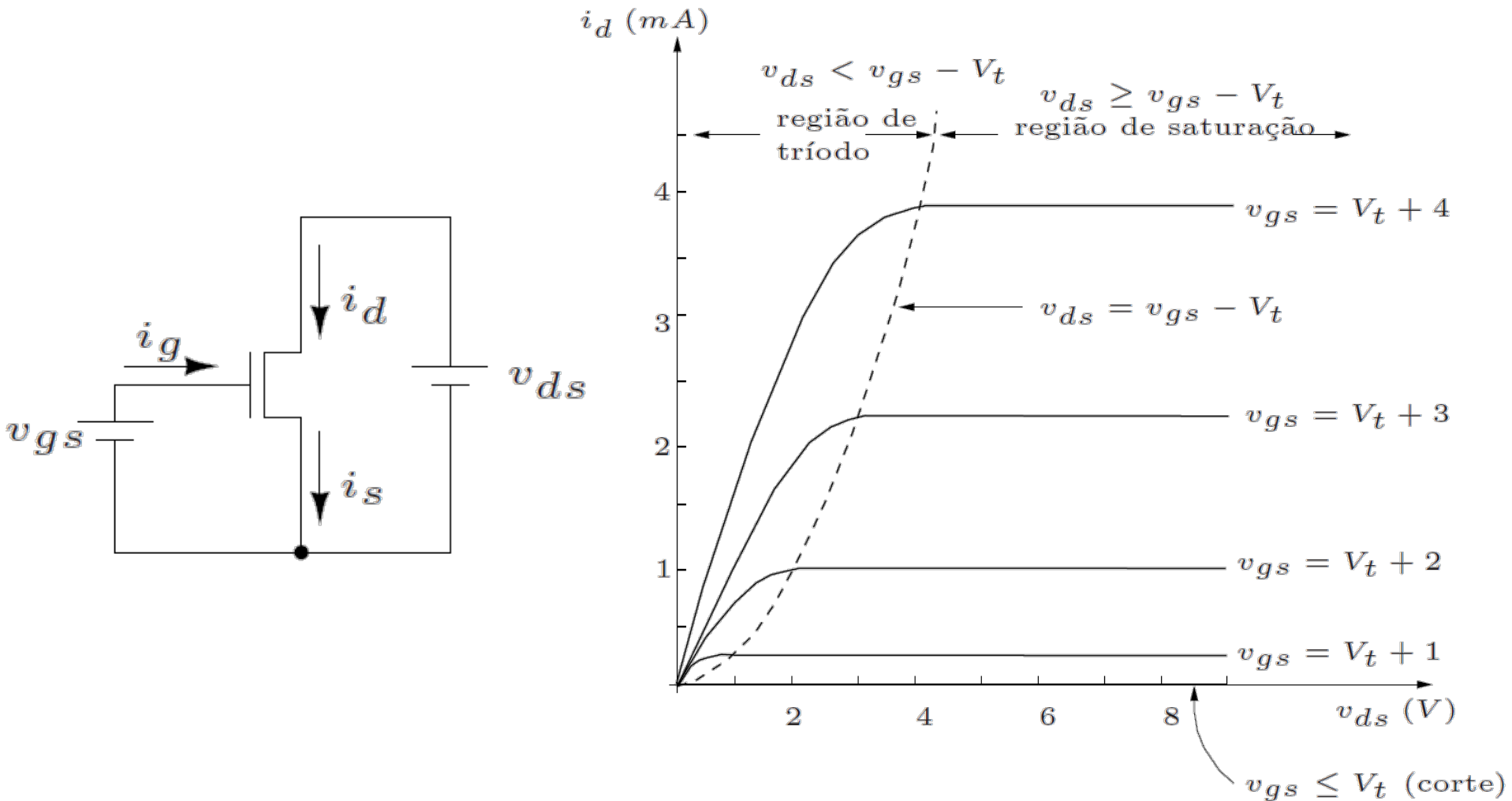


Aula 3

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

Gerardo Rocha

Características $I_d \times V_{gs}$



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:

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

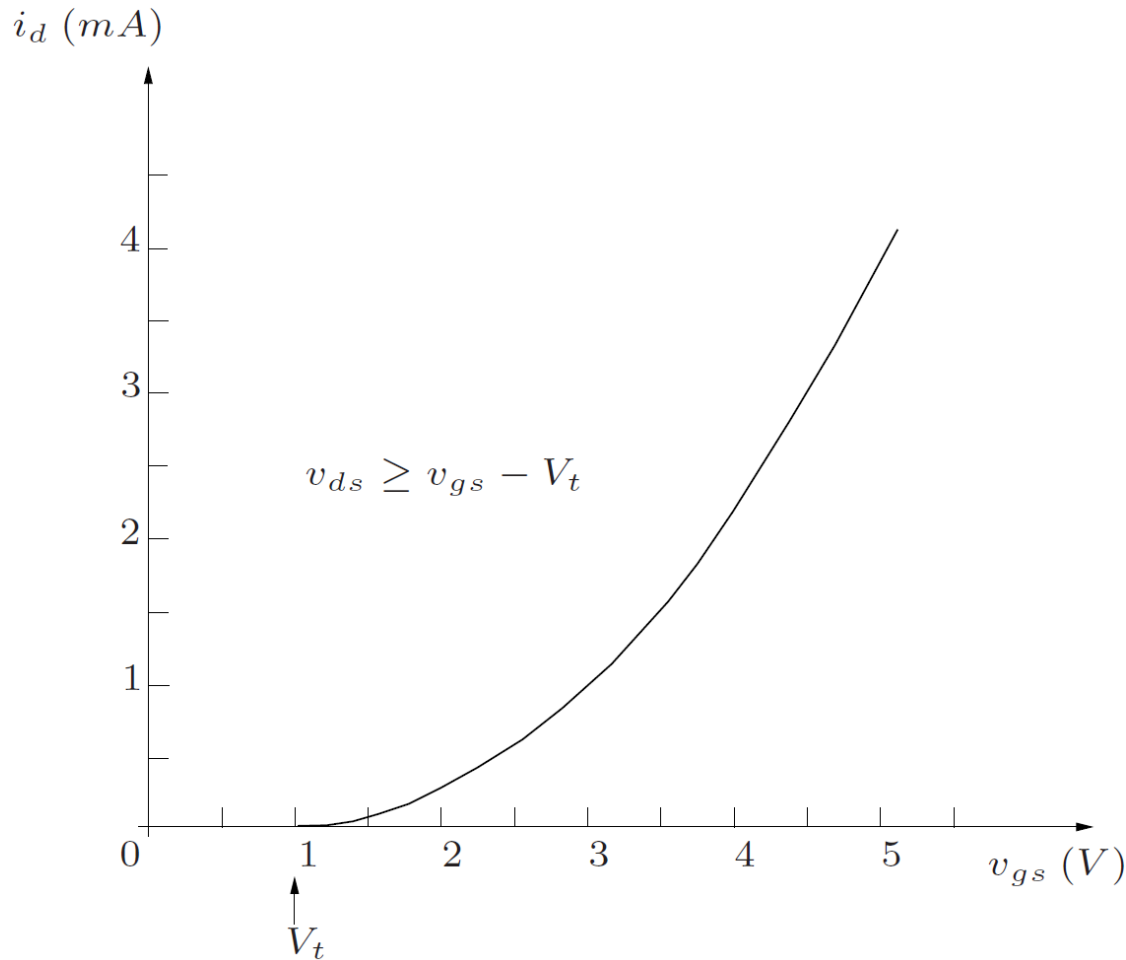
- Na fronteira entre a região de triodo e a região de saturação:

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

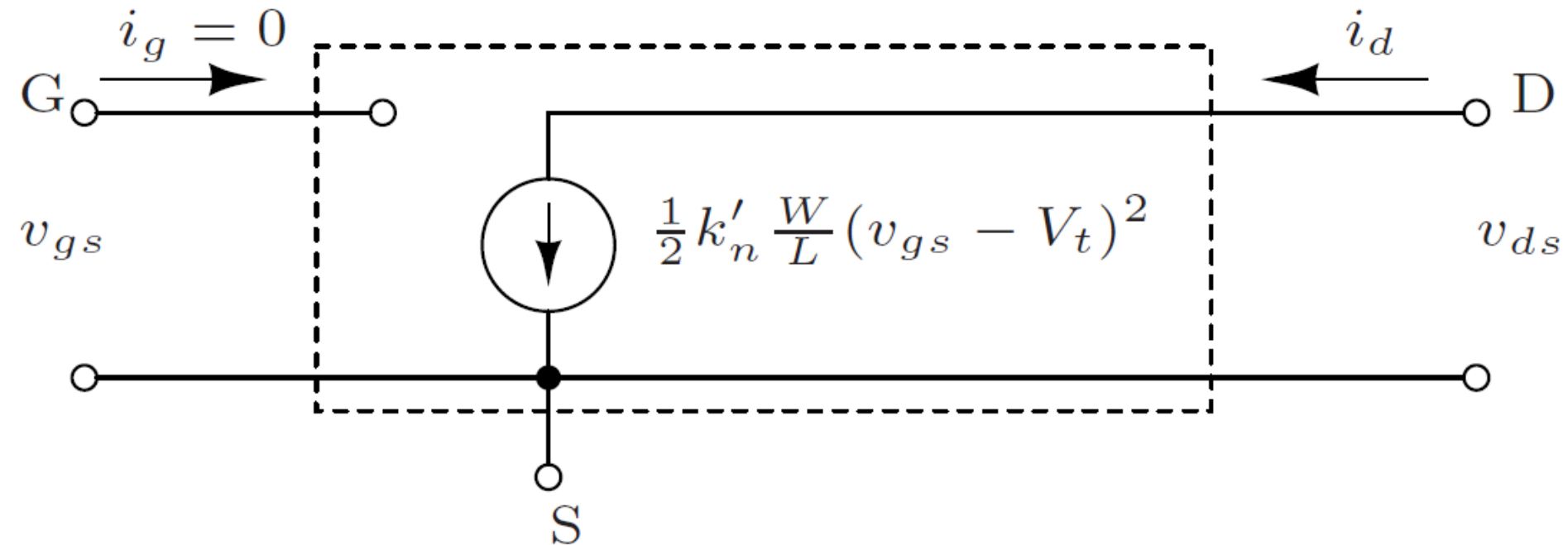
$$I_d = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{gs} - V_t)^2.$$

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

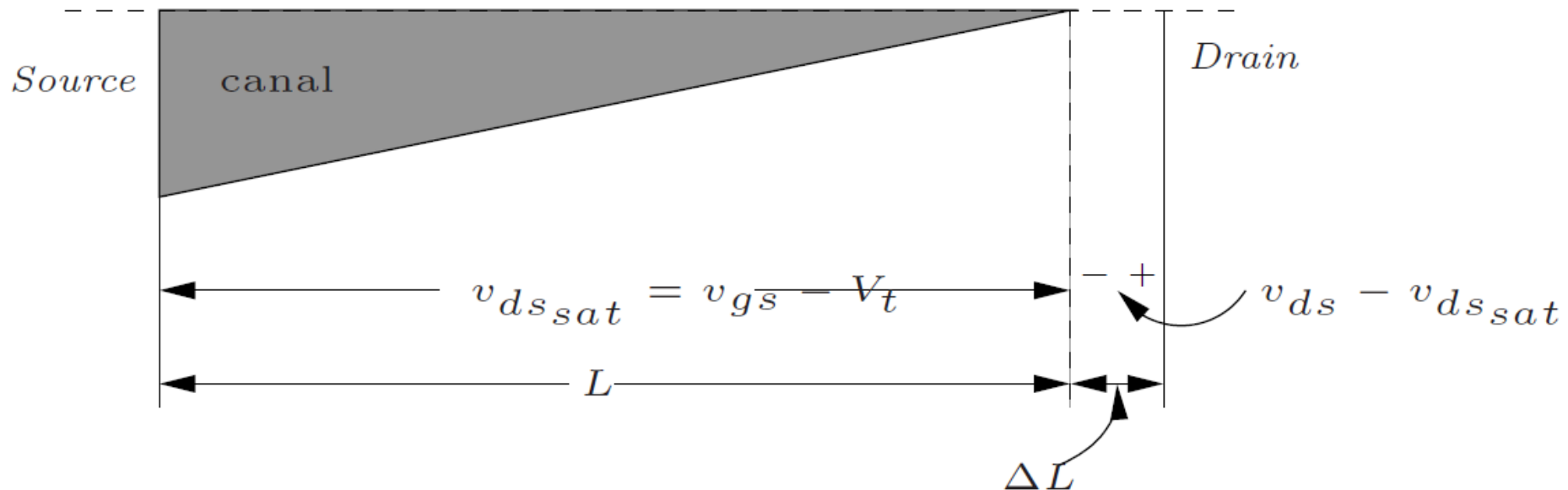
- A independência entre i_d e v_{ds} na saturação e a correspondente resistência de saída infinita no drain é uma idealização baseada na premissa de que uma vez que o canal fica estrangulado do lado do drain, qualquer aumento em v_{ds} não produz qualquer efeito na geometria do canal.
- Na prática, aumentando 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:

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

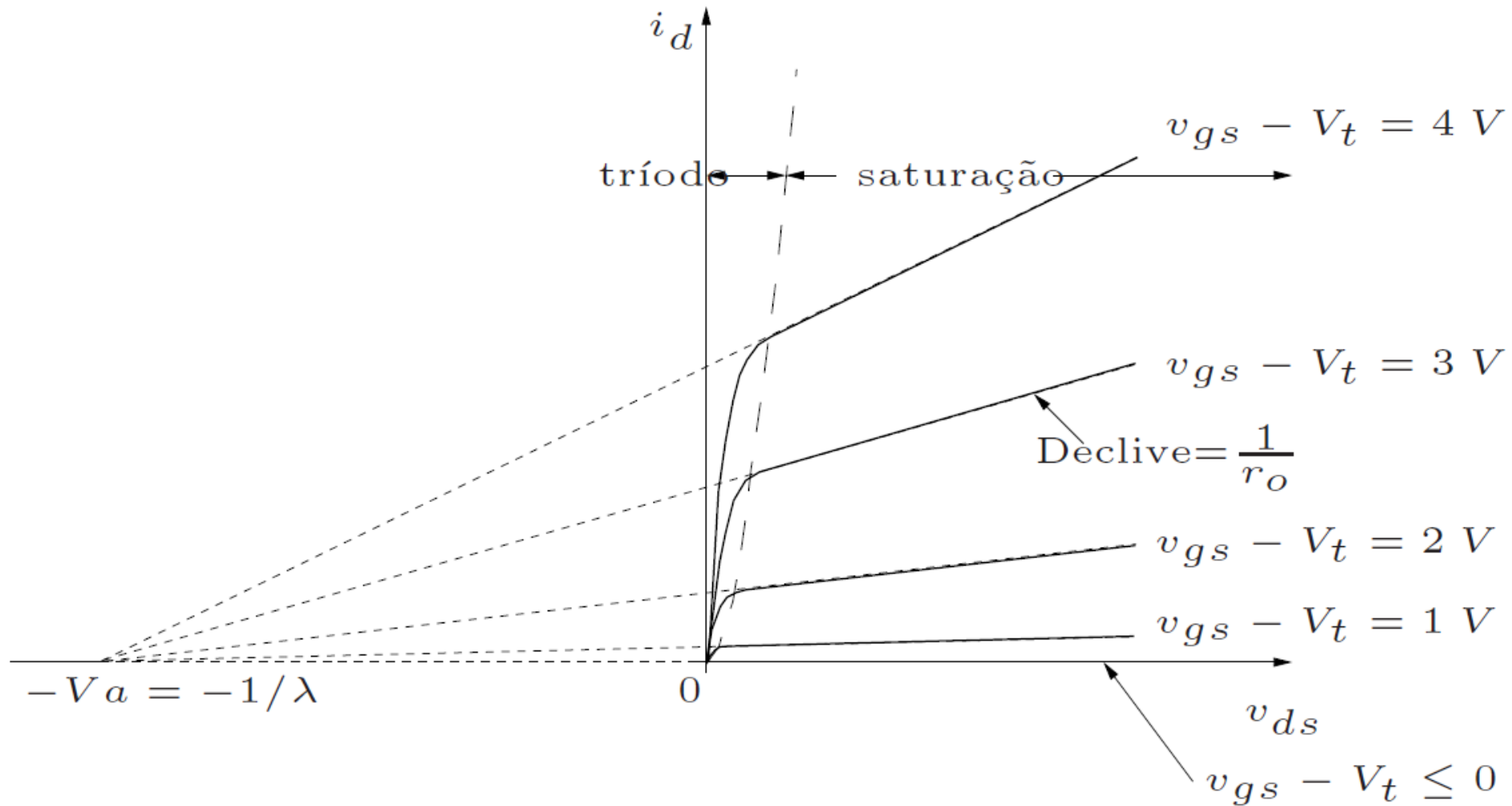
- A tensão adicional aplicada ao drain aparece como uma queda de tensão ao longo da zona de depleção entre a extremidade do canal e o drain.

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 λ 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, λ varia entre 0.005 V^{-1} e 0.03 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:

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

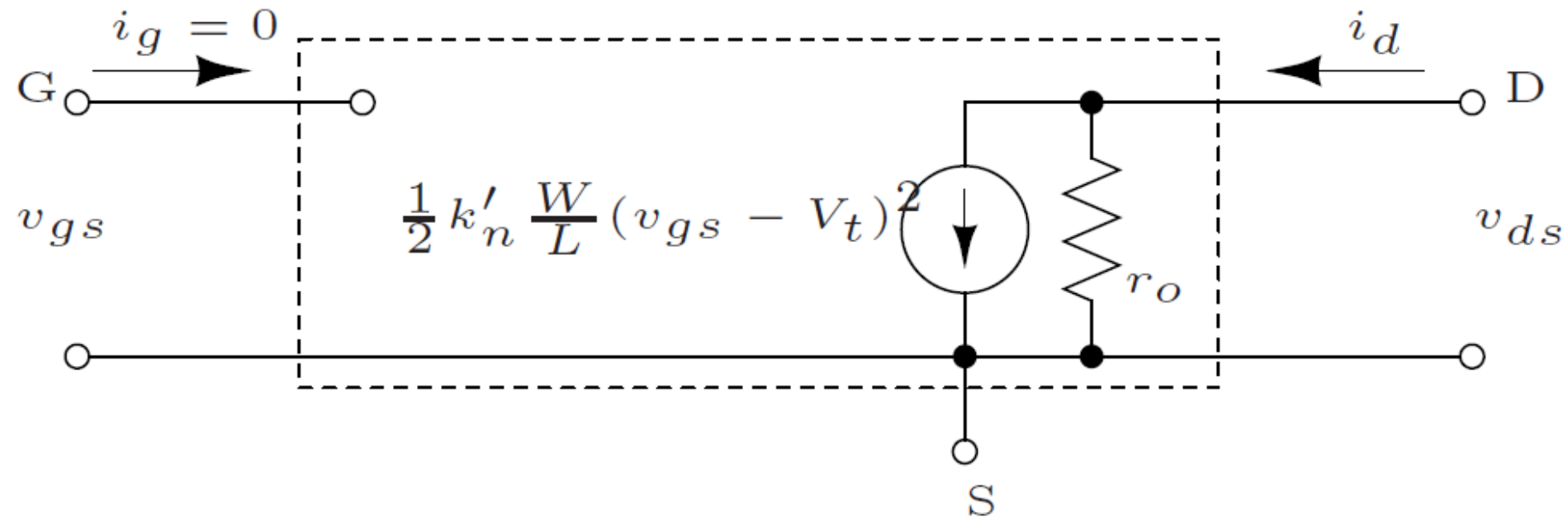
- Outra forma:

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

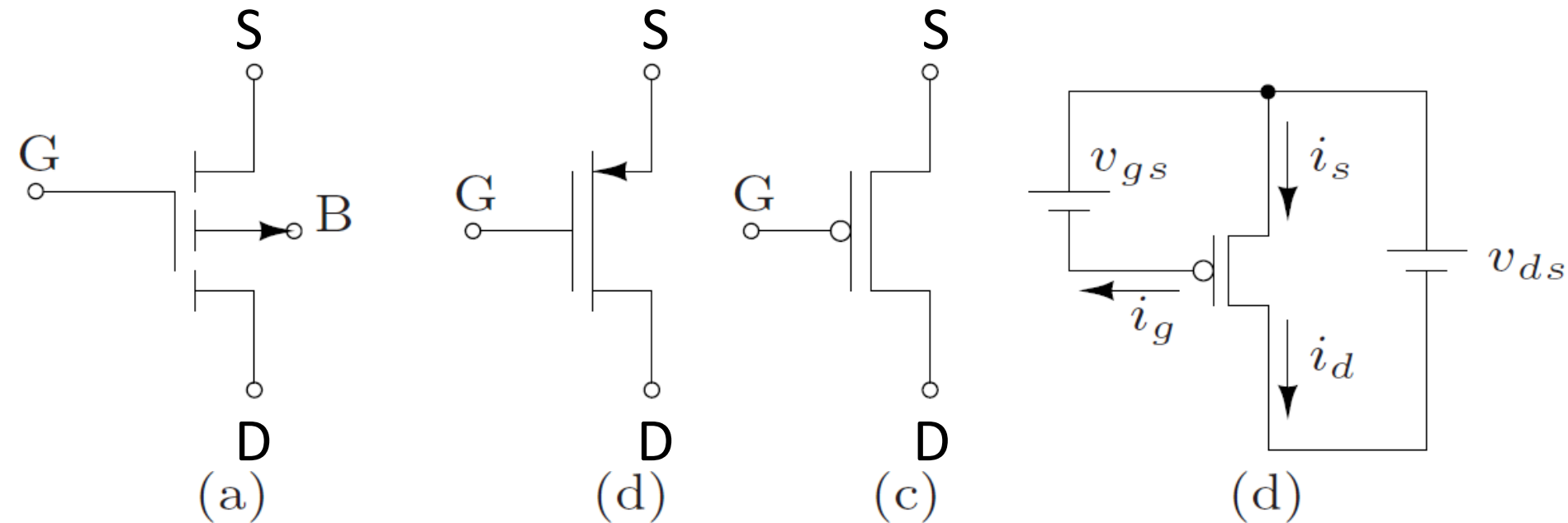
- Note-se que a resistência de saída é inversamente proporcional à corrente de polarização de drain.

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 ao potencial positivo.
- (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 μ_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 $V_{sb} = 0$.
- ϕ_f é um parâmetro físico, em que $2\phi_f$ tem tipicamente o valor de 0.6 V.
- γ 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 'e 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 γ 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

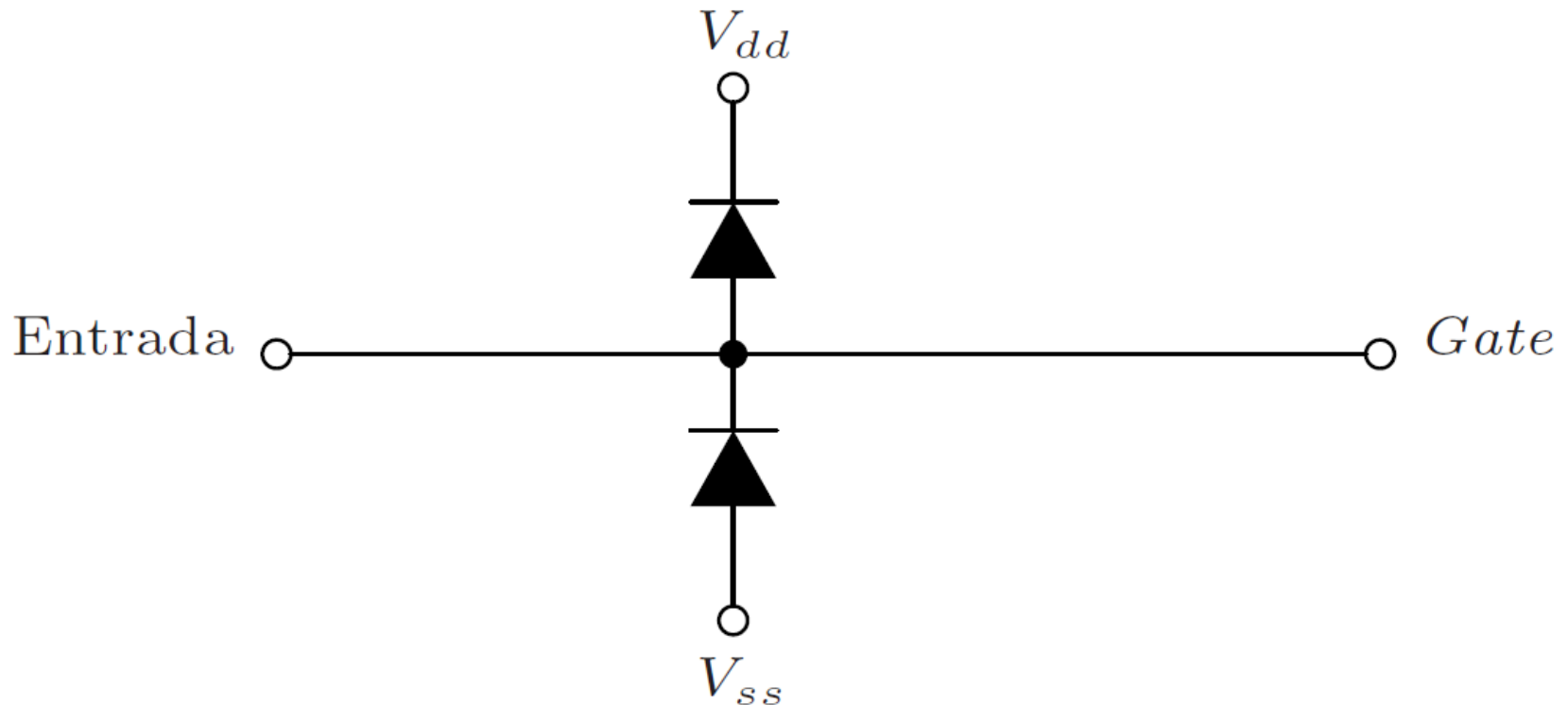
- Quando a tensão entre o drain e a source aumenta, pode ser atingido um valor para o qual a junção pn inversamente polarizada entre o drain e o substrato sofra uma rutura por efeito de avalanche.
- Esta rutura normalmente ocorre a tensões entre os 50 V e os 100 V e resulta num aumento rápido da corrente.
- 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.

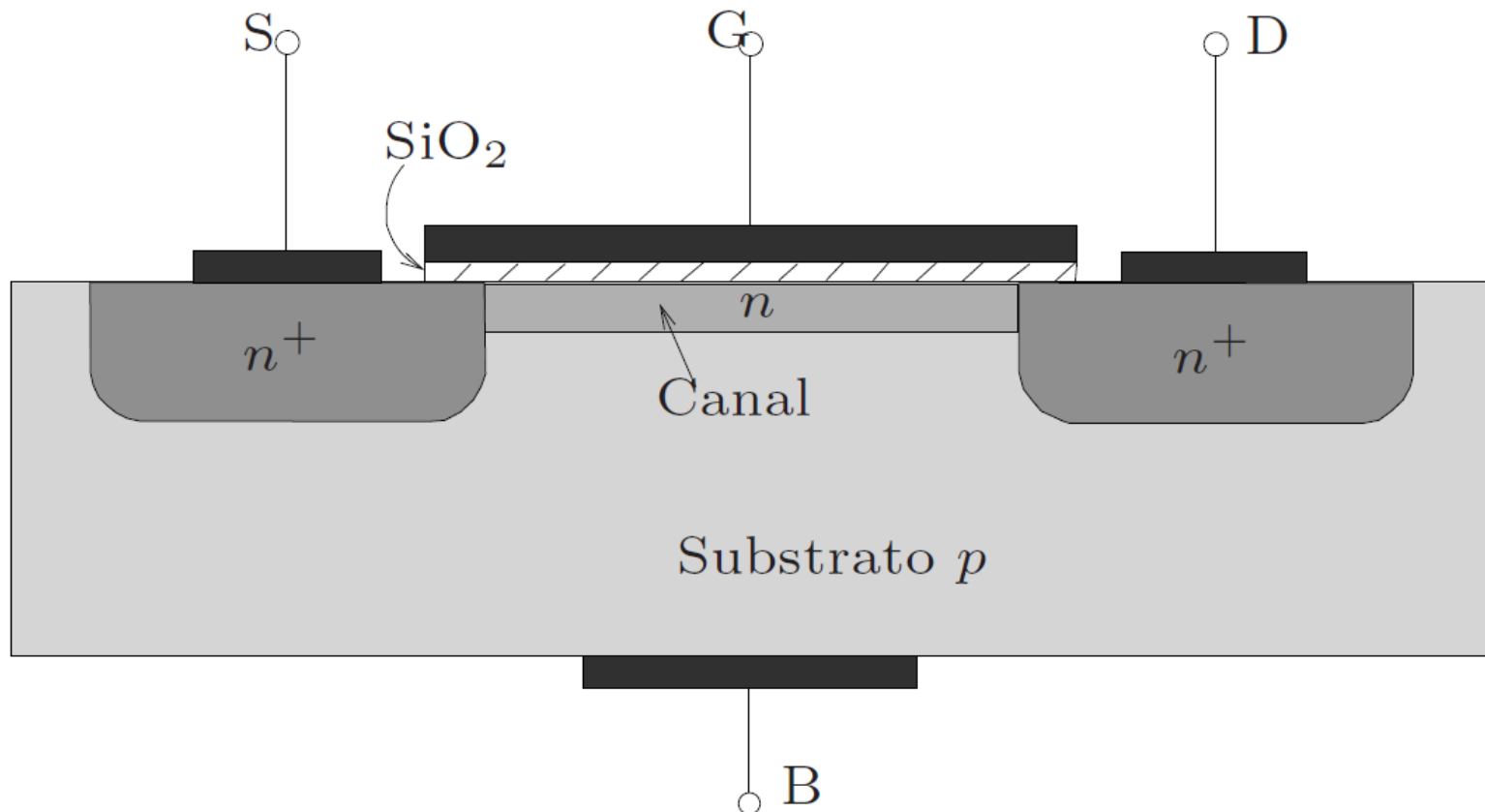
Tensões de rutura

- 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.



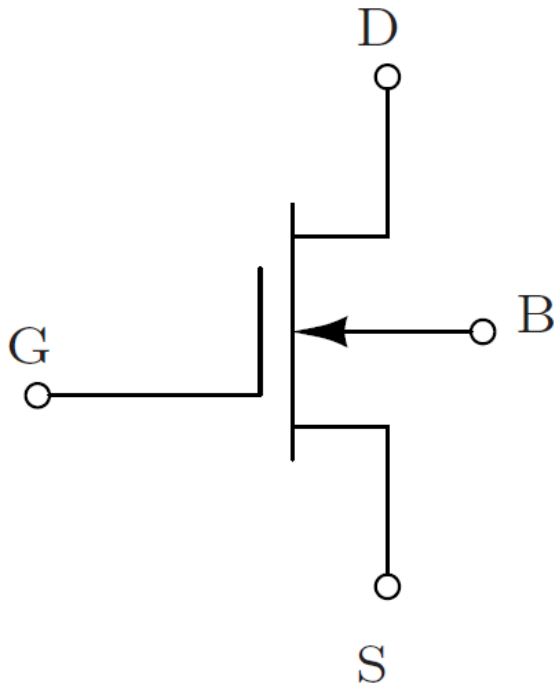
O MOSFET de depleção

- 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”.

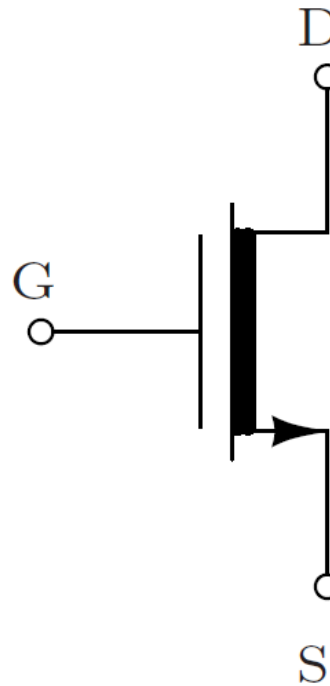
O MOSFET de depleção

- 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.

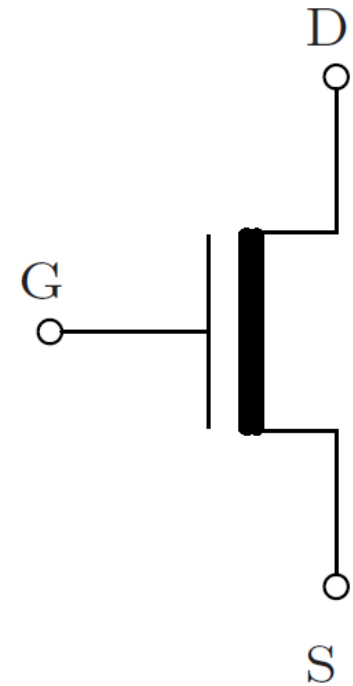
O MOSFET de depleção



(a)



(b)

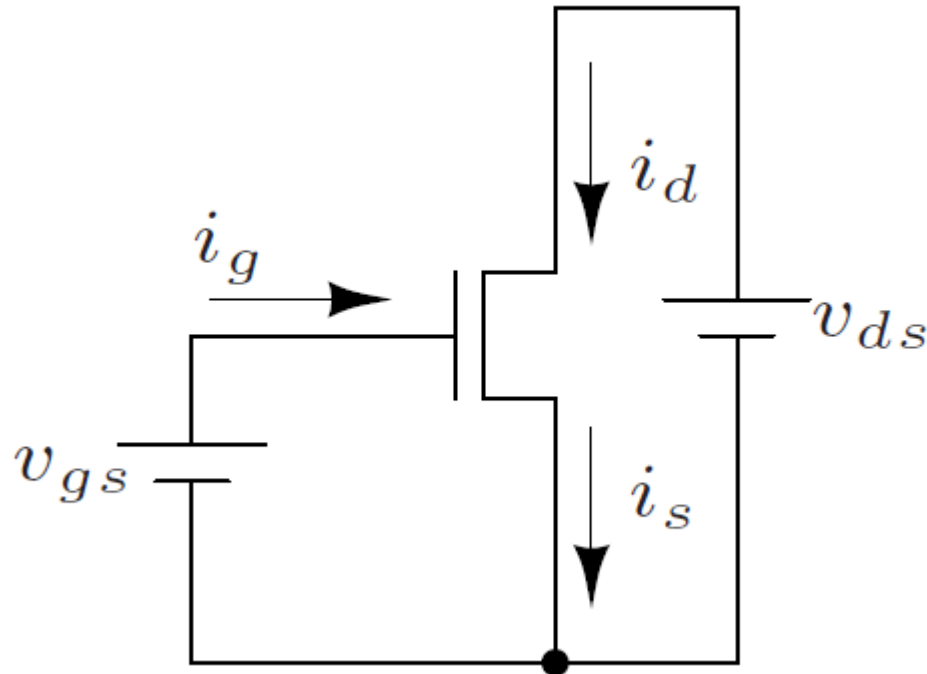


(c)

- (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.

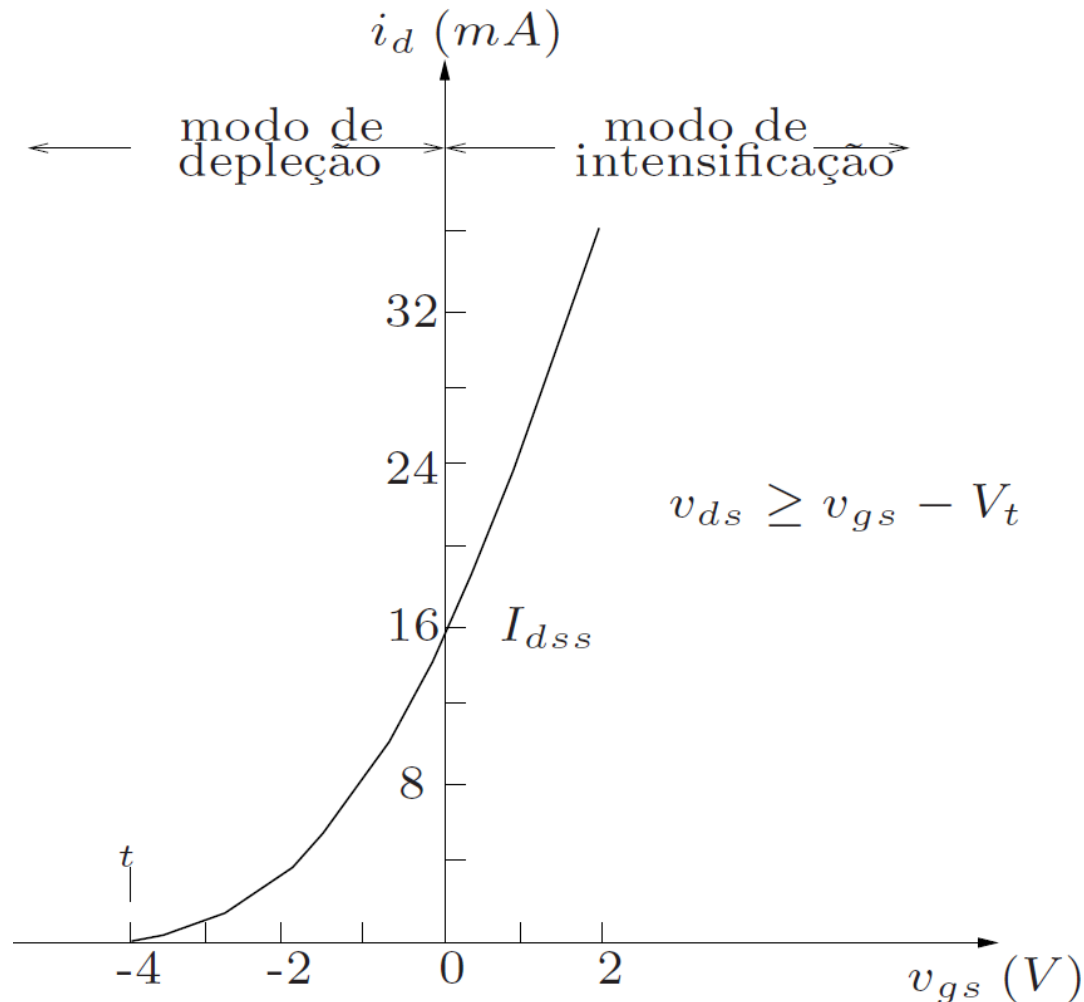
MOSFET de depleção

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



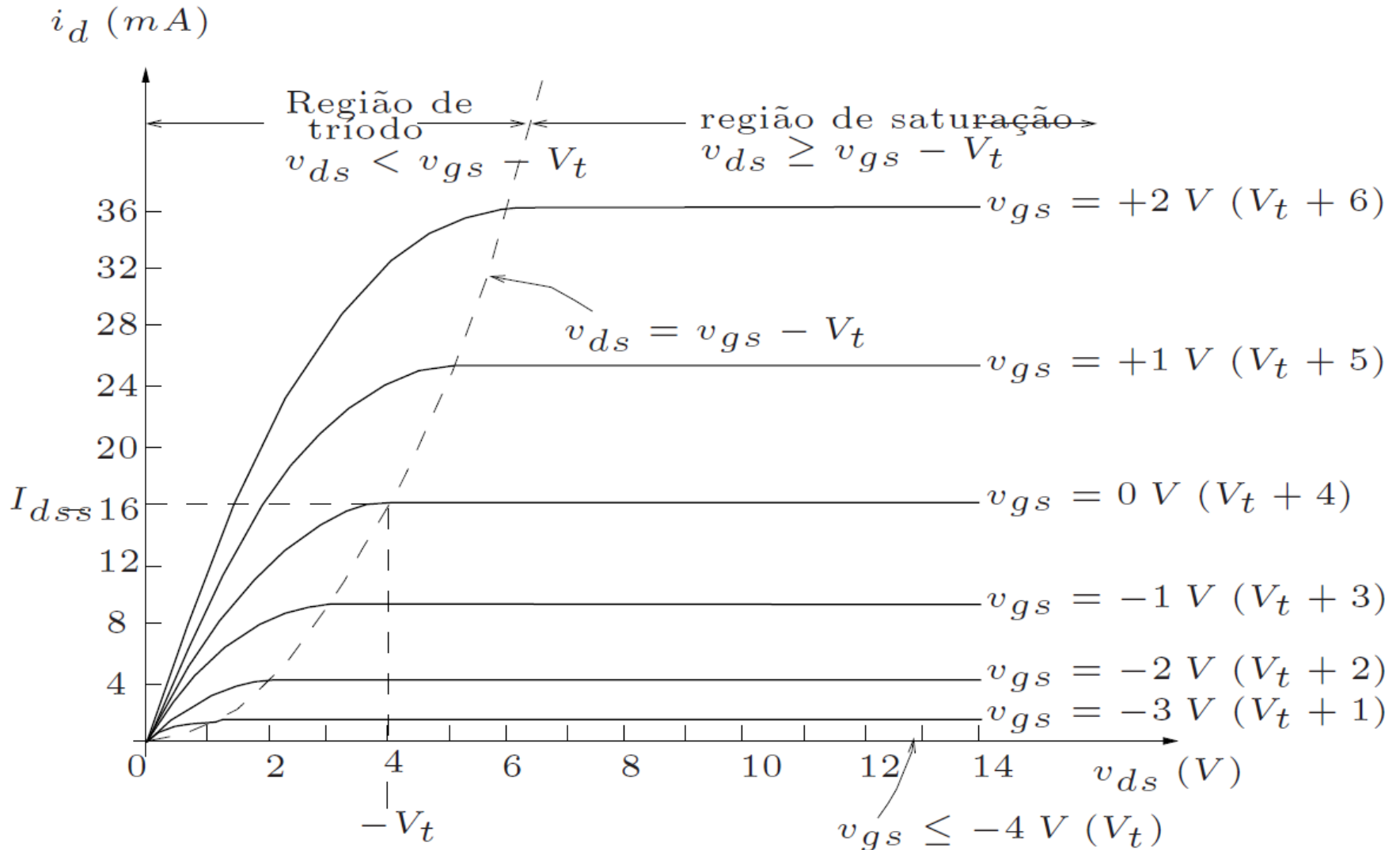
MOSFET de depleção

- 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.

