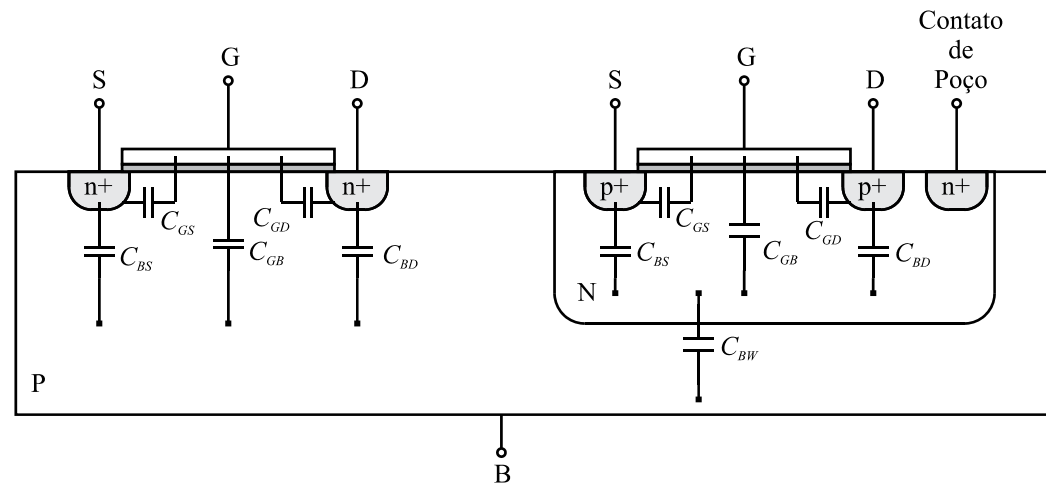


## Parâmetros de Pequenos Sinais no Modelo SPICE Simplificado

### *Capacitâncias parasitas*



$C_{GS}$  → Capacitância de gate para source

$C_{GD}$  → Capacitância de gate para dreno

$C_{GB}$  → Capacitância de gate para substrato

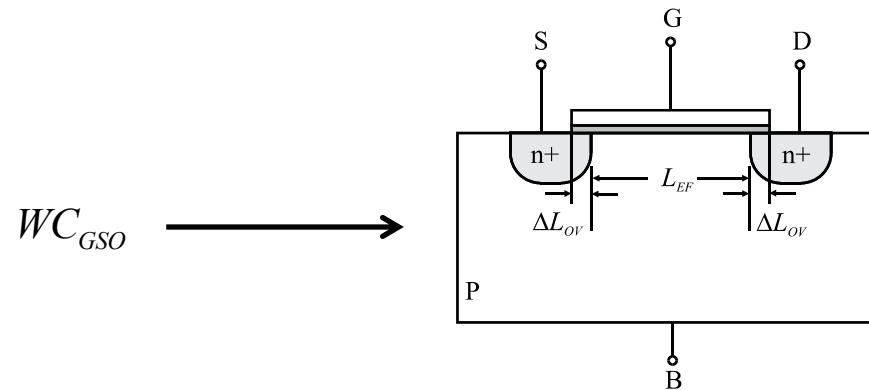
$C_{BS}$  → Capacitância de source para substrato

$C_{BD}$  → Capacitância de dreno para substrato

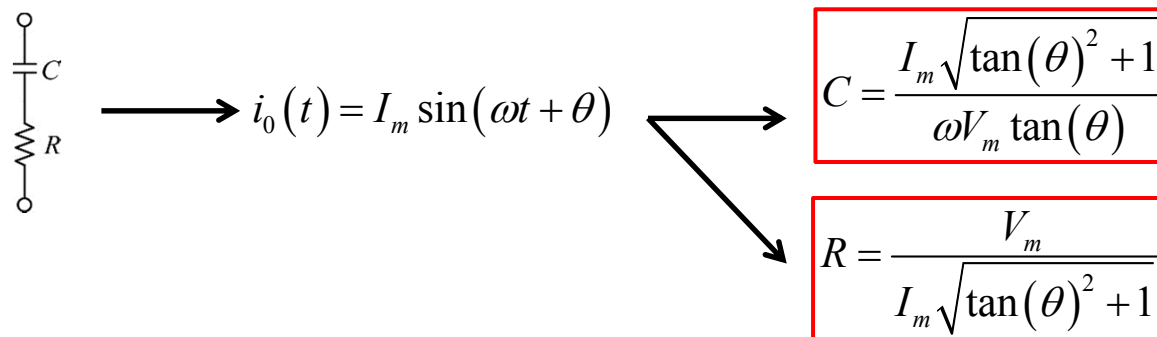
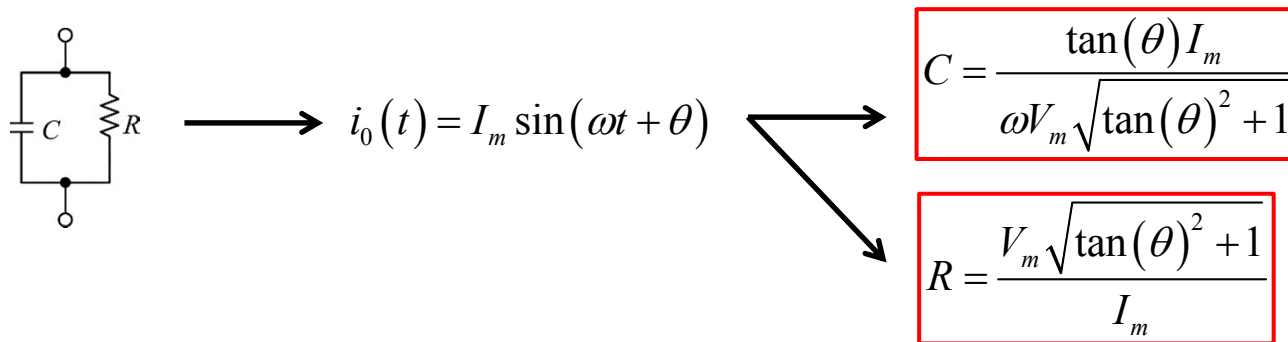
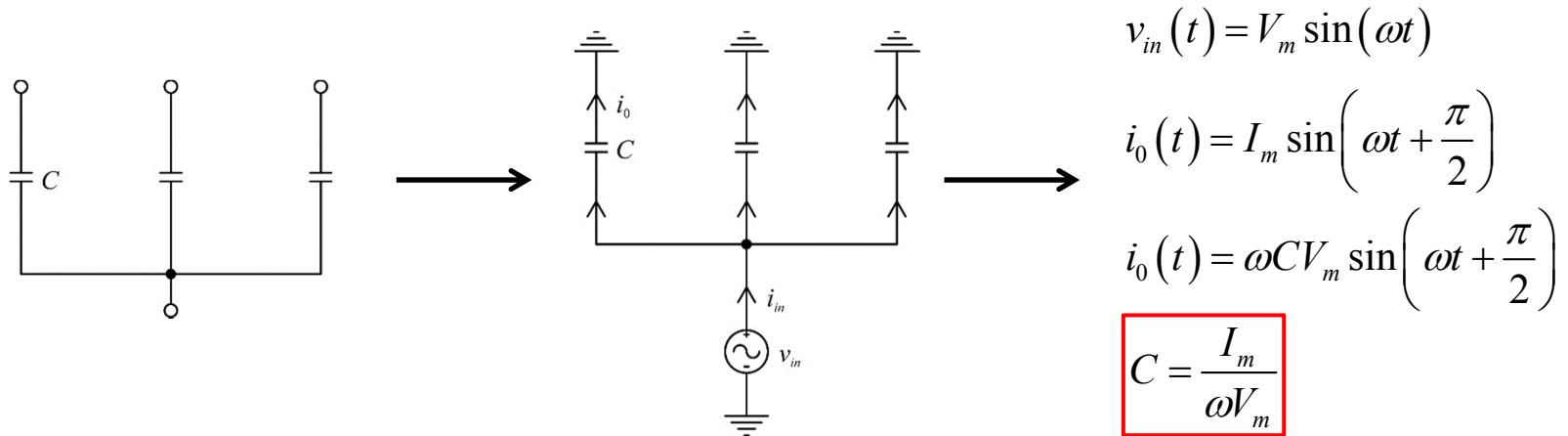
$C_{BW}$  → Capacitância de poço para substrato P

## Capacitâncias de overlap

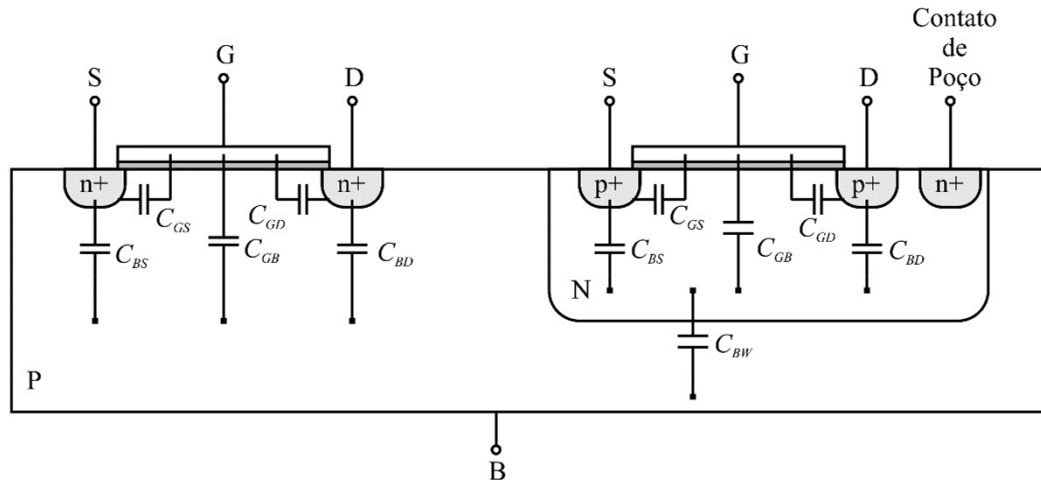
As capacitâncias de *overlap* existem por causa da sobreposição da placa de gate com as difusões de dreno e source. Estas capacitâncias se somam às intrínsecas das junções. Os valores são dados pelas constantes  $C_{GSO}$  e  $C_{GDO}$ , que representam as capacitâncias por unidade de comprimento, e os valores absolutos são dados pelo produto destas constantes pela largura  $W$  do MOSFET.



## Como medir os capacitores



## Capacitâncias na região de corte



### CORTE

$$C_{GS} = C_{GSO}W$$

$$C_{GD} = C_{GDO}W$$

$$C_{BS} = C_{SJ}$$

$$C_{GB} = C_{ox}WL_{EF}$$

$$C_{BD} = C_{DJ}$$

$$C_{BW} = C_{WJ}$$

$C_{GDO}$  é a capacitância de sobreposição gate-dreno por largura de canal

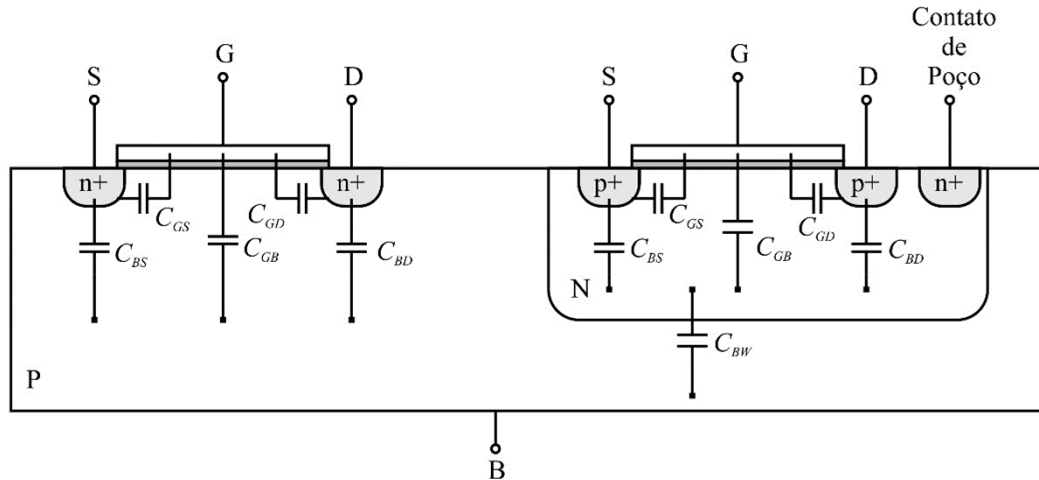
$C_{GSO}$  é a capacitância de sobreposição gate-fonte por largura de canal.

$C_{SJ}$  e  $C_{DJ}$  são as capacitâncias das junções gate-substrato e dreno-substrato.

$C_{ox}$  é a capacitância de gate por unidade de área.

Os capacitores  $C_{BS}$ ,  $C_{BD}$  e  $C_{BW}$  são capacitâncias de depleção, junção polarizada reversamente, e dependem da polarização reversa da junção e de sua geometria.

## Capacitâncias na região de inversão fraca



## INVERSÃO FRACA

$$C_{GD} = C_{GDO}W$$

$$C_{BD} = C_{DJ}$$

$$C_{GB} = \frac{WL_{EF}C_{ox}\gamma}{2\sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB}}}$$

$$C_{GS} = C_{GSO}W$$

$$C_{BS} = C_{SJ}$$

$$C_{BW} = C_{WJ}$$

$C_{GDO}$  é a capacitância de sobreposição gate-dreno por largura de canal

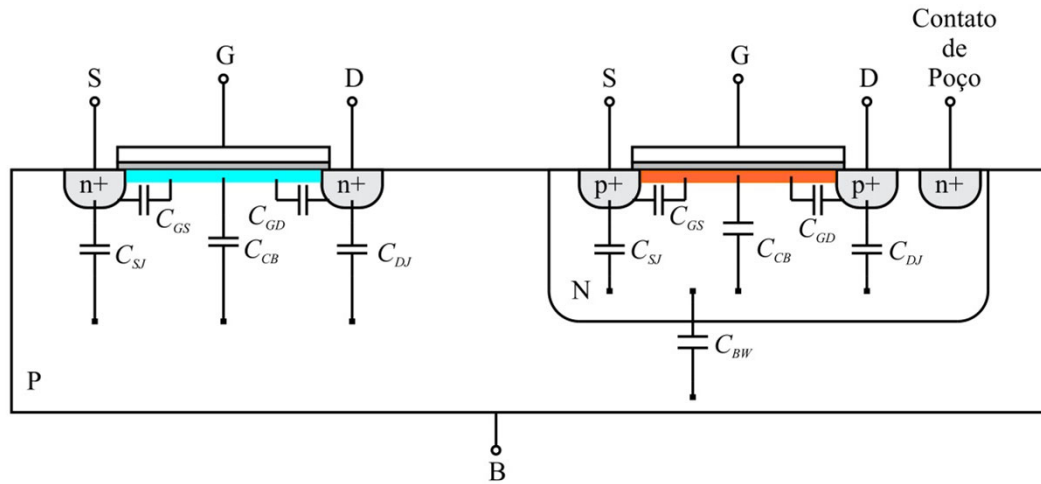
$C_{GSO}$  é a capacitância de sobreposição gate-fonte por largura de canal.

$C_{SJ}$  e  $C_{DJ}$  são as capacitâncias das junções gate-substrato e dreno-substrato.

$C_{ox}$  é a capacitância de gate por unidade de área.

Os capacitores  $C_{BS}$ ,  $C_{BD}$  e  $C_{BW}$  são capacitâncias de depleção, junção polarizada reversamente, e dependem da polarização reversa da junção e de sua geometria.

## Capacitâncias na região de inversão forte em triodo



$$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$$

## TRIODO

$$V_{DB} = V_{SB}$$

$$C_{GD} = \frac{1}{2}WL_{EF}C_{ox} + C_{GDO}W$$

$$C_{BD} = C_{DJ} + \frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{2}$$

$$C_{GB} \cong 0$$

$$C_{GS} = \frac{1}{2}WL_{EF}C_{ox} + C_{GSO}W$$

$$C_{BS} = C_{SJ} + \frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{2}$$

$$C_{BW} = C_{WJ}$$

$C_{GDO}$  é a capacitância de sobreposição gate-dreno por largura de canal

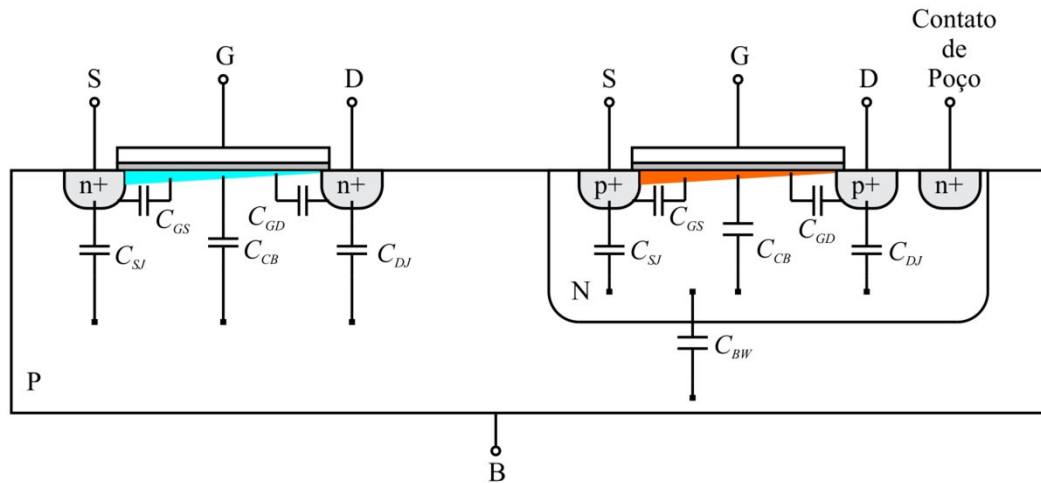
$C_{GSO}$  é a capacitância de sobreposição gate-fonte por largura de canal.

$C_{SJ}$  e  $C_{DJ}$  são as capacitâncias das junções gate-substrato e dreno-substrato.

$C_{ox}$  é a capacitância de gate por unidade de área.

Os capacitores  $C_{BS}$ ,  $C_{BD}$  e  $C_{BW}$  são capacitâncias de depleção, junção polarizada reversamente, e dependem da polarização reversa da junção e de sua geometria.

## Capacitâncias na região de inversão forte em saturação



$$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$$

## SATURAÇÃO

$$C_{GD} = C_{GDO}W$$

$$C_{BD} = C_{DJ}$$

$$C_{GB} = \frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{3\alpha}$$

$$C_{GS} = \frac{2}{3}WL_{EF}C_{ox} + C_{GSO}W$$

$$C_{BS} = C_{SJ} + \frac{2}{3}(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}$$

$$C_{BW} = C_{WJ}$$

$C_{GDO}$  é a capacitância de sobreposição gate-dreno por largura de canal

$C_{GSO}$  é a capacitância de sobreposição gate-fonte por largura de canal.

$C_{SJ}$  e  $C_{DJ}$  são as capacitâncias das junções gate-substrato e dreno-substrato.

$C_{ox}$  é a capacitância de gate por unidade de área.

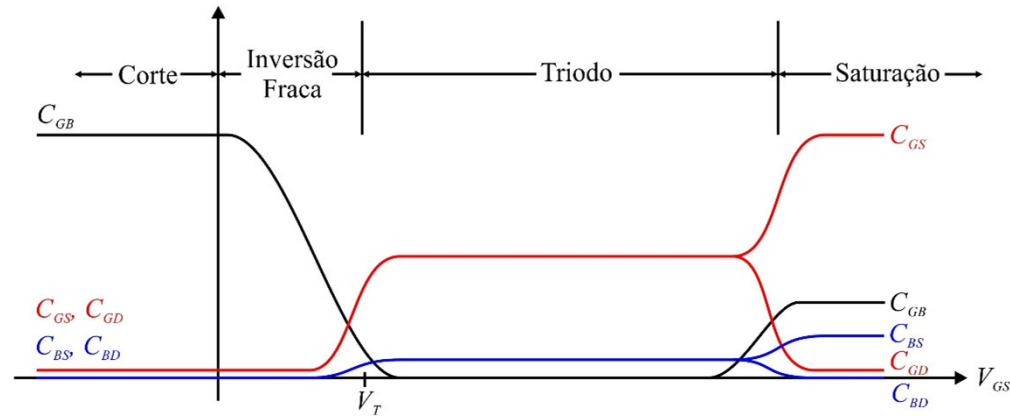
Os capacitores  $C_{BS}$ ,  $C_{BD}$  e  $C_{BW}$  são capacitâncias de depleção, junção polarizada reversamente, e dependem da polarização reversa da junção e de sua geometria.

## Equações dos capacitores em função da região de operação

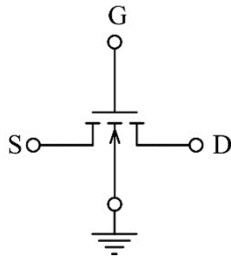
	CORTE	INVERSÃO FRACA	TRIODO	SATURAÇÃO
$C_{GD}$	$C_{GDO}W$	$C_{GDO}W$	$\frac{1}{2}WL_{EF}C_{ox} + C_{GDO}W$	$C_{GDO}W$
$C_{BD}$	$C_{DJ}$	$C_{DJ}$	$C_{DJ} + \frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{2}$	$C_{DJ}$
$C_{GB}$	$C_{ox}WL_{EF}$	$\frac{WL_{EF}C_{ox}\gamma}{2\sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB}}}$	$\cong 0$	$\frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{3\alpha}$
$C_{GS}$	$C_{GSO}W$	$C_{GSO}W$	$\frac{1}{2}WL_{EF}C_{ox} + C_{GSO}W$	$\frac{2}{3}WL_{EF}C_{ox} + C_{GSO}W$
$C_{BS}$	$C_{SJ}$	$C_{SJ}$	$C_{SJ} + \frac{(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}}{2}$	$C_{SJ} + \frac{2}{3}(\alpha - 1)WL_{EF}C_{ox}$
$C_{BW}$	$C_{WJ}$	$C_{WJ}$	$C_{WJ}$	$C_{WJ}$
Na inversão forte e em triodo, $V_{DB} = V_{SB}$				
$C_{GDO}$ é a capacitância de sobreposição gate-dreno por largura de canal.				
$C_{GSO}$ é a capacitância de sobreposição gate-fonte por largura de canal.				
$C_{SJ}$ e $C_{DJ}$ são as capacitâncias das junções gate-substrato e dreno-substrato.				
$C_{ox}$ é a capacitância de gate por unidade de área.				
Considerando em triodo $V_{DB} = V_{SB}$				
$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$				



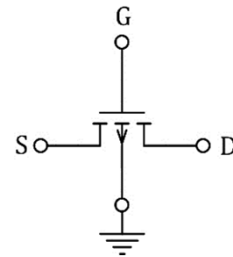
## Gráfico das capacitâncias em função da polarização



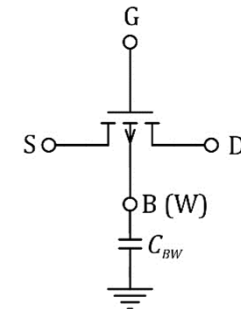
## Conexões dos transistores NMOS e PMOS



O substrato do NMOS  
é sempre o terra

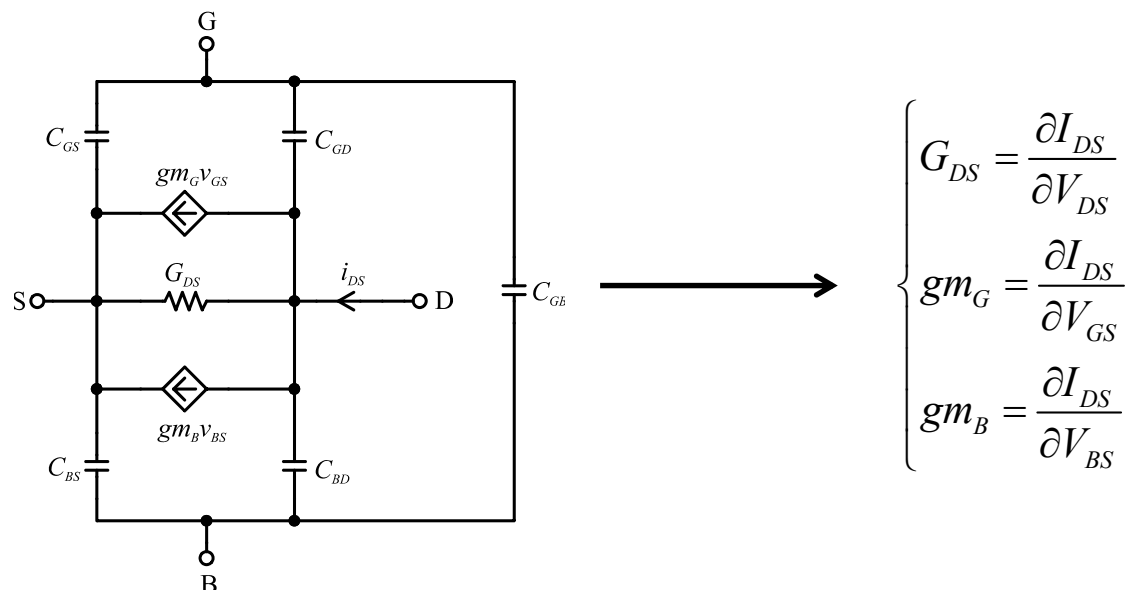
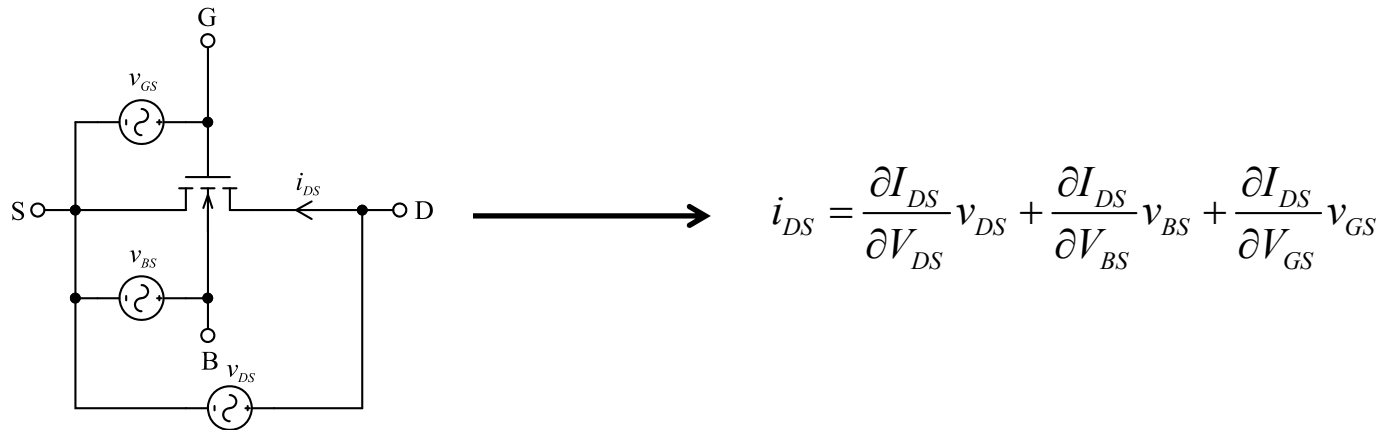


O substrato do PMOS  
é o terra, se o poço N  
estiver polarizado com  
uma tensão fixa



O substrato do PMOS,  
quando suspenso, possui a  
capacitância  $C_{BW}$  parasita  
para o terra

## Transcondutâncias de pequenos sinais



## *Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Forte e em Triodo*

$$I_{DS} = k_p \frac{W}{L_{EF}} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{\alpha}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left( \sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$$

$$G_{DS} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} = k_p \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T - \alpha V_{DS})$$

$$gm_G = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = k_p \frac{W}{L_{EF}} V_{DS}$$

$$gm_B = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} = -k_p \frac{W}{L_{EF}} V_{DS} \frac{\partial V_T}{\partial V_{SB}} \frac{\partial V_{SB}}{\partial V_{BS}} = k_p \frac{W}{L_{EF}} (\alpha - 1) V_{DS} = (\alpha - 1) gm_G$$

*Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Forte e em Triodo*

Parâmetro	NMOS	PMOS
$G_{DS}$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T - \alpha V_{DS})$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} (V_{SG} + V_T - \alpha V_{SD})$
$gm_G$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} V_{DS}$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} V_{SD}$
$gm_B$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} (\alpha - 1) V_{DS}$	$k_p \frac{W}{L_{EF}} (\alpha - 1) V_{SD}$
	$(\alpha - 1) gm_G$	$(\alpha - 1) gm_G$

## *Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Forte e em Saturação*

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left( \sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$$

$$G_{DS} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 \lambda \cong \lambda I_{DS}$$

$$gm_G = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T) (1 + \lambda V_{DS}) = \sqrt{2 \frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (1 + \lambda V_{DS}) I_{DS}}$$

$$gm_B = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} = -\frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T) (1 + \lambda V_{DS}) \frac{\partial V_T}{\partial V_{SB}} \frac{\partial V_{SB}}{\partial V_{BS}} = (\alpha - 1) gm_G$$

# Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Forte e em Saturação

Parâmetro	NMOS	PMOS
$G_{DS}$	$\frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)^2 \lambda$	$\frac{k_p}{2\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{SG} + V_T)^2 \lambda$
	$\lambda I_{DS}$	$\lambda I_{SD}$
$gm_G$	$\frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS})$	$\frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (V_{SG} + V_T)(1 + \lambda V_{SD})$
	$\sqrt{2 \frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (1 + \lambda V_{DS}) I_{DS}}$	$\sqrt{2 \frac{k_p}{\alpha} \frac{W}{L_{EF}} (1 + \lambda V_{SD}) I_{SD}}$
$gm_B$	$(\alpha - 1) gm_G$	$(\alpha - 1) gm_G$

## Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Fraca e em Saturação

$$I_{DS} = I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} \left( 1 - e^{-V_{DS}/\phi_T} \right) (1 + \lambda V_{DS}) \cong I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left( \sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

$$n = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F + V_{SB}}}$$

$$G_{DS} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} = \lambda I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} \cong \lambda I_{DS}$$

$$gm_G = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{I_{D0}}{n\phi_T} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS}) = \frac{I_{DS}}{n\phi_T}$$

$$gm_B = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{BS}} = -\frac{I_{D0}}{n\phi_T} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS}) \frac{\partial V_T}{\partial V_{SB}} \frac{\partial V_{SB}}{\partial V_{BS}} = \frac{(n-1)}{n\phi_T} I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS}) = \frac{(n-1)}{n\phi_T} I_{DS} = (n-1) gm_G$$

*Transcondutâncias de Pequenos Sinais na Região de Inversão Fraca e em Saturação*

Parâmetro	NMOS	PMOS
$G_{DS}$	$\lambda I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}}$	$\lambda I_{D0} e^{\frac{V_{SG}- V_T }{n\phi_T}}$
	$\cong \lambda I_{DS}$	$\cong \lambda I_{SD}$
$gm_G$	$\frac{I_{D0}}{n\phi_T} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS})$	$\frac{I_{D0}}{n\phi_T} e^{\frac{V_{SG}- V_T }{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{SD})$
	$\frac{I_{DS}}{n\phi_T}$	$\frac{I_{SD}}{n\phi_T}$
$gm_B$	$\frac{(n-1)}{n\phi_T} I_{D0} e^{\frac{V_{GS}-V_T}{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{DS})$	$\frac{(n-1)}{n\phi_T} I_{D0} e^{\frac{V_{SG}- V_T }{n\phi_T}} (1 + \lambda V_{SD})$
	$(n-1)gm_G$	$(n-1)gm_G$



**Final deste  
Tópico**