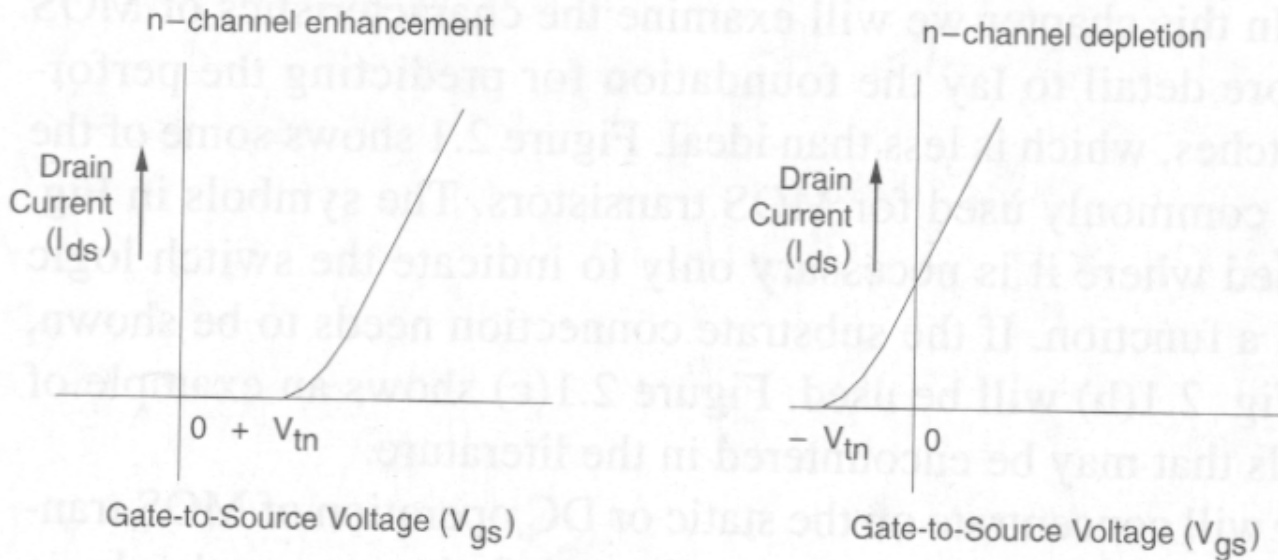
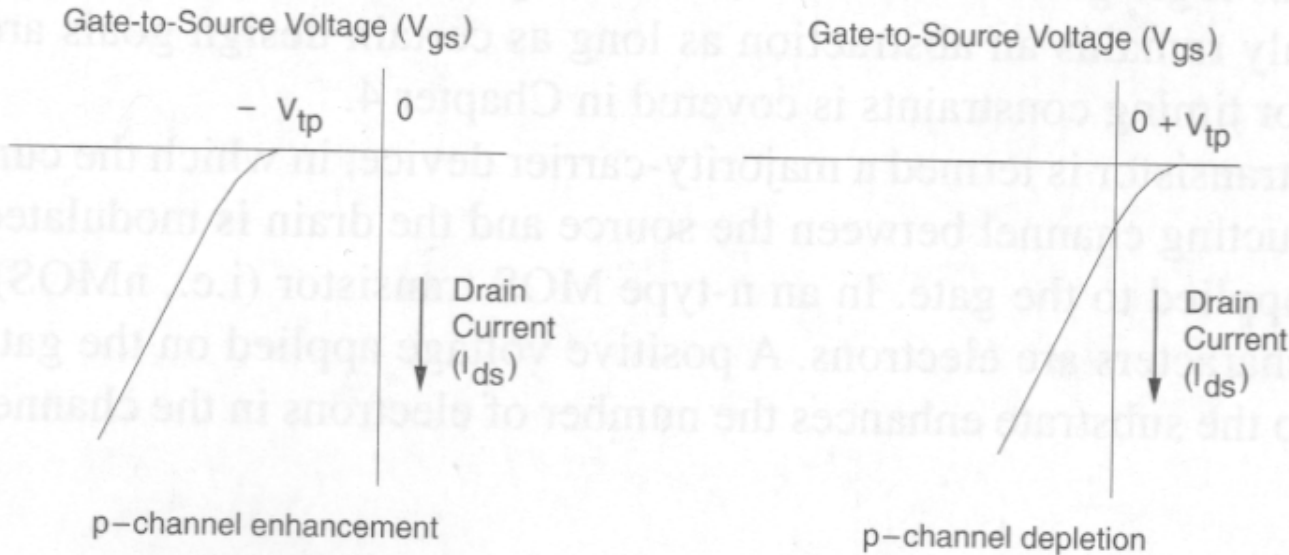
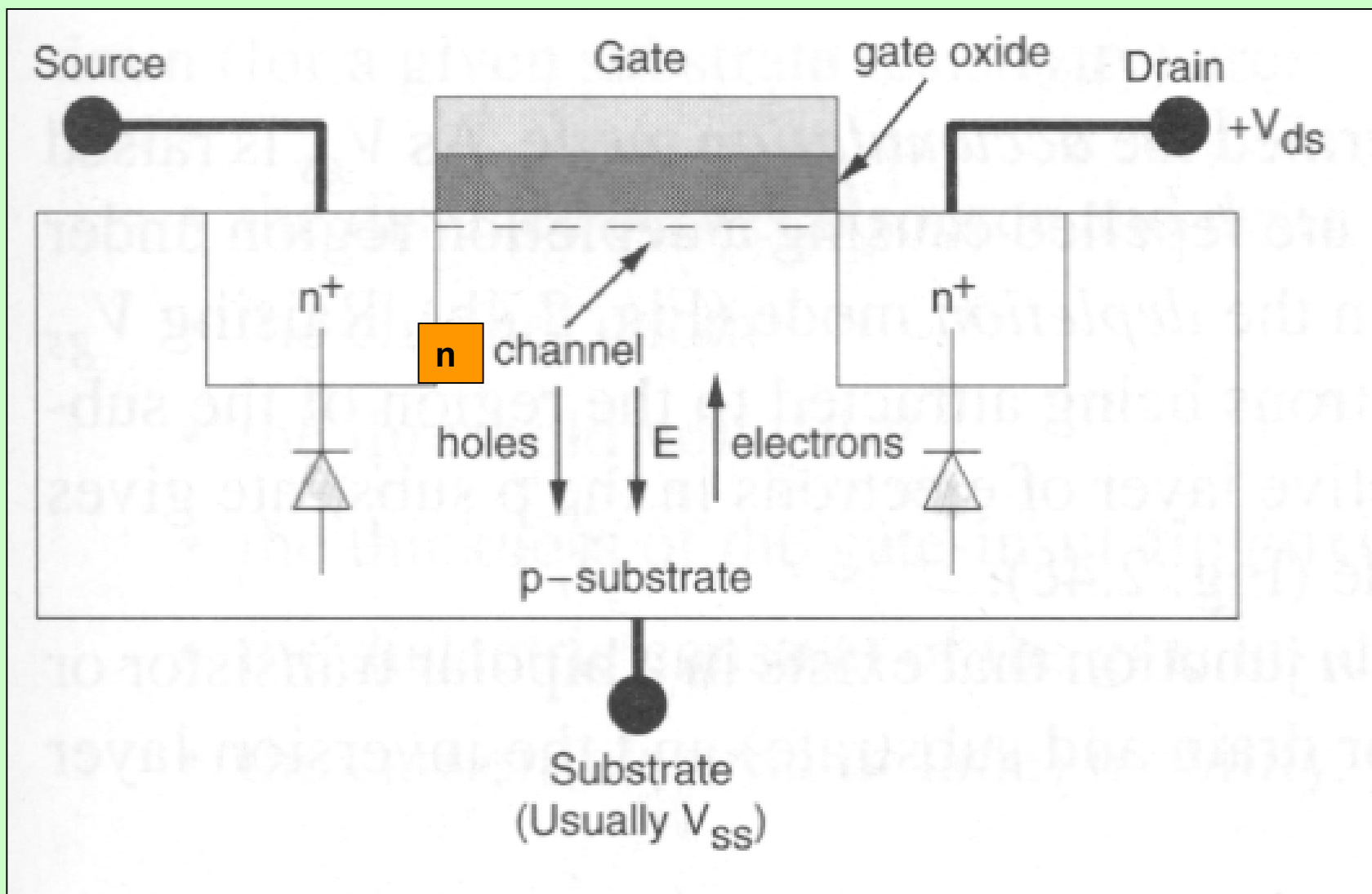


TEORIA TRANZYSTORÓW MOS

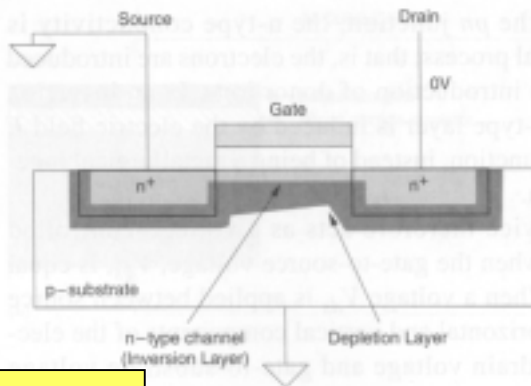


Charakterystyki statyczne



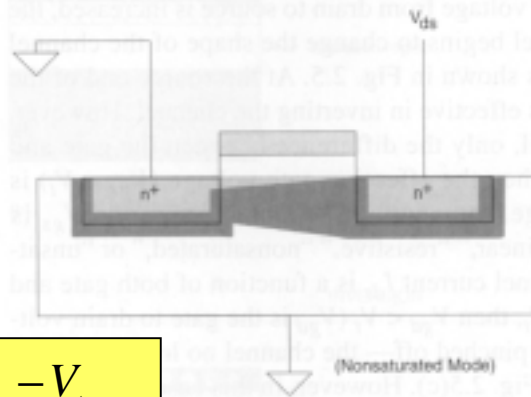


Aktywne podłoże, a napięcia polaryzacji złącz tranzystora wzbogacanego nMOS



Obszar odcięcia

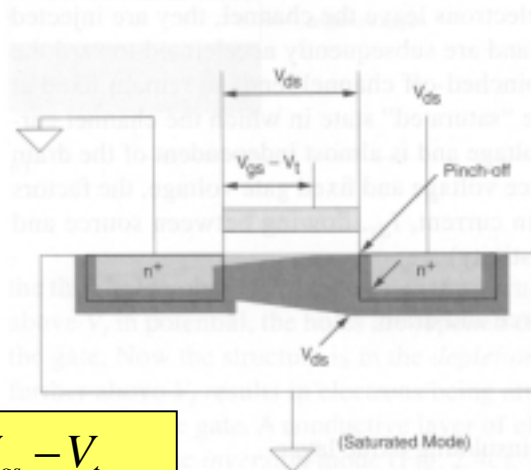
$$V_{gs} > V_t, \quad V_{ds} = 0$$



$$V_{ds} < V_{gs} - V_t$$

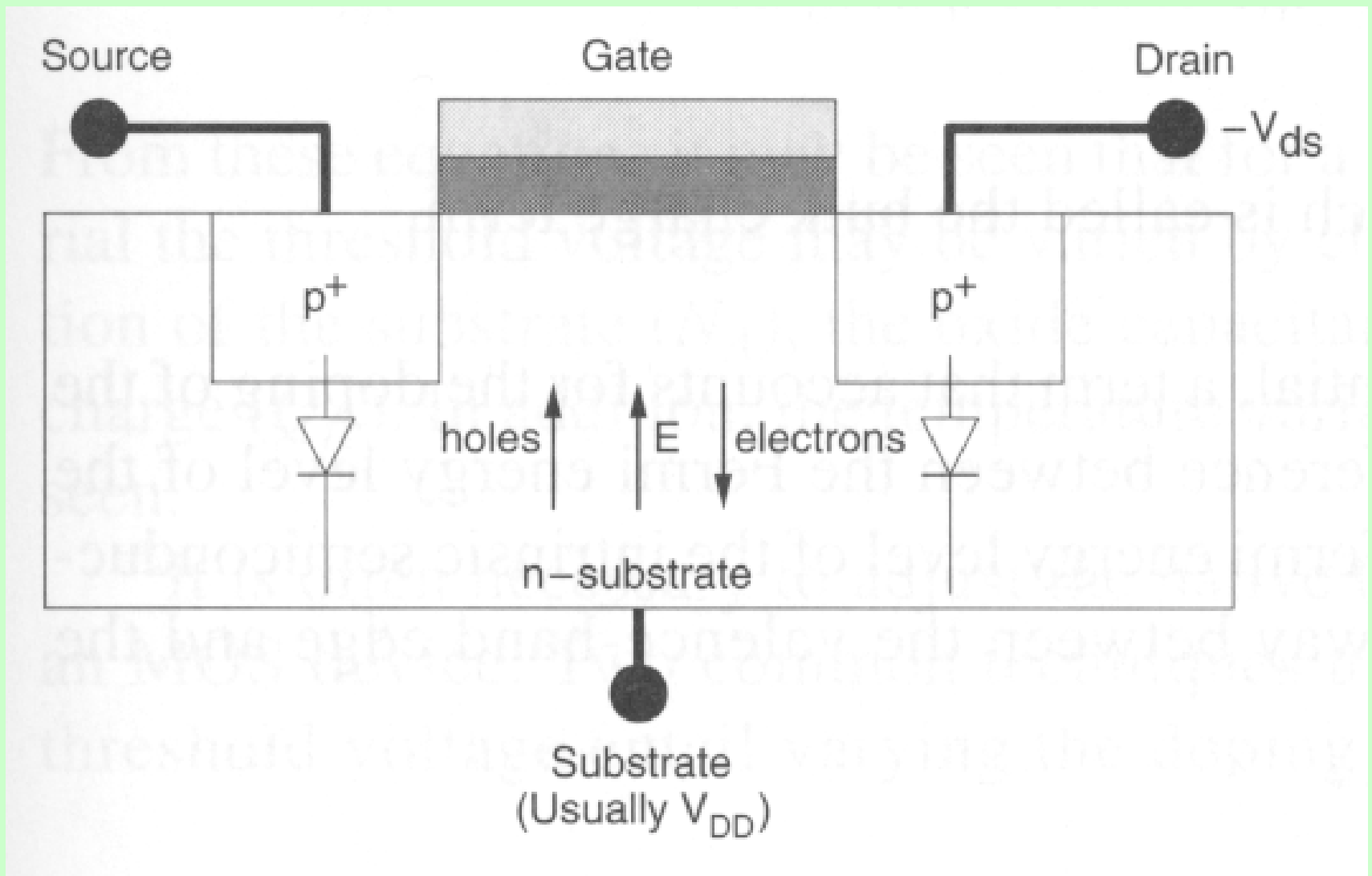
Obszar liniowy (omowy)

Kanał indukowany napięciem bramki $> V_t$.
Napięcie $V_{gs} - V_t > V_{ds}$ powoduje pogłębianie kanału, prowadzące do liniowej zależności prądu od napięcia.



$$V_{ds} > V_{gs} - V_t$$

Obszar nasycenia (źródło prądowe)



Budowa tranzystora pMOS

NAPIĘCIE PROGOWE V_t

Zależność od temperatury: $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$ - dla wysokodomieszkowanego podłoża
 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ - dla niskodomieszkowanego podłoża

$$V_t = V_{to} + V_{fb}$$

gdzie, V_{to} - idealne napięcie progowe (idealnego tranzystora MOS)

V_{fb} - składnik technologiczny

$$V_{to} = 2\phi_b + \frac{Q_b}{C_{ox}}$$

gdzie $\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{N_i}\right)$ - potencjał objętościowy, zależny od poziomu domieszkowania

podłoża. Reprezentuje różnicę między poziomami energii Fermiego półprzewodnika domieszkowanego i naturalnego. N_A - gęstość nośników w domieszkowanym podłożu, N_i - gęstość nośników w niedomieszkowanym krzemie, k - stała Boltzmana, q - ładunek elektryczny, T - temperatura

$Q_b = \sqrt{2\varepsilon_{Si} q N_A 2\phi_b}$ - ładunek objętościowy, ε_{Si} - przenikalność dielektryczna krzemu

C_{ox} - pojemność „kondensatora” tlenkowego

Składnik technologiczny V_{fb}

$$V_{fb} = \phi_{ms} - \frac{Q_{fc}}{C_{ox}}$$

gdzie $\phi_{ms} = f(\phi_g - \phi_{Si})$ - funkcja różnicy potencjałów podłoża i materiału bramki

$$\phi_{ms} = -\left(\frac{E_g}{2} + \phi_b\right), \quad E_g - \text{potencjał definiujący przerwę energetyczną krzemu}$$

$$\phi_{ms} = -0.9V \text{ dla podłoża typu p i } -0.2V \text{ dla podłoża typu n.}$$

Q_{fc} - ładunek wynikający z niedokładności wykonania złącza i domieszkowania.

Wniosek Dla określonych materiałów podłoża i bramki napięcie progowe może zmieniać się ze zmianami koncentracji domieszek, pojemności bramki (C_{ox}) i ładunkiem powierzchniowym Q_{fc} .

Wszystkie wymienione przyczyny są zależne od temperatury

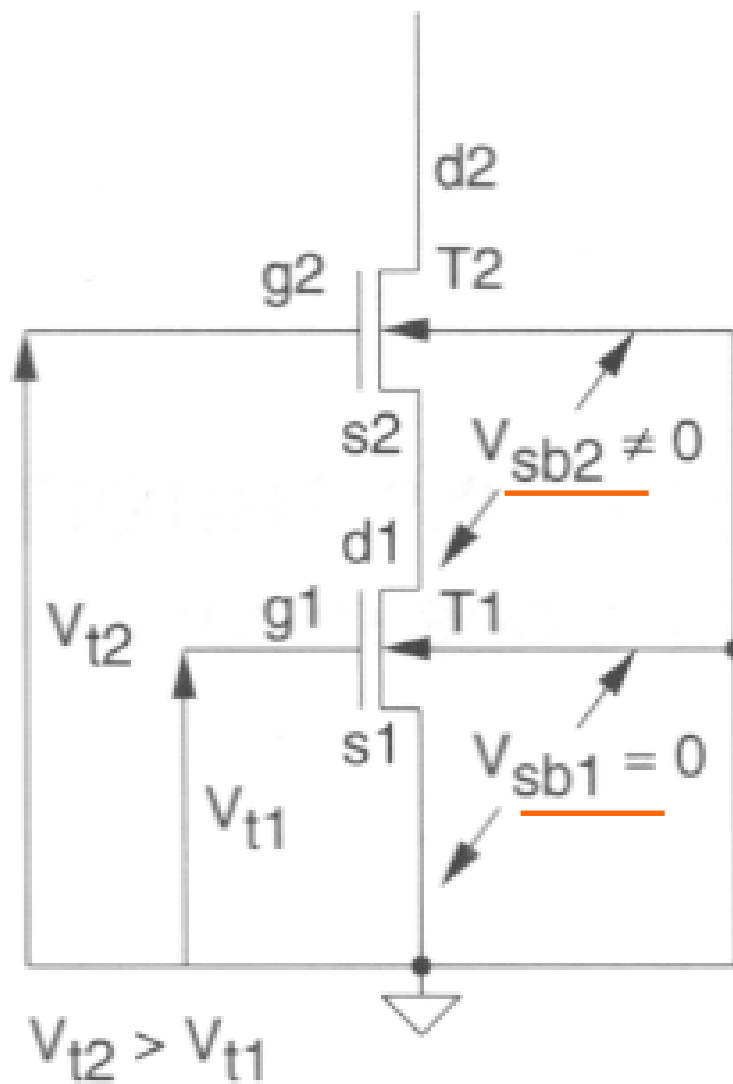
Przykład Obliczyć napięcie progowe tranzystora z kanałem typu n w temperaturze 300 degK, podłoże krzemowe, $N_A = 1.8 \times 10^{16}$, grubość tlenku bramki 200 \AA . Otrzymujemy:

$$\phi_b = 0.36V$$

$$C_{ox} = 172.5 nF / cm^2$$

$$V_t = 0.16V$$

EFEKT OBJĘTOŚCIOWY (BODY EFFECT)



UPROSZCZONY MODEL MATEMATYCZNY TRANZYSTORA MOS (Shockley)

1) Obszar odcięcia

$$I_{ds} = 0, \quad V_{gs} \leq V_t$$

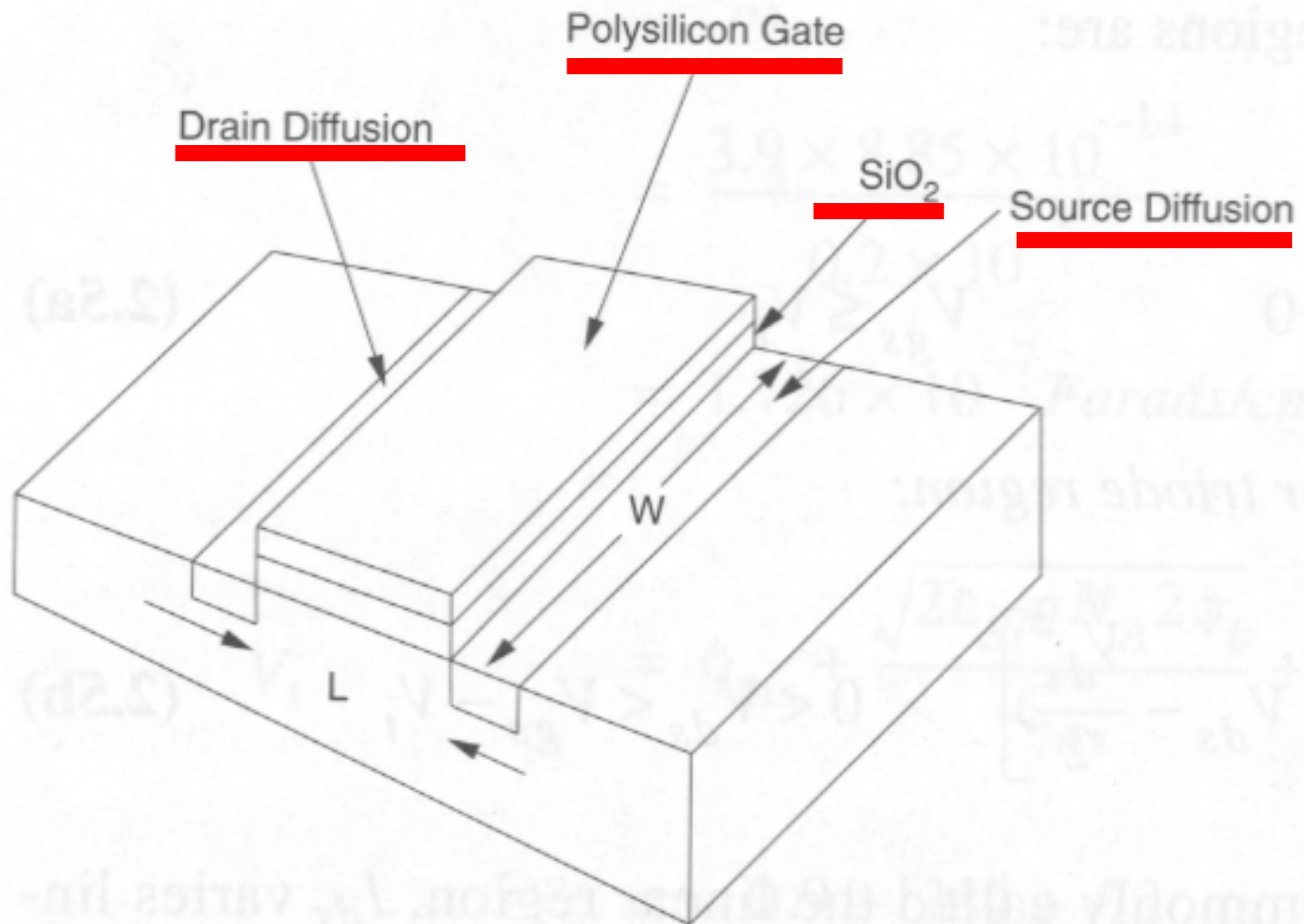
2) Obszar nienasycony (liniowy, triodowy, omowy)

$$I_{ds} = \beta \left[(V_{gs} - V_t) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right], \quad 0 < V_{ds} < V_{gs} - V_t, \quad \frac{V_{ds}^2}{2} \ll V_{gs} - V_t$$

3) Obszar nasycenia

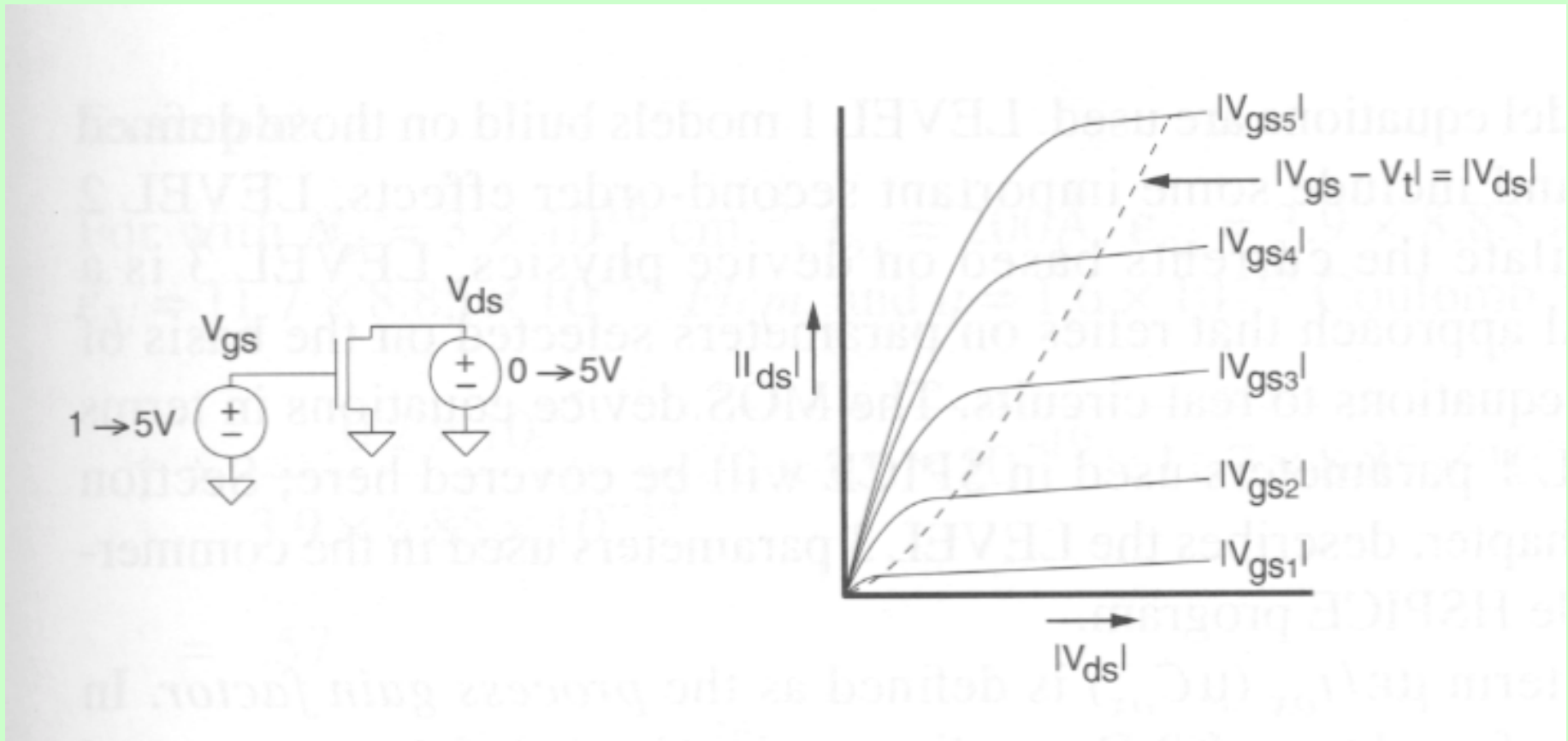
$$I_{ds} = \beta \frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2}, \quad 0 < V_{gs} - V_t < V_{ds}$$

gdzie, $\beta = \frac{\mu \varepsilon}{t_{ox}} \left(\frac{W}{L} \right)$ μ - powierzchniowa ruchliwość nośników w kanale,
 ε - przenikalność izolatora bramki, t_{ox} - grubość izolatora bramki, W/L - następane przeźrocze



Schemat geometrii modelu Shockley'a

Charakterystyki prądowo-napięciowe modelu Shockley'a



Przykład Tranzystor typu n (kanał typu n). Typowy prąd drenu = $1\mu\text{A}$, dane fizyczne:

$$\mu_n = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \quad \varepsilon = 3.9 \varepsilon_0 = 3.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}, \quad t_{\text{ox}} = 200 \text{ \AA}.$$

Czyli wartość
$$\beta = \frac{500 \cdot 3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{0.2 \cdot 10^{-5}} \frac{W}{L} = 88.5 \frac{W}{L} \mu\text{A}/\text{V}^2$$

Analogicznie oblicza się współczynnik wzmocnienia dla tranzystora typu p. $\mu_p = 180$, $\beta = 32$

EFEKTY DRUGIEGO RZĘDU, A SYMULACJA KOMPUTEROIWA

Poziomy **SPICE**

LEVEL 1 - w oparciu o równanie Shockley'a

LEVEL 2 - w oparciu o modele fizyczne

LEVEL 3 - w oparciu o „dopasowanie” charakterystyk modelu do charakterystyk fizycznych.

EFEKTY DRUGIEGO RZĘDU

Napięcie progowe modulowane napięciem podłoże-źródło

$$V_t = V_{fb} + 2\phi_b + \frac{\sqrt{2\varepsilon_{Si}qN_A(2\phi_b + |V_{sb}|)}}{C_{ox}}$$

Człon modyfikujący

lub inaczej

$$V_t = V_0 + \gamma[\sqrt{(2\phi_b + |V_{sb}|)} - \sqrt{2\phi_b}]$$

gdzie V_0 - jest napięciem V_t , przy założeniu, że $V_{bs}=0$.

γ - stała opisująca omawiany efekt (parametr SPICE),

$\gamma = 0.4-1.2$

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_{Si}N_A}$$

W SPICE parametr γ nazywany jest GAMMA, a parametr V_0 - VTO, N_A - NSUB, $2\Phi_b$ - PHI

Przykład

Dla danych tranzystora MOS: $N_A=3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $t_{\text{ox}}=200 \text{ \AA}$, $\epsilon_{\text{ox}}=3.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$,
 $\epsilon_{\text{Si}}=11.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$, $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

Obliczamy: $\gamma = 0.57$, $\Phi_b=0.375 \text{ V}$

Dla napięcia $V_{\text{sb}}=2.5 \text{V}$, otrzymujemy $V_{\text{t}2.5}=V_{\text{t}0}+0.53 \text{V}$

Wniosek Wzrasta napięcie progowe, a tym samym maleje prąd i maleje prędkość układu.

Obszar podprogowy (subthreshold region)

W obszarze, gdzie napięcie bramki V_{gs} jest mniejsze od napięcia progowego V_t prąd drenu wzrasta eksponencjalnie ze wzrostem napięcia bramki i/lub drenu, jakkolwiek pozostaje bardzo mały.

$$I_d = f_{\text{exp}}(V_{\text{gs}}, V_{\text{ds}})$$

To zjawisko wykorzystuje się w elektronice bardzo małych mocy.

Odpowiedni model SPICE - poziom3.

Modulacja długości kanału

Uwzględnia się wpływ napięcia źródło - dren na długość kanału.
To zjawisko jest szczególnie widoczne w tranzystorach o bardzo krótkich kanałach.
W obszarze nasycenia obowiązuje zależność

$$L_{eff} = L - L_{short}$$

gdzie

$$L_{short} = \sqrt{2 \frac{\epsilon_{Si}}{qN_A} (V_{ds} - (V_{gs} - V_t))}$$

Redukcja długości L powoduje wzrost współczynnika W/L, a w konsekwencji wzrost współczynnika wzmocnienia. Ostatecznie wzrost prądu drenu można zapisać jako:

$$I_{ds} = \beta \frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2} (1 + \lambda V_{ds})$$

gdzie

λ - współczynnik empiryczny modulacji długości kanału,

$\lambda = 0.005 - 0.02 \text{ V}^{-1}$.

W SPICE parametr LAMBDA (level 1)

Zmiana ruchliwości nośników

Ruchliwość nośników definiuje się następująco

$$\mu = \frac{V[cm^2 / Vs]}{E[V / cm]}$$

V - średnia prędkość dryftu, E - natężenie pola elektrycznego.

W SPICE μ nazywa się UO.

Znaczny wpływ na wartość UO posiadają: stopień domieszkowania i temperatura.

Tunelowanie Fowlera i Norgheima

Występuje w tranzystorach o bardzo cienkiej izolacji bramkowej. Prąd może przepływać z bramki do źródła lub drenu i opisany jest wzorem empirycznym

$$I_{FN} = CWLE_{ox}^2 \exp(-E_0 / E_{ox})$$

gdzie $E_{ox} \approx \frac{V_{gs}}{t_{ox}}$ - natężenie pola elektrycznego wzdłuż tlenku bramki, E_0 , C - stałe.

Ten efekt ogranicza grubość tlenku bramki. Wykorzystywany w układach programowalnych.

Przebicie drenu

Duże napięcie dren - źródło może powodować przebicie.
Nie występuje w układach niskonapięciowych.

Gorące elektrony (jonizacja uderzeniowa)

Ze zmniejszaniem się powierzchni i długości bramki L pole elektryczne pomiędzy bramką, a drenem wzrasta. Pojawia się możliwość tunelowego przeskoku elektronów z obszaru wysokoenergetycznego („gorących elektronów”). Zderzenia z drenem powodują wyzwolenie jonów dodatnich i przepływ prądu drenu na skutek uderzeniowej jonizacji. W konsekwencji może wystąpić uszkodzenie tranzystora.

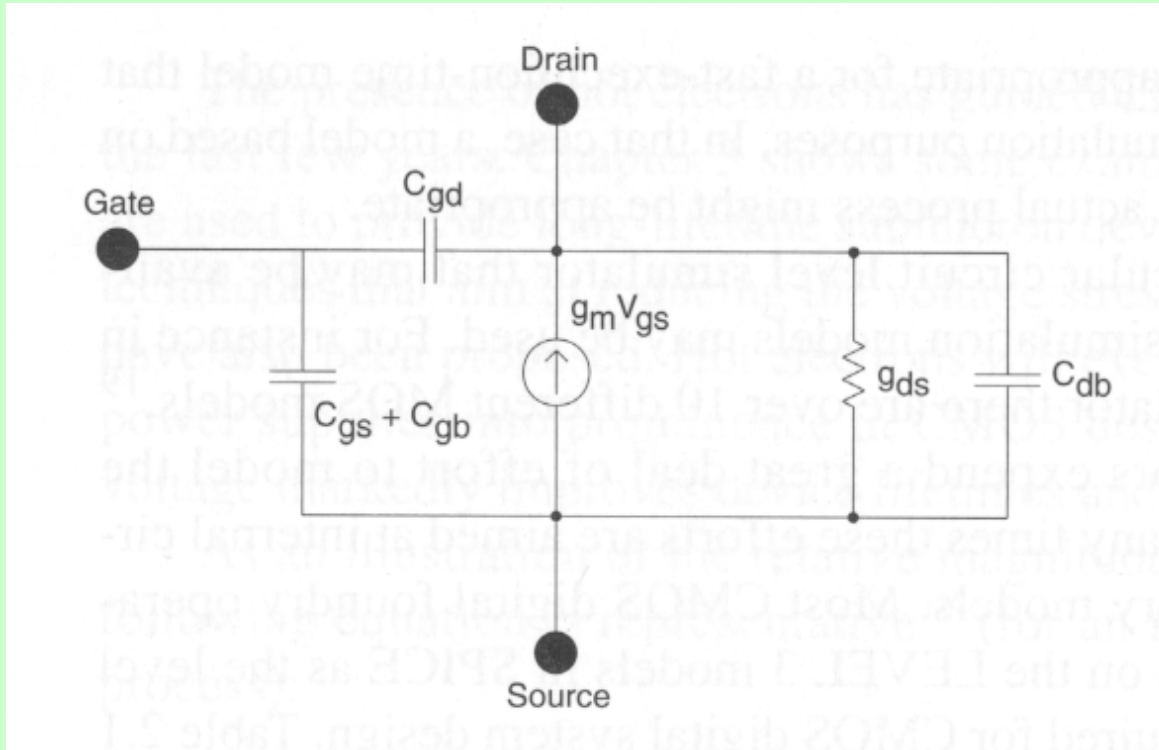
Przykładowe parametry modelu tranzystora w programie SPICE

Table 2.1 SPICE DC Parameters

Parameter	nMOS	pMOS	Units	Description
VTO	0.7	0.7	volt	Threshold voltage
KP	8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	A/V^2	Transconductance coefficient
GAMMA	.4	.5	$V^{0.5}$	Bulk threshold parameter
PHI	.37	.36	volt	Surface potential at strong inversion
LAMBDA	.01	.01	$volt^{-1}$	Channel length modulation parameter
LD	0.1×10^{-6}	0.1×10^{-6}	meter	Lateral diffusion
TOX	2×10^{-8}	2×10^{-8}	meter	Oxide thickness
NSUB	2×10^{16}	4×10^{16}	$1/cm^3$	Substrate doping density

MODELE TRANZYSTORA MOS

Model małosygnałowy AC ($V_{sb}=0$)



Na podstawie równań Shockley'a wylicza się parametry modelu:

Dla obszaru liniowego

$$g_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t) - 2V_{ds}]$$

Jeśli V_{ds} zmierza do zera, to

$$g_{ds} = \beta (V_{gs} - V_t)$$

Transkonduktancja

$$g_m = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}}, V_{ds} = const.$$

Dla obszaru liniowego $g_{m(linear)} = \beta V_{ds}$

Dla obszaru nasycenia $g_{m(sat)} = \beta (V_{gs} - V_t)$