

Aula 2

Transístores de Efeito de Campo

Gerardo Rocha

Transístores de Efeito de Campo

- Um dos tipos de dispositivos mais importantes da eletrónica.
- A tensão entre dois terminais controla a corrente no terceiro.
- O FET pode ser usado como amplificador ou como interruptor.
- O nome dos transístores de efeito de campo deriva do princípio físico da sua operação.
- O mecanismo de controlo da corrente é baseado num campo elétrico estabelecido pela tensão aplicada ao terminal de controlo.
- A corrente é conduzida por um único tipo de portadores, eletrões ou lacunas, dependendo do tipo de FET (de canal n ou p).

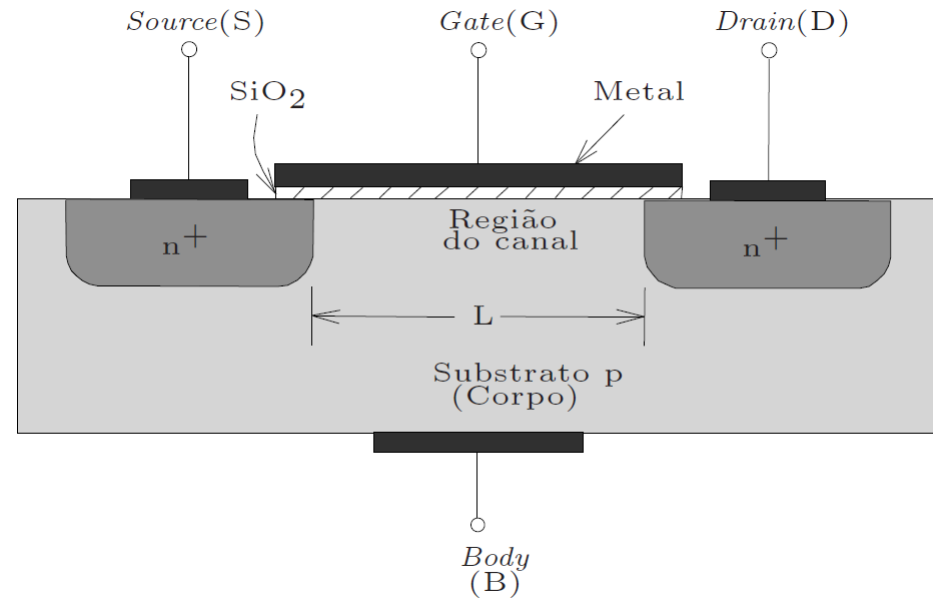
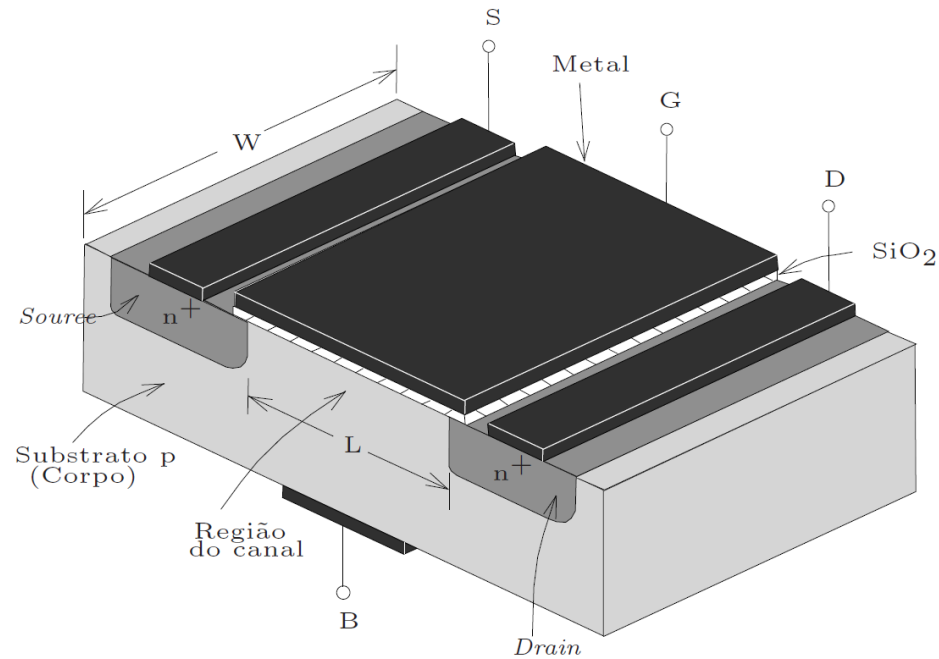
Transístores de Efeito de Campo

- O conceito básico do FET é conhecido desde a década de 1930.
- O dispositivo apenas se tornou numa realidade prática na década de 1960.
- Desde o final da década de 1970, um tipo particular de FET, o MOSFET tornou-se muito popular.
- Quando comparados com os transístores bipolares, os MOSFETs podem ter dimensões um pouco menores, ocupando uma área menor quando dispostos num circuito integrado, e o seu processo de fabrico também é um pouco mais simples e barato.
- Os circuitos lógicos digitais e as memórias podem ser implementados por circuitos que usam apenas MOSFETs.
- É muito usado na implementação de circuitos integrados analógicos e em circuitos que combinam eletrónica analógica e digital no mesmo chip .

Transístores de Efeito de Campo

- Embora a família de transístores de efeito de campo tenha muitos tipos diferentes, o MOSFET do tipo intensificação, é de longe o semicondutor mais importante da atualidade.
- Objetivos:
 - Desenvolver uma grande familiaridade com o MOSFET:
 - O seu princípio físico.
 - As suas características,
 - Os seus modelos equivalentes
 - Os circuitos com aplicações básicas, tanto em eletrónica analógica como digital.

MOSFET de intensificação



MOSFET de intensificação

- O nome do dispositivo (semicondutor de metal-óxido, ou MOS) deriva da sua estrutura física.
- O nome tornou-se mais geral e também é usado em transístores que não usam metal no elétrodo da gate.
- De facto, a maior parte dos MOSFETs modernos é fabricada usando um processo conhecido por tecnologia da gate de silício, no qual o polisilício, é usado para formar o elétrodo da gate.
- Desde que seja condutor, o material que constitui a gate não tem grande influência nas características de funcionamento do MOSFET.

MOSFET de intensificação

- Outro nome dado ao MOSFET é IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor) .
- Este nome também deriva da sua estrutura física, enfatizando o facto de que o eléctrodo da gate estar isolado do corpo do dispositivo pela camada de óxido.
- É este isolamento que faz com que a corrente no terminal da gate seja extremamente baixa, da ordem dos 10^{-15} A.

MOSFET de intensificação

- O substrato forma junções pn com as regiões da source e do drain.
- Nas condições normais de funcionamento, estas junções estão sempre inversamente polarizadas.
- Se o drain estiver a um potencial mais elevado do que a source, as duas junções pn podem estar efetivamente ao corte, simplesmente conectando o terminal do substrato ao da source.
- Sendo assim, considera-se que o substrato não tem qualquer efeito na operação do dispositivo, e o MOSFET pode ser tratado como um dispositivo de três terminais: gate, source e drain.
- A tensão aplicada à gate controla o fluxo de corrente entre o drain e a source.
- Esta corrente irá fluir na direção longitudinal, do drain para a source, numa região chamada de “canal”.

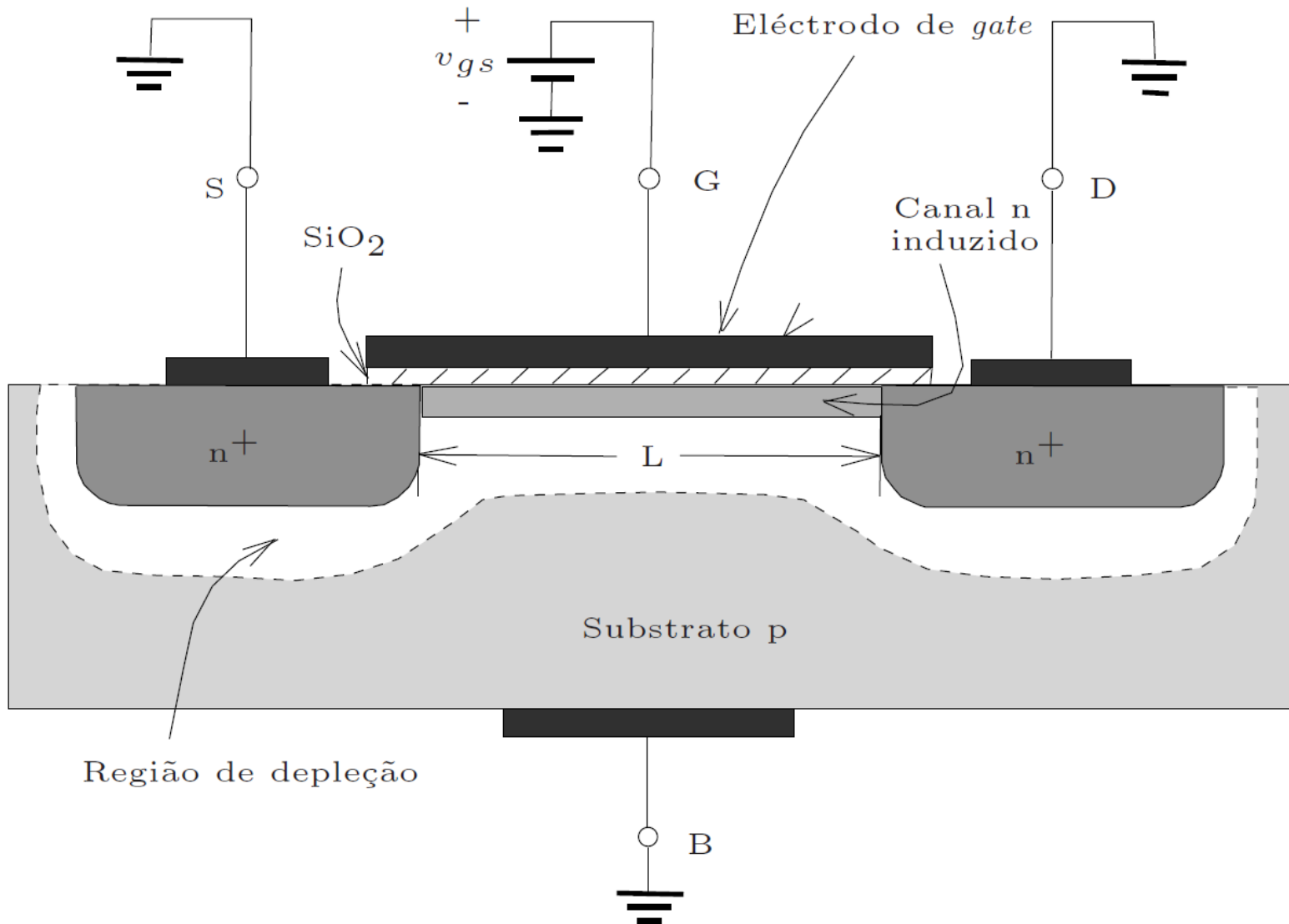
MOSFET de intensificação

- Esta região tem um comprimento L e uma largura W , dois dos parâmetros mais importantes do MOSFET.
- Tipicamente, L pode variar de $0.1\ \mu\text{m}$ a $10\ \mu\text{m}$ e W de $0.2\ \mu\text{m}$ a $500\ \mu\text{m}$.
- Atualmente já se fabricam dispositivos com L inferior a $0.02\ \mu\text{m}$ e são usados sobretudo em circuitos integrados digitais de alta velocidade, tais como microprocessadores e memórias.
- Ao contrário do transistor bipolar, o MOSFET é normalmente construído de uma forma simétrica, ou seja, as regiões da source e do drain são iguais e podem ser trocadas sem que haja alterações no funcionamento do dispositivo.

Tensão da gate nula

- Sem nenhuma tensão de polarização aplicada à gate, existem entre a source e o drain dois díodos “de costas voltadas”.
 - Um dos díodos é formado pela junção pn entre a região n^+ do drain e o substrato p.
 - O outro díodo é formado pela junção pn entre o substrato p e a região n^+ da source.
- Estes dois díodos evitam qualquer condução de corrente entre o drain e a source, mesmo na presença de uma tensão V_{ds} .
- Nestas condições, a resistência entre o drain e a source é da ordem dos $10^{12} \Omega$.

Criação de um canal



Criação de um canal

- A source e o drain estão ligados à terra e é aplicada uma tensão positiva à gate.
- Como a source está ligada ao potencial nulo, a tensão aplicada à gate aparece entre este terminal e a source (v_{gs}).
- O potencial positivo da gate faz:
- Com que as lacunas (que se comportam como cargas positivas) sejam afastadas da zona do substrato por baixo da gate (a região do canal) e sejam “empurradas” para o interior do substrato, deixando na região do canal uma zona sem cargas livres, dita de depleção.
- Esta zona vai ser povoada pelos eletrões em excesso das regiões n^+ .
- O potencial positivo da gate atrai eletrões livres, provenientes sobretudo das regiões n^+ para a região do canal.

Criação de um canal

- Quando um número significativo de elétrons ficar acumulado perto da superfície do substrato, por baixo da gate, é criada uma região do tipo n, interligando a source e o drain.
- Se for aplicada uma tensão entre as regiões do drain e da source, irá fluir uma corrente através desta nova região n induzida.
- A região n induzida forma um canal para a corrente fluir do drain para a source.
- Os MOSFETs de canal n (NMOS) são formados a partir de um substrato do tipo p.
- O canal é criado através da inversão da sua superfície do tipo p para o tipo n.

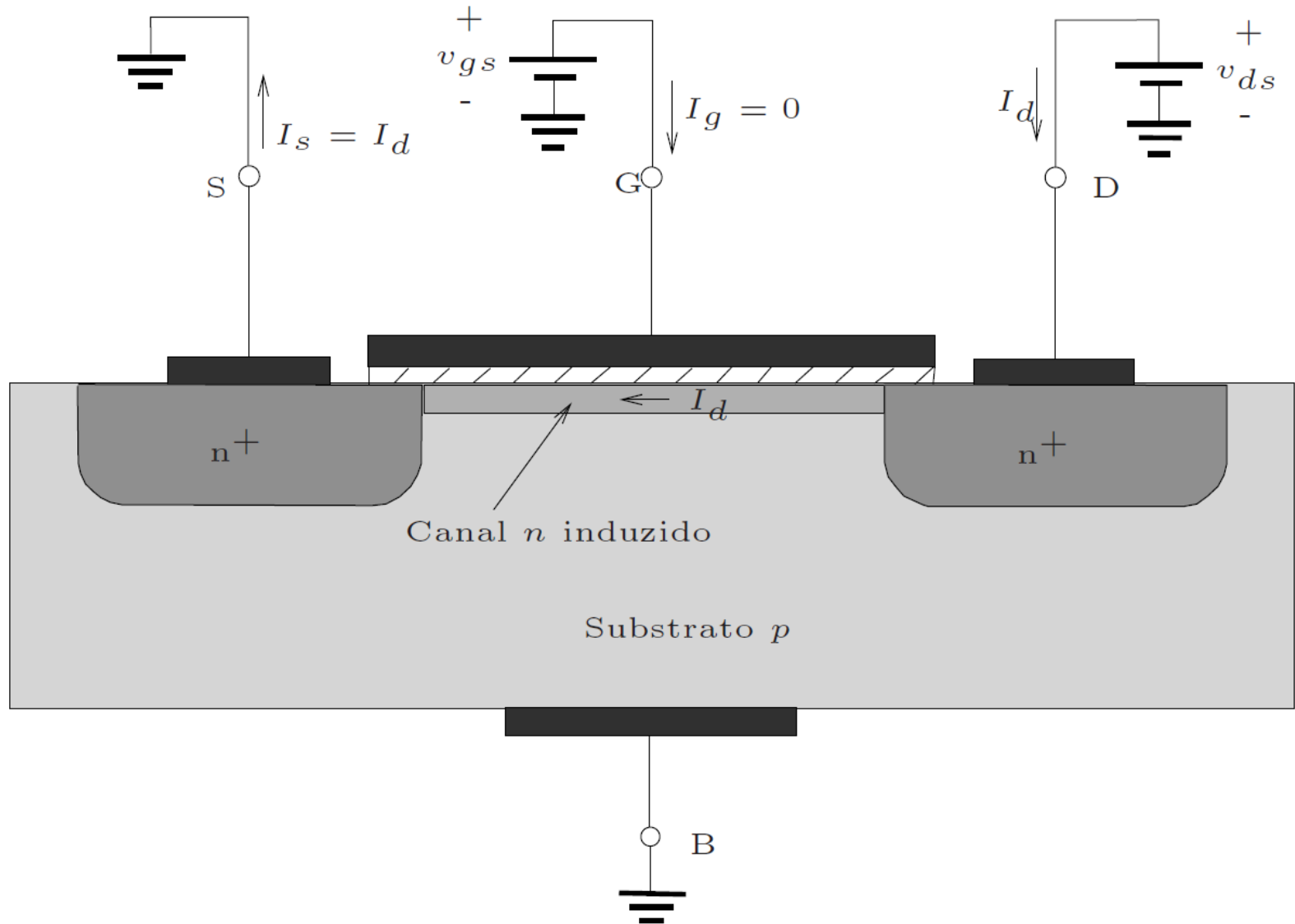
Criação de um canal

- O valor de v_{gs} a partir do qual o número de elétrons móveis acumulados na região do canal é suficiente para formar uma região condutora é chamada de “tensão de threshold” (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 1V a 3V .

Criação de um canal

- A gate e o substrato do MOSFET formam um condensador de armaduras paralelas com a camada de óxido a funcionar como dielétrico.
- A tensão positiva da gate faz com que as cargas positivas se acumulem na armadura de cima (elétrodo da gate).
- As cargas negativas correspondentes consistem nos eletrões acumulados no canal n induzido.
- Existe um campo elétrico com direção vertical.
- É este campo elétrico que controla a quantidade de cargas que circulam no canal, determinando a sua condutividade, e por sua vez, a corrente que lá circula quando é aplicada uma tensão v_{ds} .

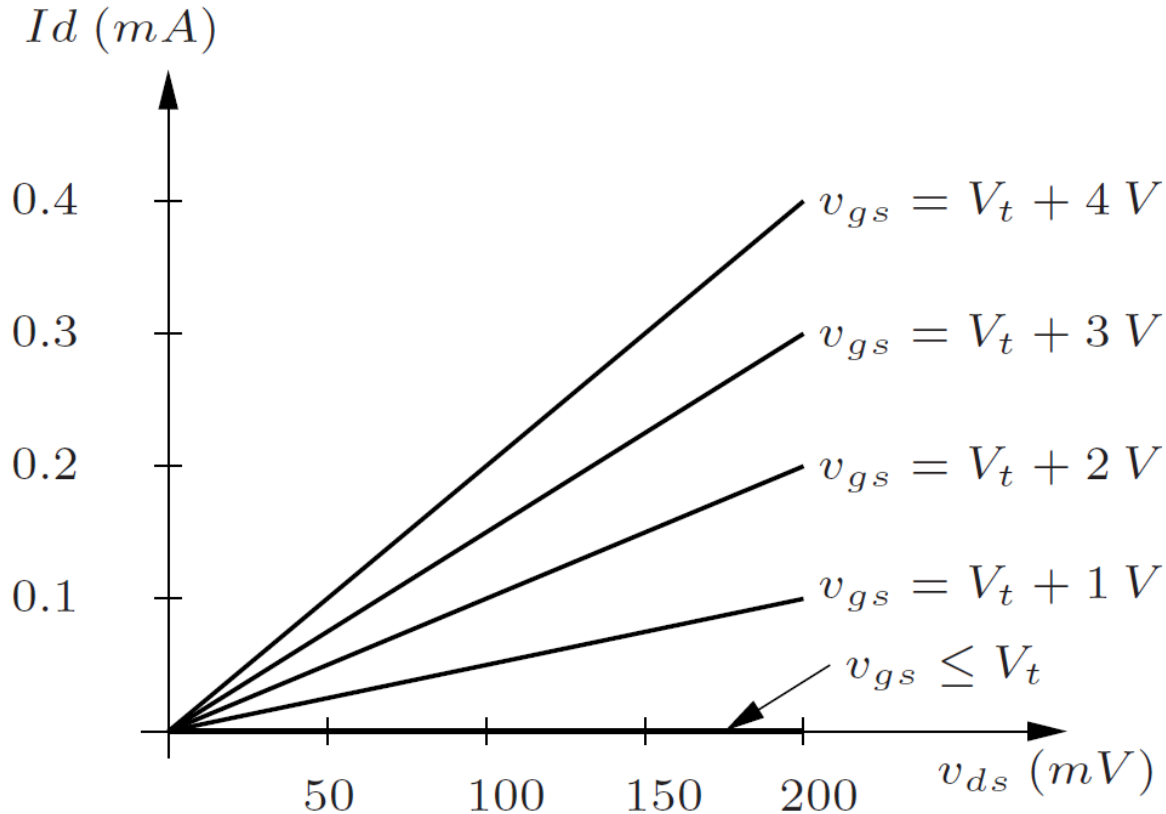
Aplicação de v_{ds} pequena



Aplicação de v_{ds} pequena

- v_{ds} é pequena (cerca de 0.1 V).
- A tensão v_{ds} causa uma corrente i_d que circula através do canal, do drain para a source.
- A amplitude de i_d depende da densidade de eletrões no canal, que por sua vez depende da amplitude de v_{gs} .
- Quando $v_{gs} = V_t$: limiar da criação do canal, a corrente i_d é muito baixa.
- Quando v_{gs} é maior do que V_t , vão ser transportados mais eletrões para formar o canal.
- O resultado é um canal com uma condutância maior, ou de forma equivalente, com uma resistência menor.
- A condutância do canal é proporcional ao excesso de tensão da gate ($v_{gs} - V_t$).
- A corrente i_d é proporcional a $v_{gs} - V_t$ e à tensão v_{ds} que a faz circular.

Aplicação de v_{ds} pequena

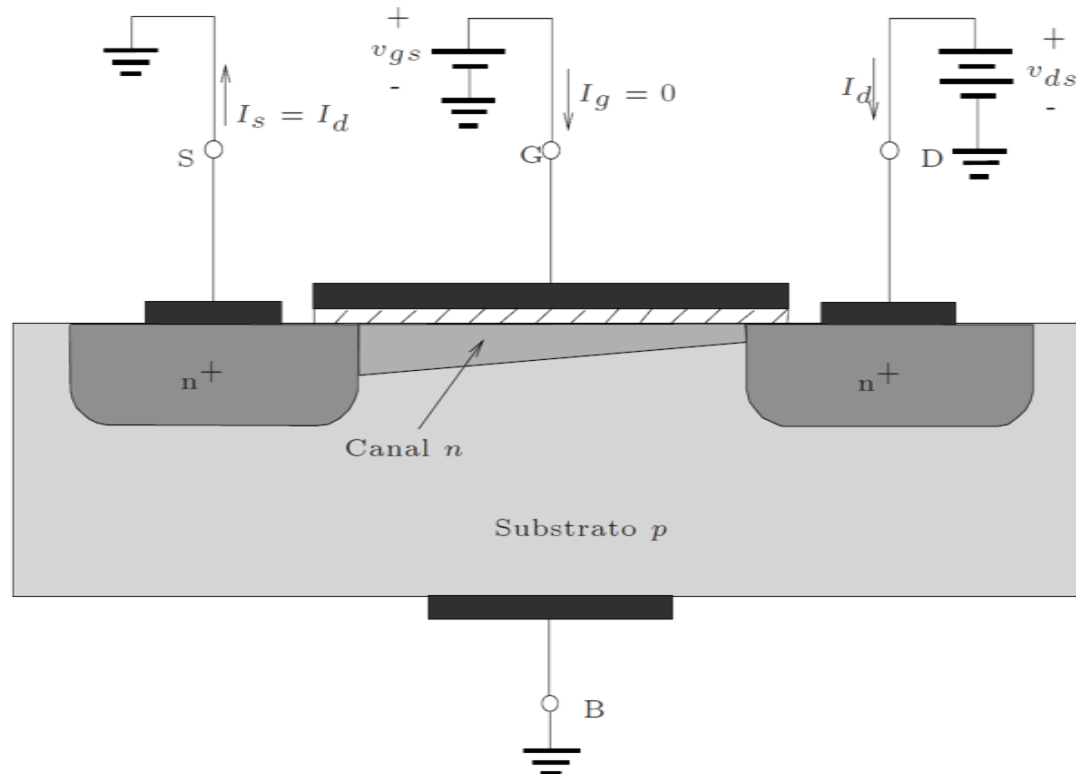


O MOSFET funciona como uma resistência linear cujo valor é controlado por v_{gs} . O valor da resistência tende para infinito quando $v_{gs} \leq V_t$ e o seu valor diminui à medida que v_{gs} aumenta.

Aplicação de v_{ds} pequena

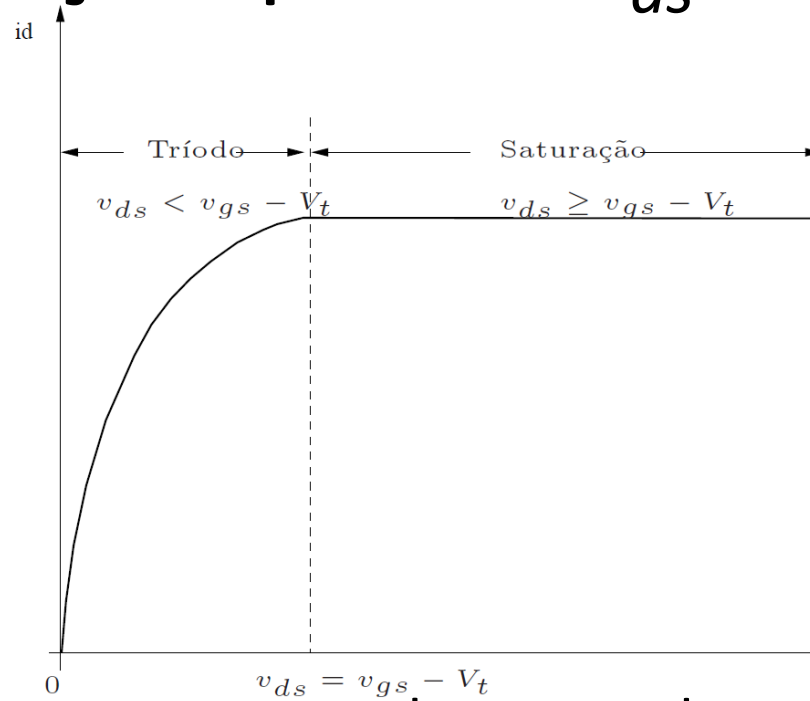
- Para o MOSFET conduzir, é necessário que seja induzido um canal.
- Aumentando v_{gs} acima da tensão de threshold, V_t , intensifica o canal.
- Daqui derivam os nomes “operação no modo de intensificação” e “MOSFET do tipo intensificação”.
- Como a corrente de gate é nula, a corrente que entra no terminal do drain é igual à que deixa o terminal da source.

Operação quando v_{ds} aumenta



Quando se viaja ao longo do canal, da source para o drain, a tensão aumenta de 0 V até v_{ds} . A tensão entre a gate e os pontos ao longo do canal diminui de v_{gs} perto do terminal da source até $v_{gs} - v_{ds}$ perto do drain. Como a profundidade do canal depende desta tensão, verifica-se que esta não é uniforme. Em vez disso, este apresenta uma forma afunilada.

Operação quando v_{ds} aumenta



Quando v_{ds} aumenta para um valor que reduz a tensão entre a gate e o canal perto do drain para V_t , isto é, $v_{gs} - v_{ds} = V_t$, ou $v_{ds} = v_{gs} - V_t$, a profundidade do canal perto do drain diminui praticamente para zero, dizendo-se neste caso que está estrangulado. Se v_{ds} aumentar para além deste valor, o efeito na forma do canal é muito reduzido (teoricamente nenhum) e a sua corrente permanece constante no valor alcançado quando $v_{ds} = v_{gs} - V_t$.

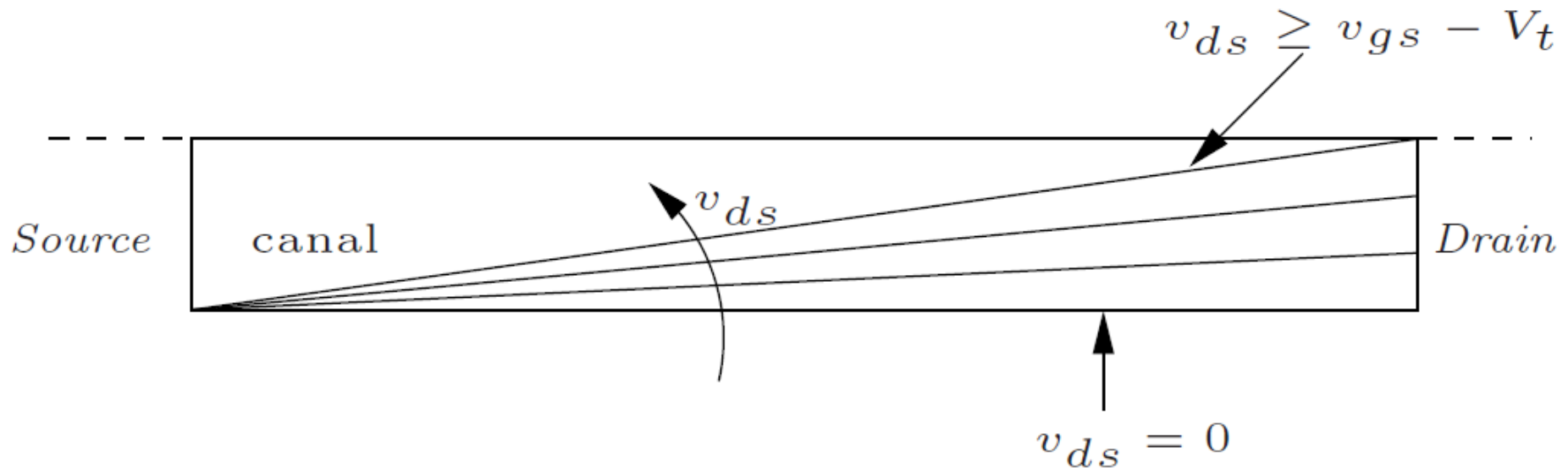
Operação quando v_{ds} aumenta

- Quando fica constante, pode dizer-se que a corrente de drain satura e o MOSFET entra na zona de saturação.
- A saturação num MOSFET tem um significado muito diferente da saturação num transístor bipolar.
- A tensão v_{ds} para a qual ocorre a saturação, v_{dsat} é dada por:

$$v_{dsat} = v_{gs} - V_t.$$

- Para cada valor de $v_{gs} \geq V_t$, existe um valor correspondente de v_{dsat} .
- A região da característica $i_d \times v_{ds}$ obtida quando $v_{ds} < v_{dsat}$ é chamada de “região de triodo”.

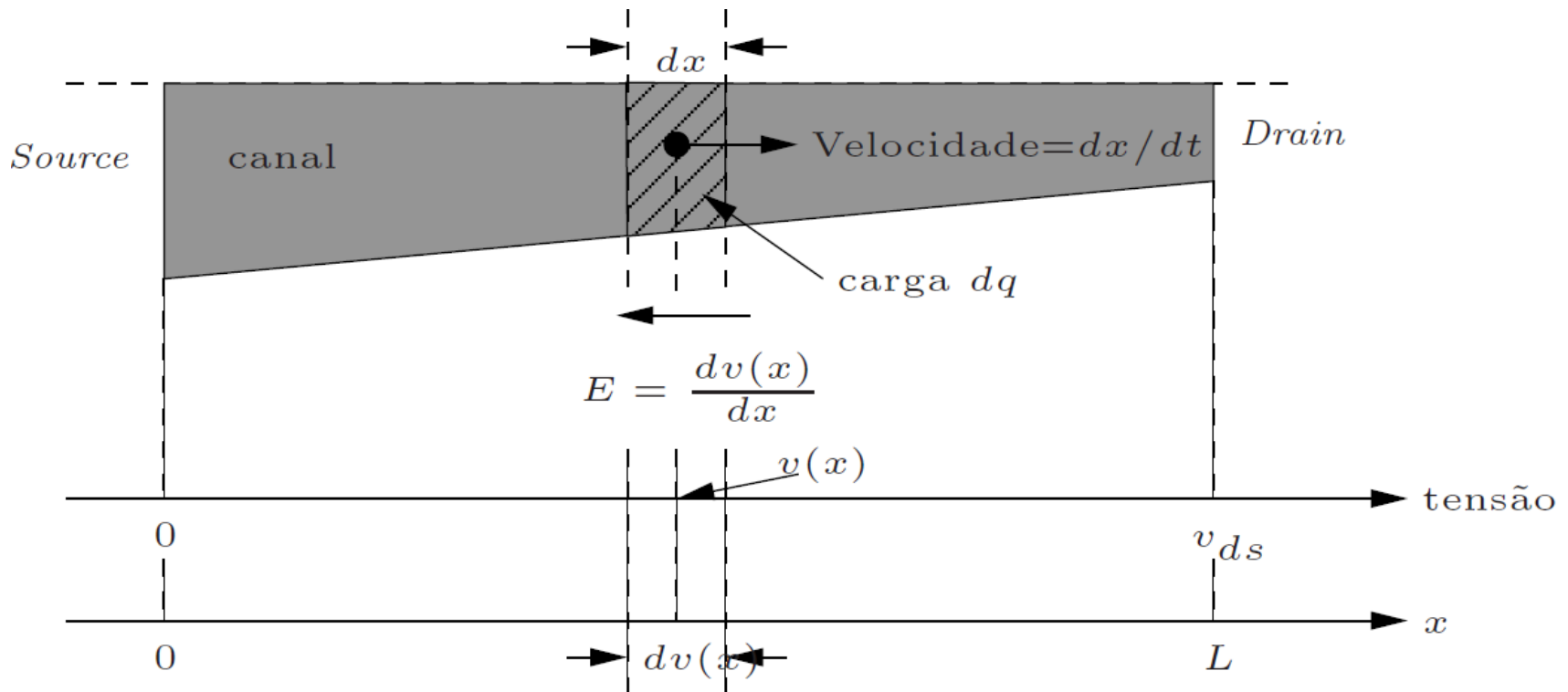
Operação quando v_{ds} aumenta



Teoricamente, qualquer aumento de v_{ds} acima de $v_{dsat} = v_{gs} - V_t$ não tem qualquer influência na forma do canal.

Relação entre v_{ds} e i_d

Considera-se que é aplicada uma tensão v_{gs} entre a gate e a source, cujo valor é superior a V_t , e uma tensão v_{ds} entre o drain e a source. Em primeiro lugar considera-se a operação na região de trípode, ou seja, $v_{ds} < v_{gs} - V_t$. O canal vai apresentar uma forma um pouco afunilada.



Relação entre v_{ds} e i_d

- Considere-se uma porção infinitesimal do comprimento do canal, dx , à distância x da source.
- A tensão nesse ponto é $v(x)$.
- A tensão entre a gate e esse ponto no canal, $v_{gs} - v(x)$, deve ser maior do que a tensão de threshold, V_t .
- A carga $dq(x)$ numa porção infinitesimal do canal pode ser expressa por $dq(x) = -C_{ox} W dx (v_{gs} - v(x) - V_t)$
 - C_{ox} é a capacitância por unidade de área de óxido dada por: $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$
 - W é a largura do canal.

Relação entre v_{ds} e i_d

- A tensão v_{ds} produz um campo elétrico ao longo do canal, na direção de x e no sentido oposto. No ponto x , este campo é dado por:

$$E(x) = -\frac{dv(x)}{dx}$$

- O campo elétrico $E(x)$ faz com que a carga $dq(x)$ se desloque em direção ao drain com a velocidade dx/dt em que:

$$\frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dv(x)}{dx}$$

- $(\mu_n$ é a mobilidade de um eletrão no canal).
- Corrente resultante: multiplica-se $dq(x)/dx$ por dx/dt :

$$i = -\mu_n C_{ox} W (v_{gs} - v(x) - V_t) \frac{dv(x)}{dx}$$

Relação entre v_{ds} e i_d

A corrente do drain é dada por:

$$i_d = \mu_n C_{ox} W (v_{gs} - v(x) - V_t) \frac{dv(x)}{dx}$$

Pode ser rearranjada na forma:

$$i_d dx = \mu_n C_{ox} W (v_{gs} - v(x) - V_t) dv(x)$$

Integrando ambos os lados da equação, de $x = 0$ até $x = L$ e correspondentemente de $v(0) = 0$ a $v(L) = v_{ds}$:

$$\int_0^L i_d dx = \int_0^{v_{ds}} \mu_n C_{ox} W (v_{gs} - v(x) - V_t) dv(x)$$

$$\text{Dá: } i_d = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{gs} - V_t) v_{ds} - \frac{1}{2} v_{ds}^2 \right]$$

(expressão para a característica $i_d \times v_{ds}$ na região de triodo).

Relação entre v_{ds} e i_d

Na região de saturação, i_d é praticamente constante. A sua expressão obtém-se da anterior fazendo a substituição $v_{ds} = v_{gs} - V_t$.

$$i_d = \frac{1}{2}(\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (v_{gs} - V_t)^2$$

$\mu_n C_{ox}$ é o “parâmetro de transcondutância do processo” e determina o valor da transcondutância do MOSFET (k'_n). Tem dimensões de A/V₂.

$$k'_n = \mu_n C_{ox}$$

Relação entre v_{ds} e i_d

- Em termos de k'_n :
 - Região de triodo:

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

- Região de saturação:

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

- I_d é proporcional à relação entre a largura W e o comprimento L do canal. São estes dois parâmetros que o projetista de circuitos integrados tem que escolher para obter as características tensão – corrente desejadas.

Parâmetros tecnológicos que determinam a relação entre as tensões e as correntes num transistor NMOS.

mobilidade do electrão: $\mu_n \simeq 580 \text{ cm}^2/Vs$

Espessura do óxido: t_{ox} de $0.02 \mu m$ a $0.1 \mu m$

Permitividade do óxido: $\varepsilon_{ox} = 3.97\varepsilon_o$
 $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$

Capacidade do óxido: $C_{ox} = \varepsilon_{ox}/t_{ox}$

Par. transcond. processo: $k'_n = \mu_n C_{ox}$

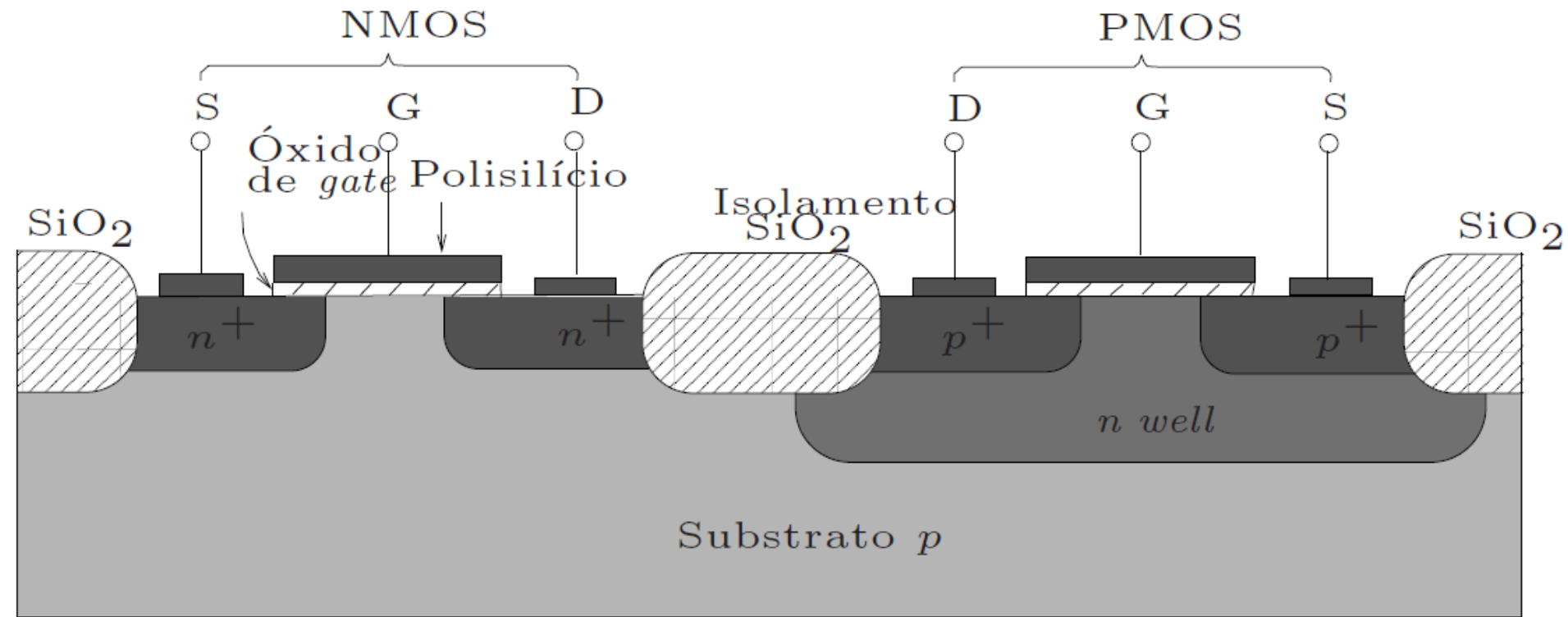
MOSFET de canal p

- O PMOS é fabricado num substrato do tipo n, com dopagens p^+ no drain e na source.
- Os portadores de carga, são as lacunas.
- Funciona do mesmo modo que NMOS
- As polaridades das tensões e os sentidos das correntes são invertidos.
- PMOS: primeira tecnologia usada.
- Devido aos factos de que os transístores NMOS poderem ter menores dimensões, operarem a mais altas frequências e requererem tensões um pouco menores, a tecnologia NMOS virtualmente substituiu a PMOS.

MOSFET de canal p

- É importante estar-se familiarizado com os transístores PMOS por duas razões:
 - Os dispositivos PMOS continuam a estar disponíveis para projetos de eletrónica discreta.
 - Tanto os PMOS como os NMOS são utilizados em circuitos CMOS (MOS Complementar).

MOS complementar ou CMOS



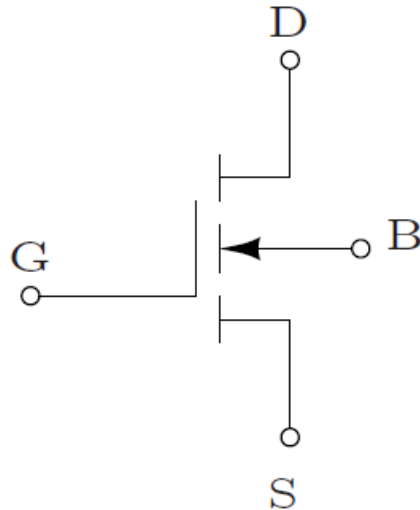
O transístor NMOS é implementado diretamente no substrato, enquanto que o transístor PMOS é implementado numa região n criada especialmente para o efeito, chamada de “ n well”. Os dois dispositivos estão isolados entre si por uma região espessa de dióxido de silício.

Região de subthreshold

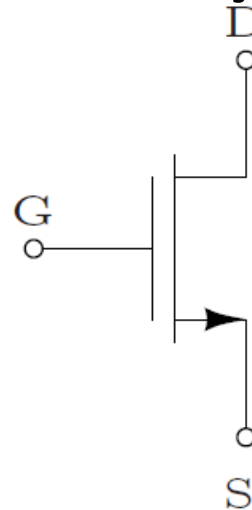
- Para $v_{gs} < V_t$, o NMOS encontra-se ao corte.
- Isto não é inteiramente verdade. Para valores de v_{gs} um pouco menores do que V_t , existe uma pequena corrente de drain.
- Esta região de operação, chama-se “região de subthreshold”.
- A corrente de drain está relacionada exponencialmente com V_{gs} .
- Esta relação é mais ou menos parecida com a relação entre V_{be} e I_c num transístor bipolar.
- Embora na maior parte das aplicações o transístor MOS opere com $v_{gs} > V_t$, existem alguns casos especiais que o usam na região de subthreshold .

Símbolo do MOSFET

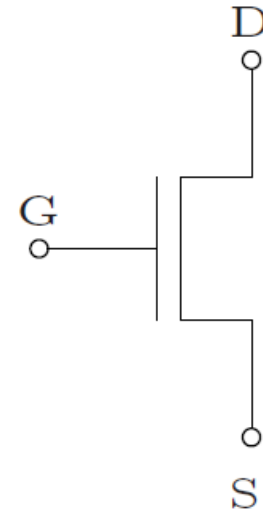
- MOSFET de canal n do tipo intensificação.



(a)



(b)



(c)

- (a): Símbolo geral.
- (b): Simplificação para o caso do substrato estar ligado à source.
- (c): Simplificação para o caso do substrato estar ligado ao potencial negativo do circuito.