valor para o qual a junção pn inversamente polarizada entre o drain e o substrato sofra uma rutura por efeito de avalanche.
- Esta rutura normalmente ocorre a tensões entre os 50 V e os 100 V e resulta num aumento rápido da corrente.
- Outro efeito de rutura que ocorre a tensões menores (abaixo de 20V nos dispositivos modernos) é o “punch-through.”
- Ocorre em dispositivos com canais relativamente pequenos, quando a tensão de drain aumenta até ao ponto em que a região de depleção, que existe ao redor do drain, se estende através do canal até à source.
- Neste caso, a corrente de drain aumenta rapidamente.

# Tensões de rutura

- Normalmente, o punch-through não resulta numa danificação permanente do dispositivo.
- Outro tipo de rutura ocorre quando a tensão entre a gate e a source excede cerca de 50 V.
- Neste caso ocorre a rutura do óxido de gate e a consequente destruição do transístor.
- Apesar do valor de 50 V ser relativamente elevado, deve ter-se em conta que o MOSFET tem uma impedância de entrada muito elevada, fazendo com que pequenas quantidades de carga estática, acumuladas no condensador de gate possam produzir tensões superiores à de rutura.

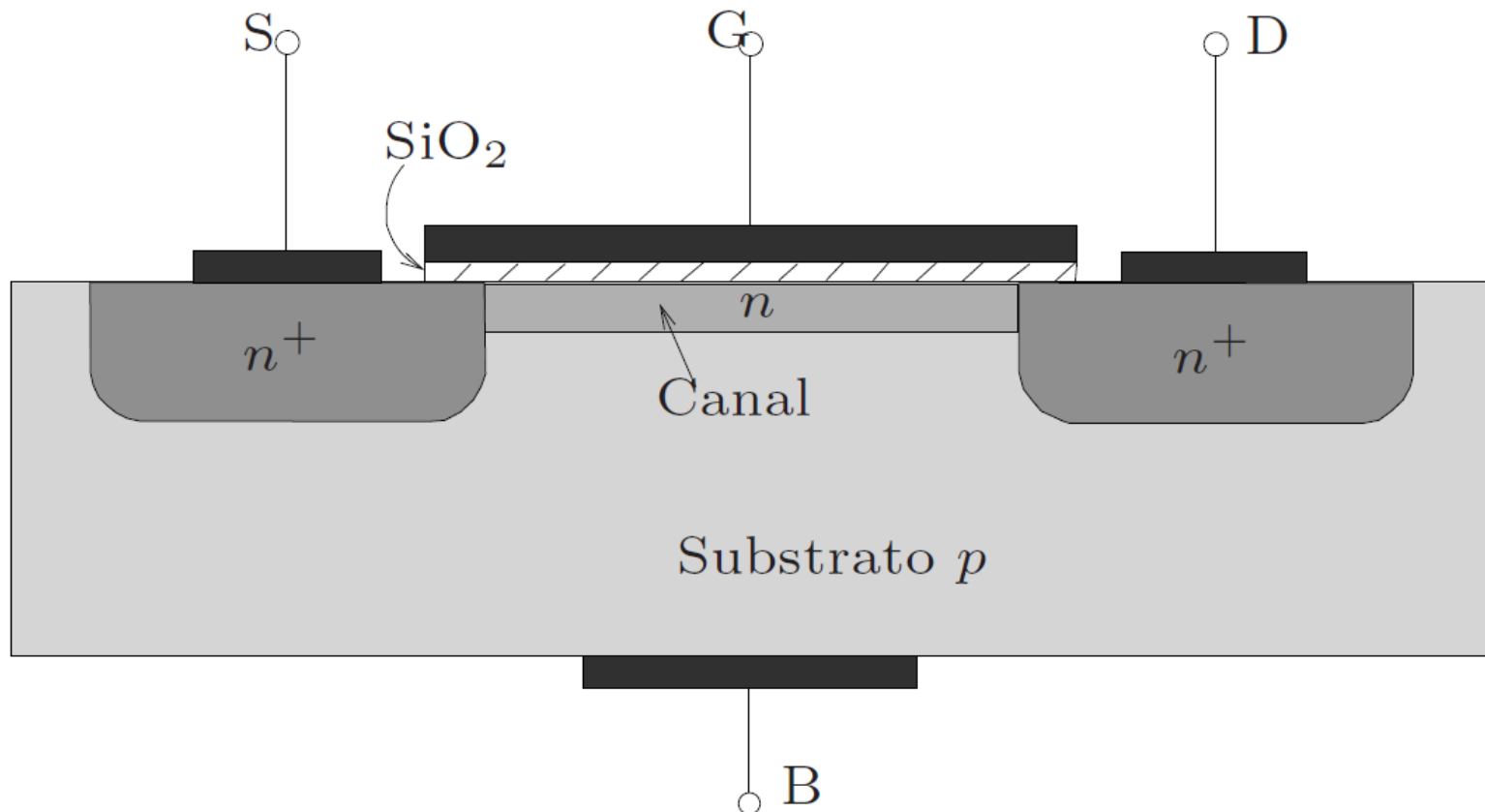
# Tensões de rutura

- Para prevenir a acumulação de cargas estáticas na gate, são normalmente usados dispositivos de proteção nas entradas dos circuitos integrados MOS. O mecanismo de proteção faz uso de díodos inversamente polarizados.



# O MOSFET de depleção

- A estrutura é semelhante ao do MOSFET de intensificação, com uma diferença importante: tem um canal implantado fisicamente.



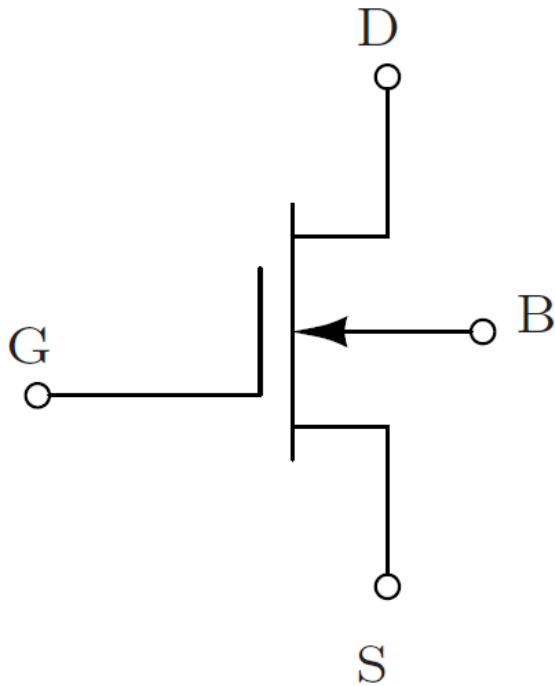
# O MOSFET de depleção

- Devido ao canal implantado, se for aplicada uma tensão entre o drain e a source, vai circular uma corrente  $i_D$  mesmo quando  $v_{gs} = 0$ .
- A profundidade do canal e a sua condutividade podem ser controladas por  $v_{gs}$ , do mesmo modo que no MOSFET de intensificação.
- Se for aplicada uma tensão  $v_{gs}$  positiva, o canal é intensificado, já que são atraídos mais elétrons para ele.
- Também se pode aplicar uma tensão  $v_{gs}$  negativa, o que faz com que os elétrons sejam repelidos para fora do canal, fazendo com que o canal seja menos profundo e a sua condutividade menor.
- Este modo de operação chama-se “modo de depleção”.

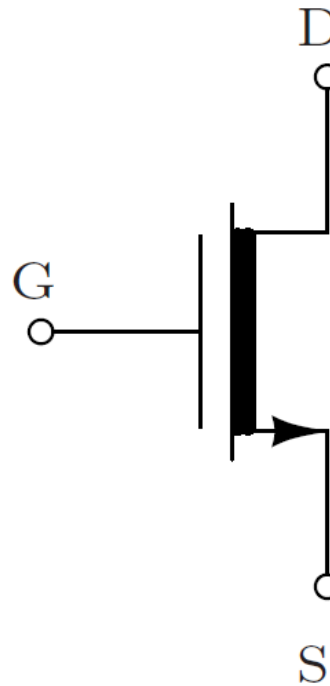
# O MOSFET de depleção

- Se a tensão  $v_{gs}$  aumentar em valores negativos, é atingido um valor para o qual o canal fica completamente desprovido de portadores de carga e  $i_d$  é reduzida para zero, mesmo com uma tensão  $v_{ds}$  aplicada.
- Este valor negativo de  $v_{gs}$  é a tensão de threshold do MOSFET de canal n do tipo depleção.
- O MOSFET do tipo depleção pode operar nos dois modos: no de intensificação, se lhe for aplicada uma tensão  $v_{gs}$  positiva e no de depleção, se  $v_{gs}$  for negativa.

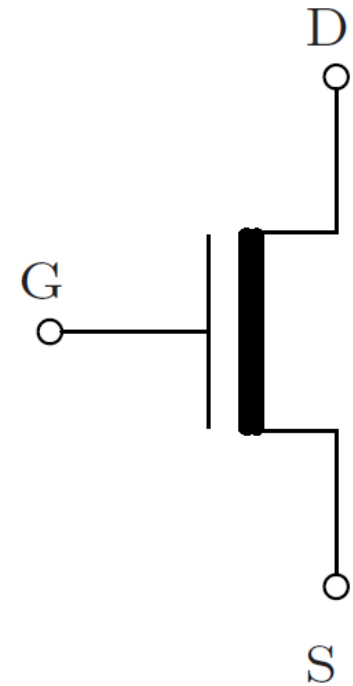
# O MOSFET de depleção



(a)



(b)

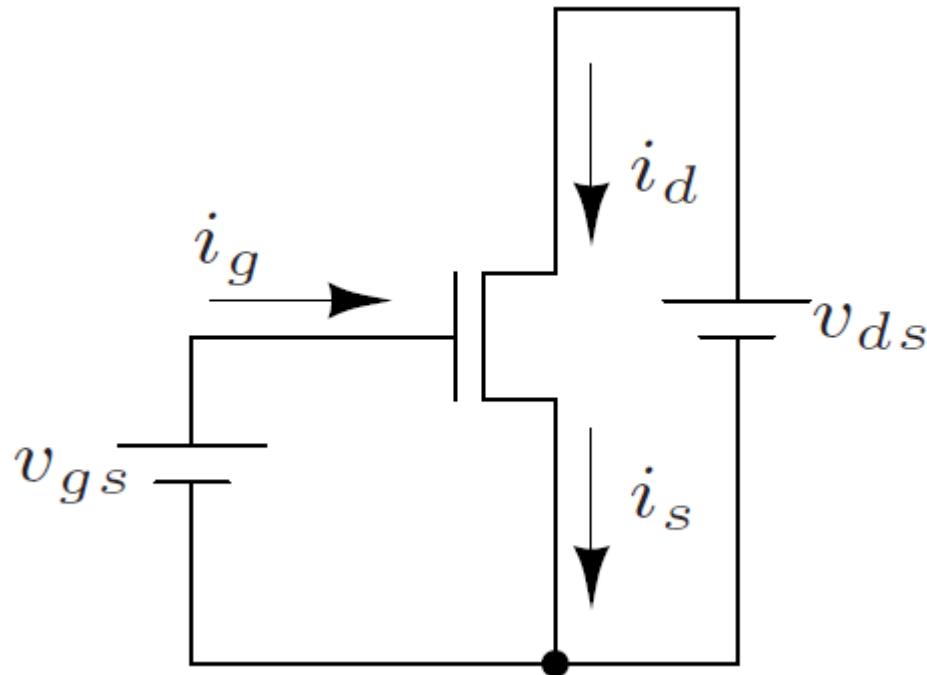


(c)

- (a) Símbolo para o MOSFET de canal n do tipo depleção.
- (b) Símbolo simplificado para o caso do substrato estar ligado à source.
- (c) Símbolo simplificado para o caso do substrato estar ligado ao potencial negativo do circuito.

# MOSFET de depleção

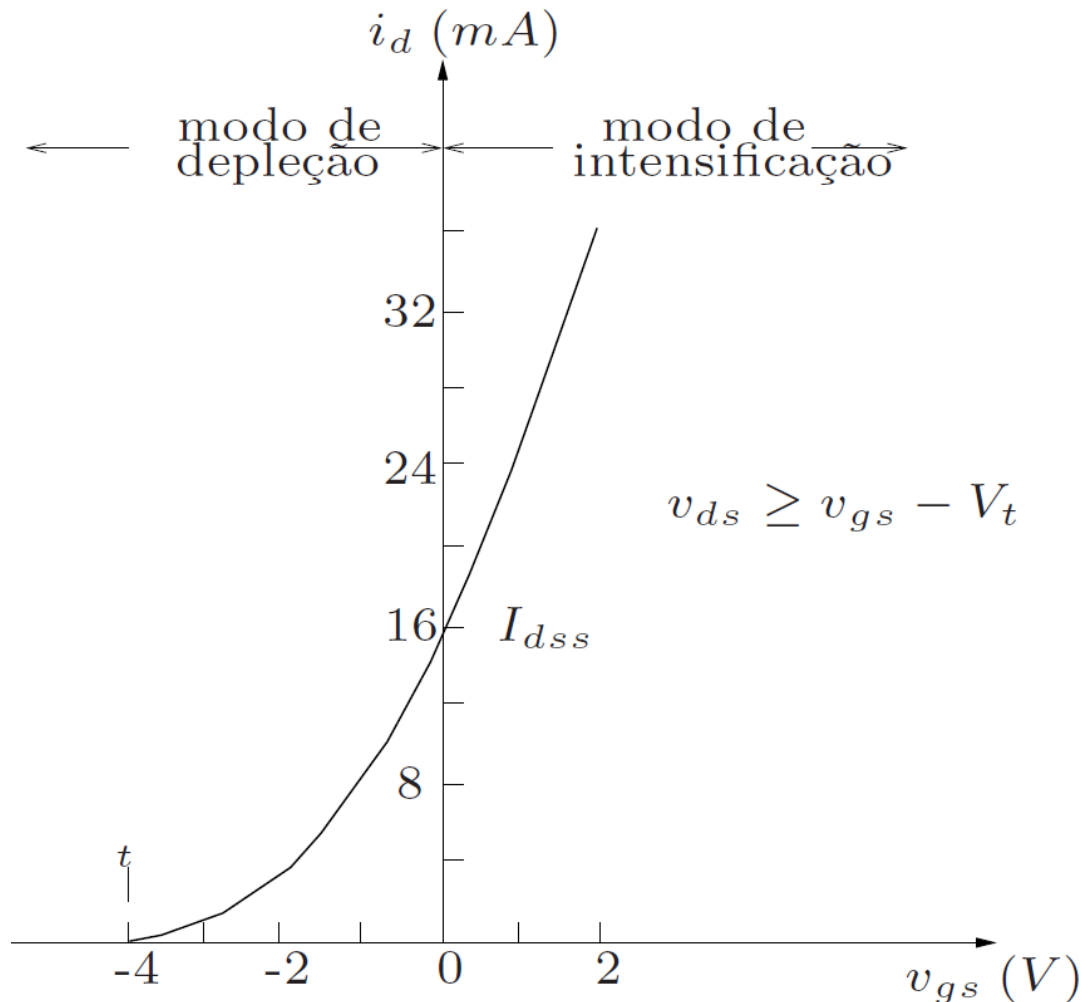
- MOSFET de depleção de canal n com as polaridades das tensões e sentidos das correntes.  $i_g = 0$  e  $i_d = i_s$ .





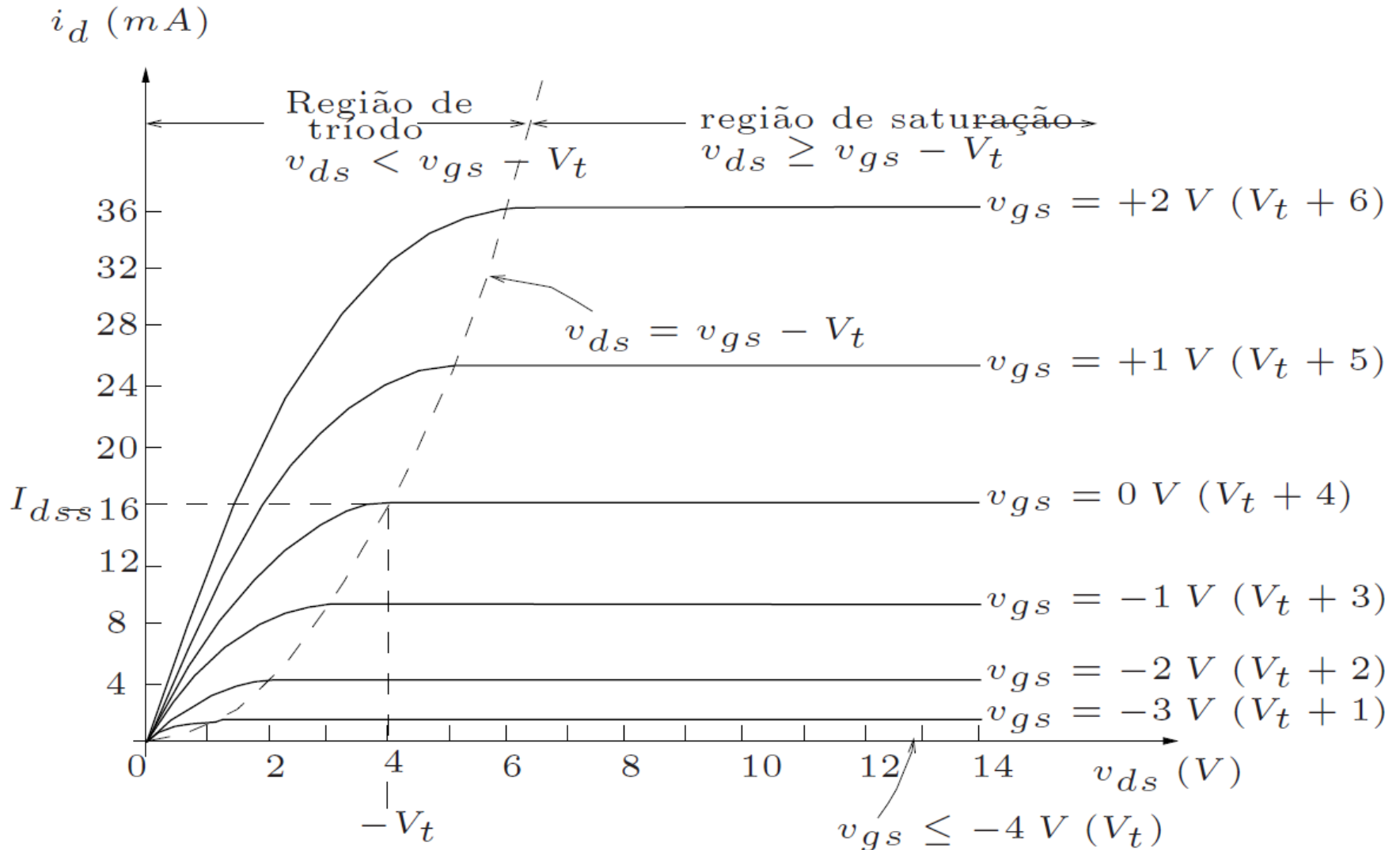
# MOSFET de depleção

- Característica  $i_d \times v_{gs}$  do MOSFET de depleção, canal n a operar na região de saturação.



# MOSFET de depleção

- Características  $i_d \times v_{gs}$  do MOSFET de depleção, canal n:



# MOSFET de depleção

- As características  $V - I$  do MOSFET de depleção são descritas pela mesma equação que o de intensificação, excepto que neste caso  $V_t$  é negativo (canal n).
- Um parâmetro especial do MOSFET de depleção é o valor da corrente de drain obtida na saturação, com  $v_{gs} = 0$ :  $I_{dss}$
- O seu valor é dado por:

$$I_{dss} = \frac{1}{2} k' n \frac{W}{L} V_t^2$$

# MOSFET de depleção

- Os MOSFETs do tipo depleção podem ser fabricados no mesmo circuito integrado que os do tipo intensificação, resultando em circuitos com características de desempenho melhoradas.
- Para que o fabrico dos dois tipos de dispositivos seja possível, basta que a tecnologia permita o implante do canal dos MOSFETS de depleção.

# $i_d \times v_{gs}$ de vários tipos de MOSFETs

- Comparação entre as características  $i_d \times v_{gs}$  para os vários tipos de MOSFETs a operarem na região de saturação.

