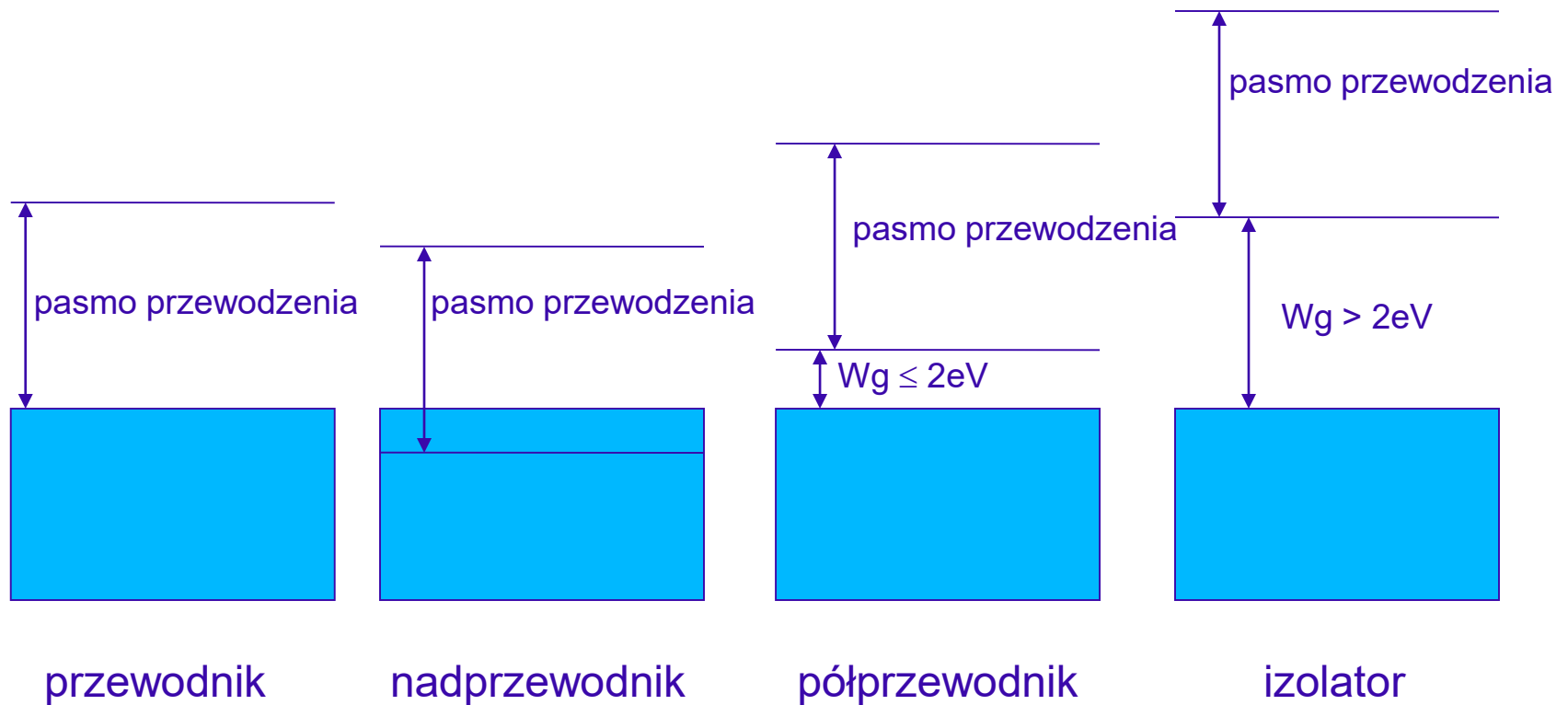


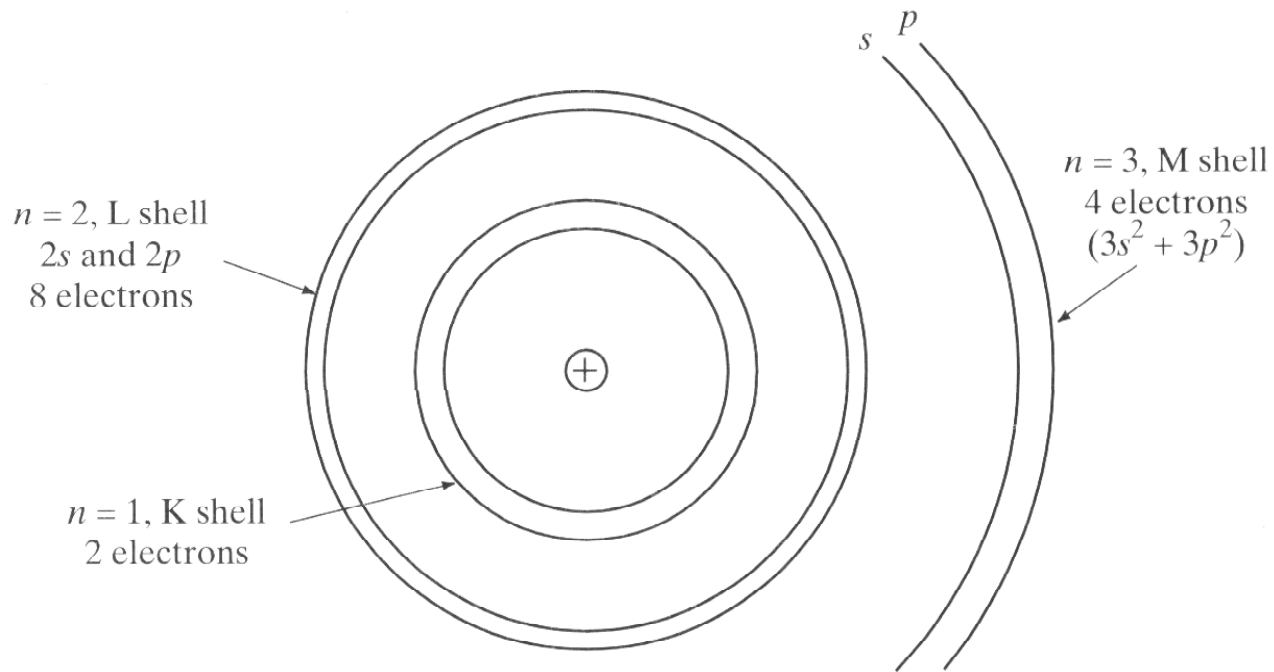
Materiały używane w elektronice

Typ	Rezystywność [Ωm]
Izolatory (dielektryki)	ponad 10^5
półprzewodniki	$10^{-5} - 10^5$
przewodniki	poniżej 10^{-5}
nadprzewodniki (poniżej 20K)	poniżej 10^{-15}

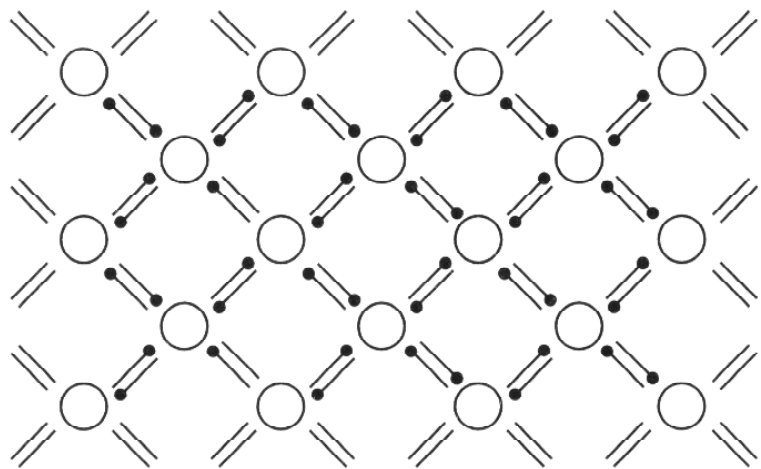
Model pasm energetycznych



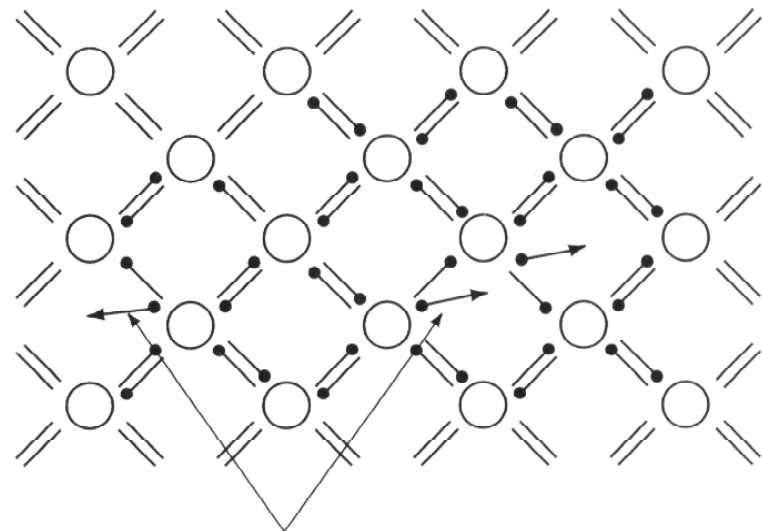
$nieb$ – pasmo walencyjne, Wg – pasmo zabronione



model atomu krzemu

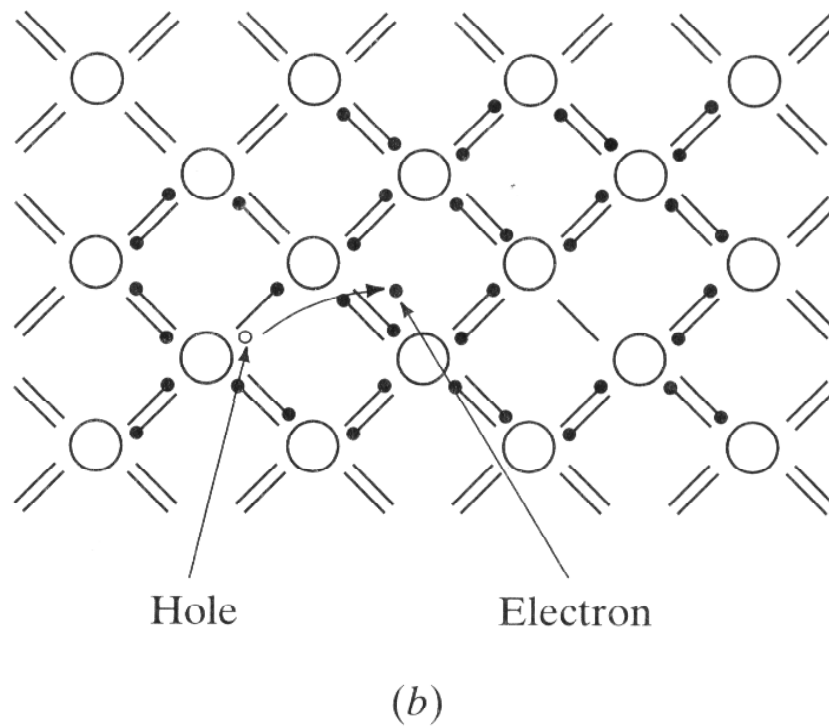
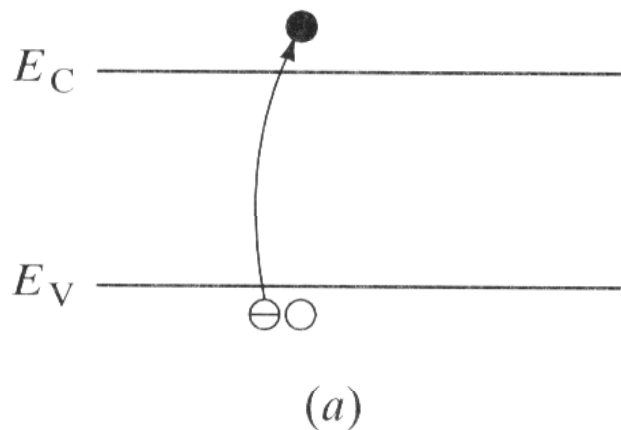


(a)

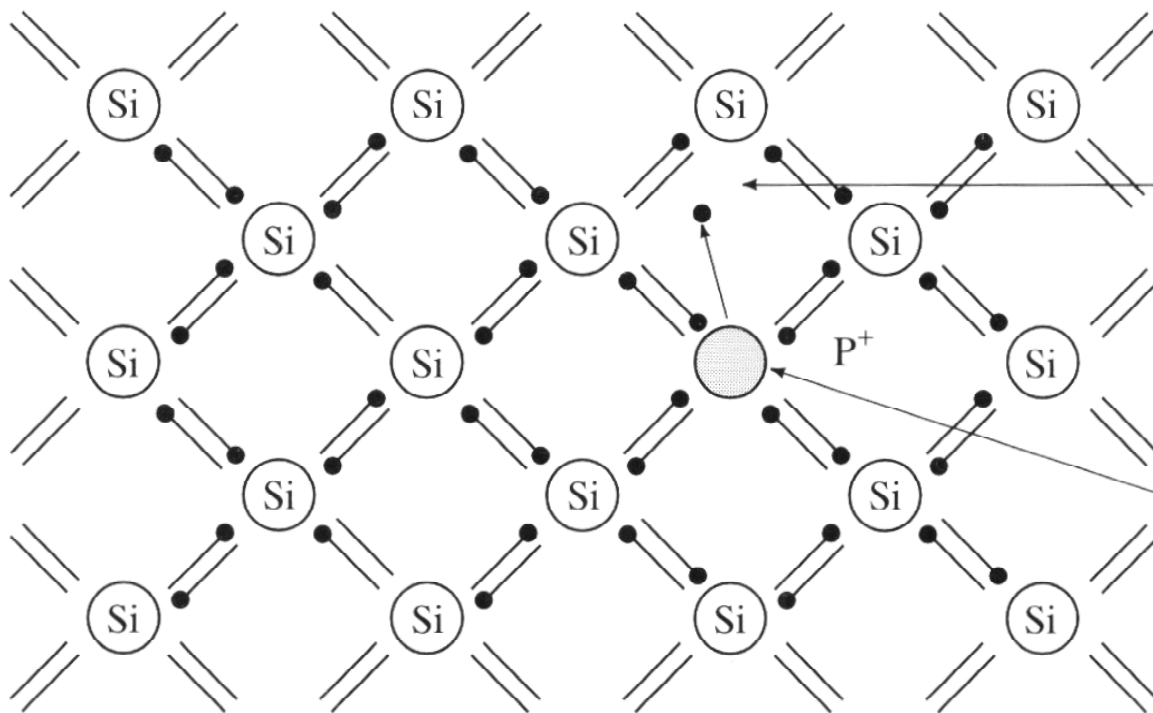


(b)

Wiązania kowalencyjne między atomami półprzewodnika w niskiej temperaturze (a) i w temperaturze pokojowej (b)



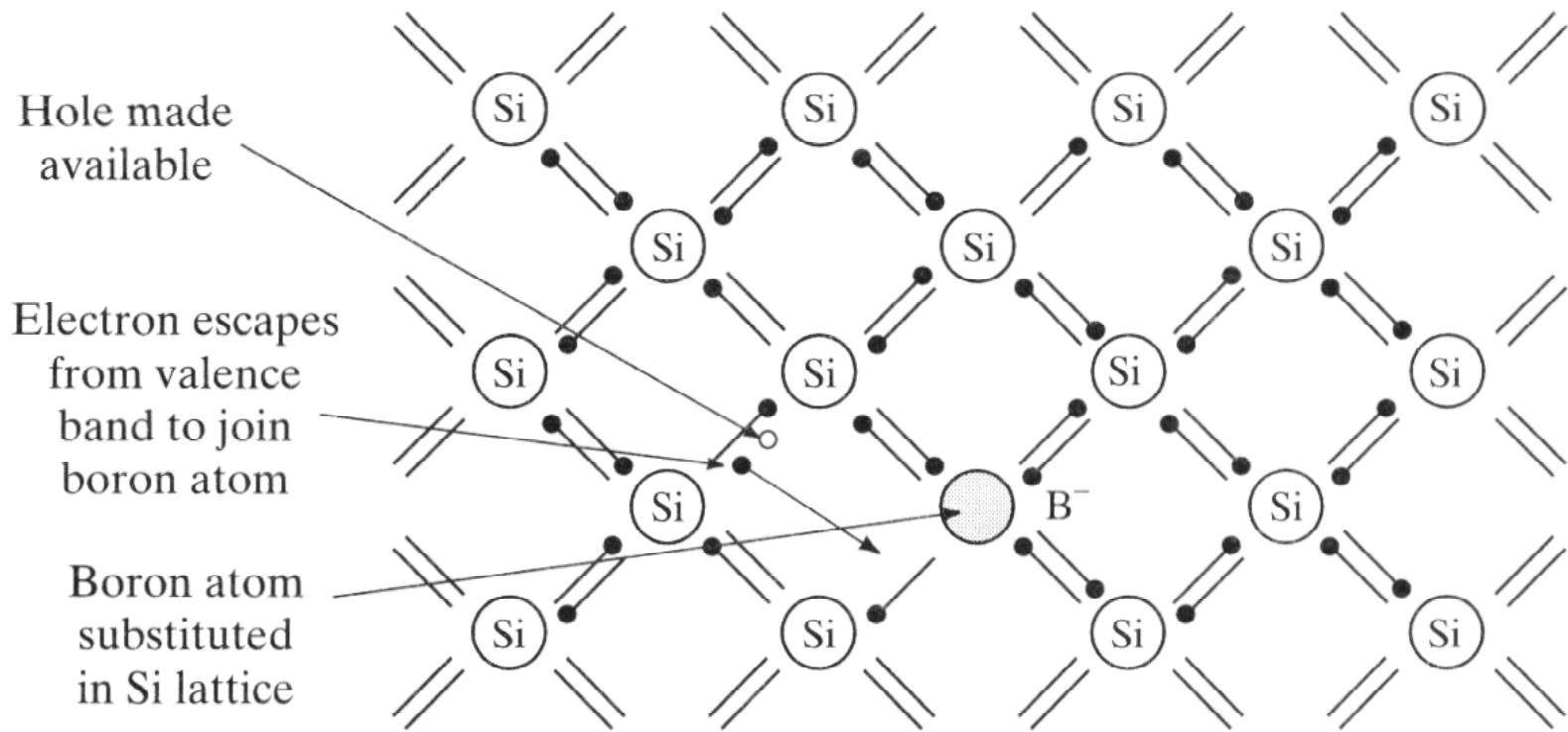
Generacja pary dziura/elektron: model pasmowy (a)
i kowalencyjny (b)
(E_V – pasmo walencyjne, E_C – pasmo przewodzenia)



An escaping electron from a phosphorus atom in a forbidden band to the conduction band in order to become free

Phosphorus atom becomes positive ion replacing Si atom

Dodatek atomu donoru z 5 elektronami (tu: fosfor) generuje dodatkowy swobodny elektron

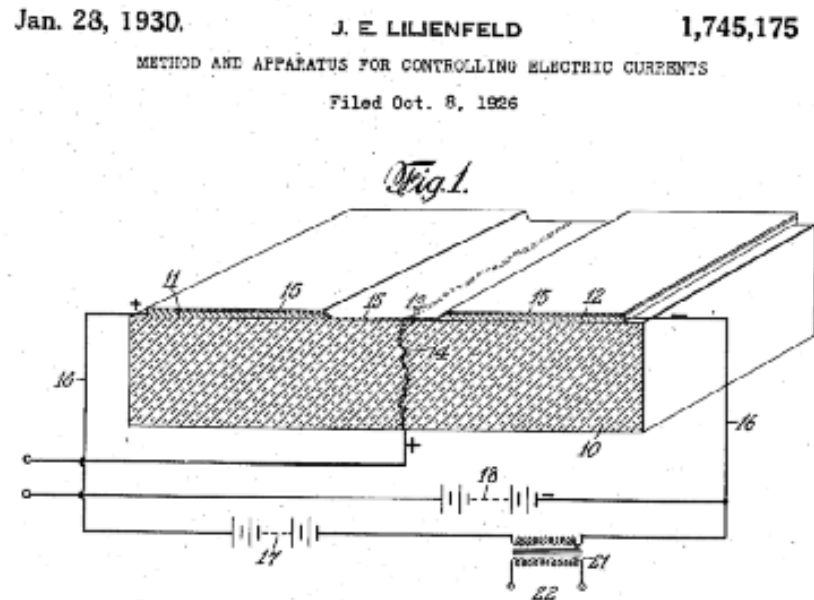


Dla skompletowania wiązań kowalencyjnych atom boru (akceptor) wiąże elektron, co powoduje powstanie dziury.

Tranzystor MOS

transfer resistor

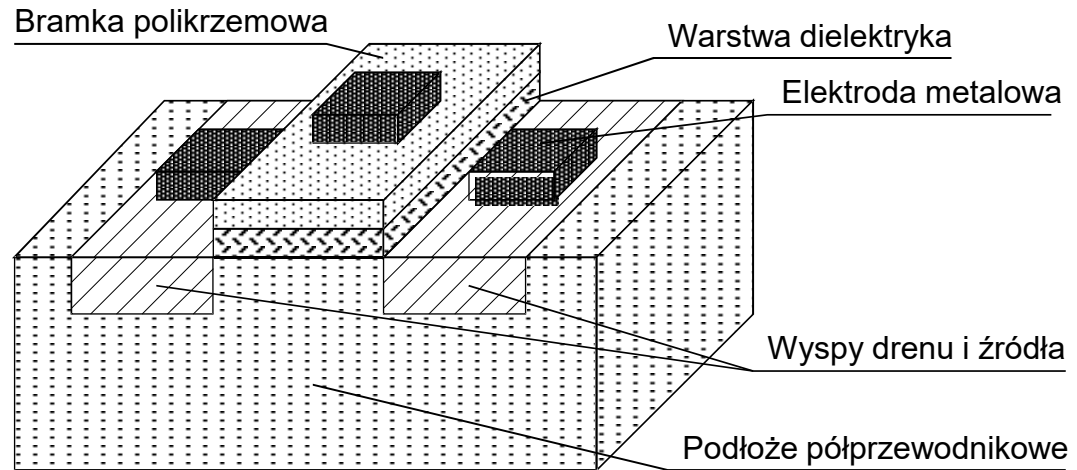
- 1930 J. Lilienfeld złożył patent dotyczący działania przyrządu polowego w USA
- 1935 O. Heil - podobny patent w Wielkiej Brytanii
- 1960 praktyczne wykonanie tranzystora polowego



Tranzystor MOS

ang. Metal Oxide Semiconductor

Tranzystory polowe: MOSFET, MIS, IGFET

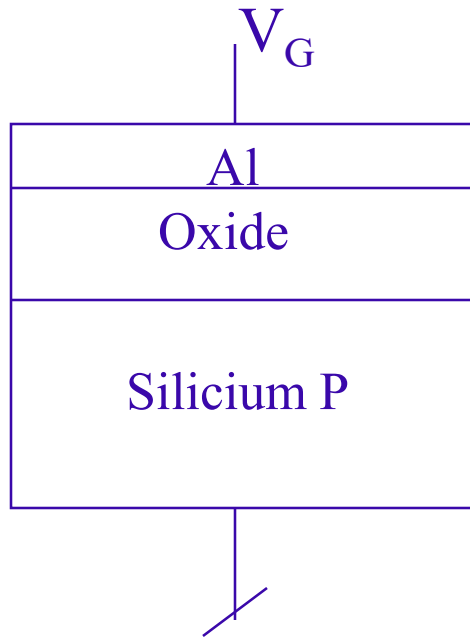


ρ podłoża $0.01 - 0.1 \Omega\text{m}$

koncentracja n^+ $10^{24} - 10^{26} \text{ m}^{-3}$

t_{ox} $10-100 \text{ nm}$

Kondensator MOS

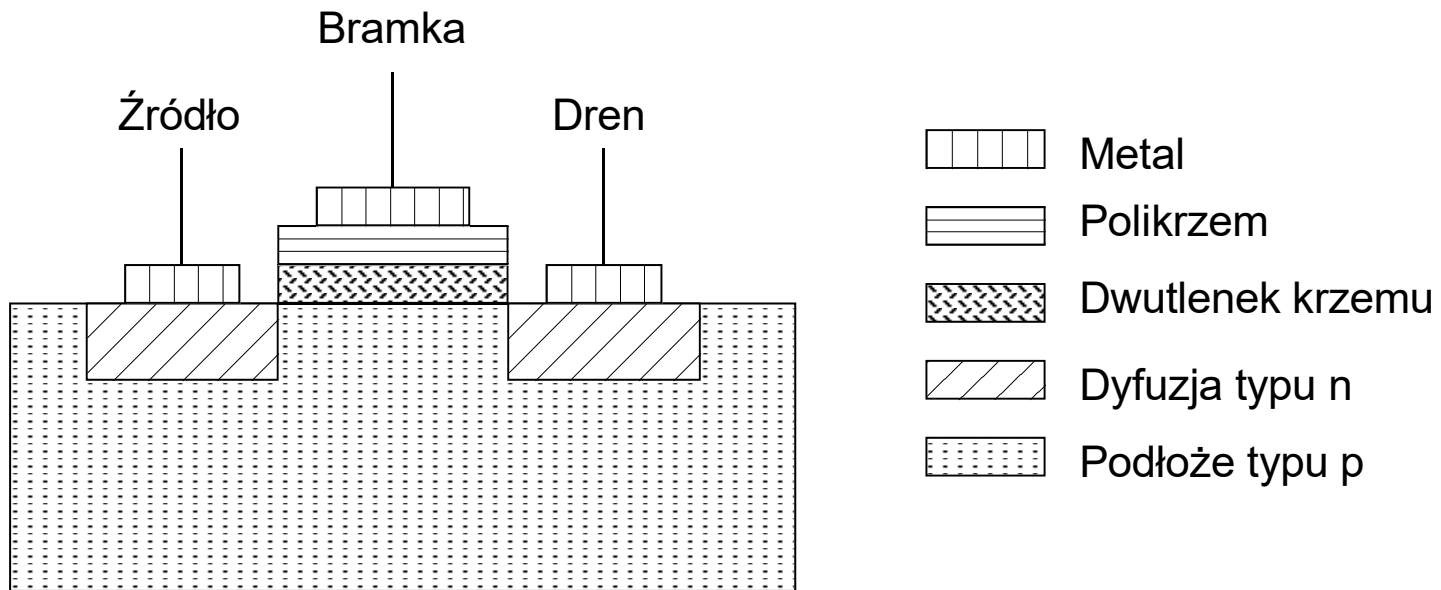


Akumulacja $V_G < 0$

Zubożenie $V_G > 0$

Inwersja $V_G \gg 0$

Przekrój tranzystora nMOS

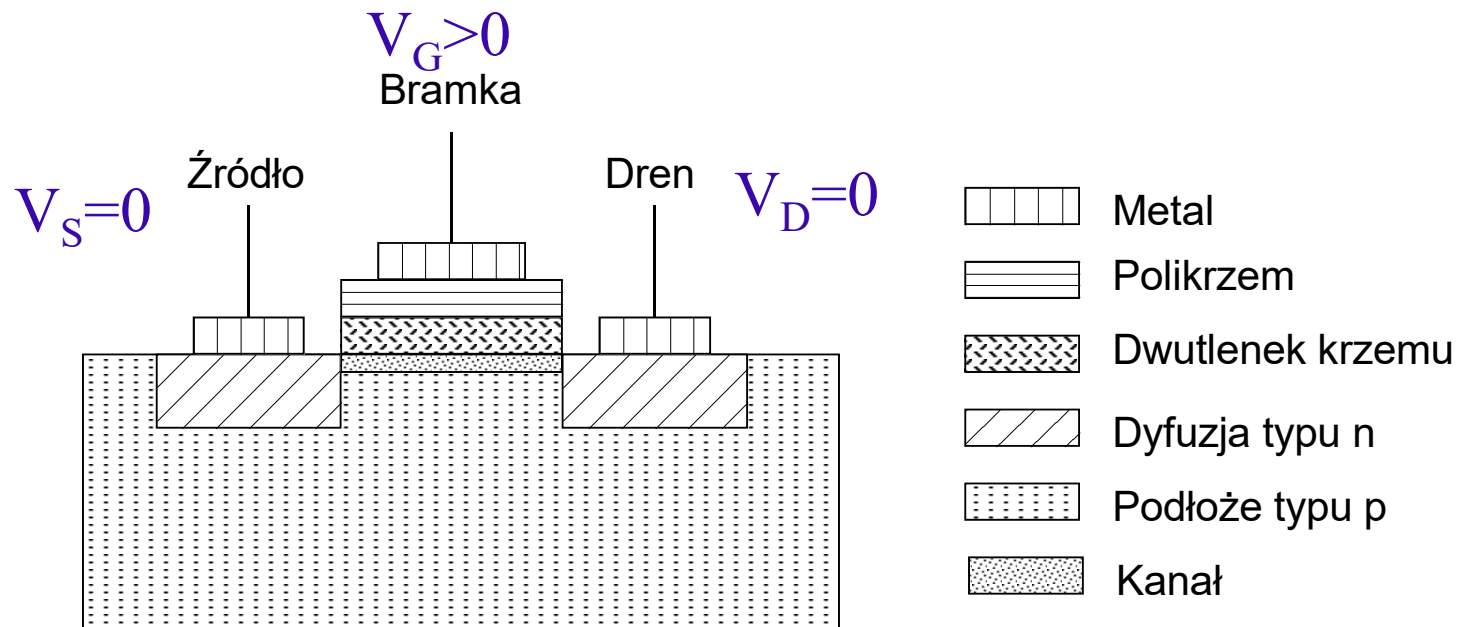


Podział tranzystorów MOS

- Z kanałem typu n
- Z kanałem typu p

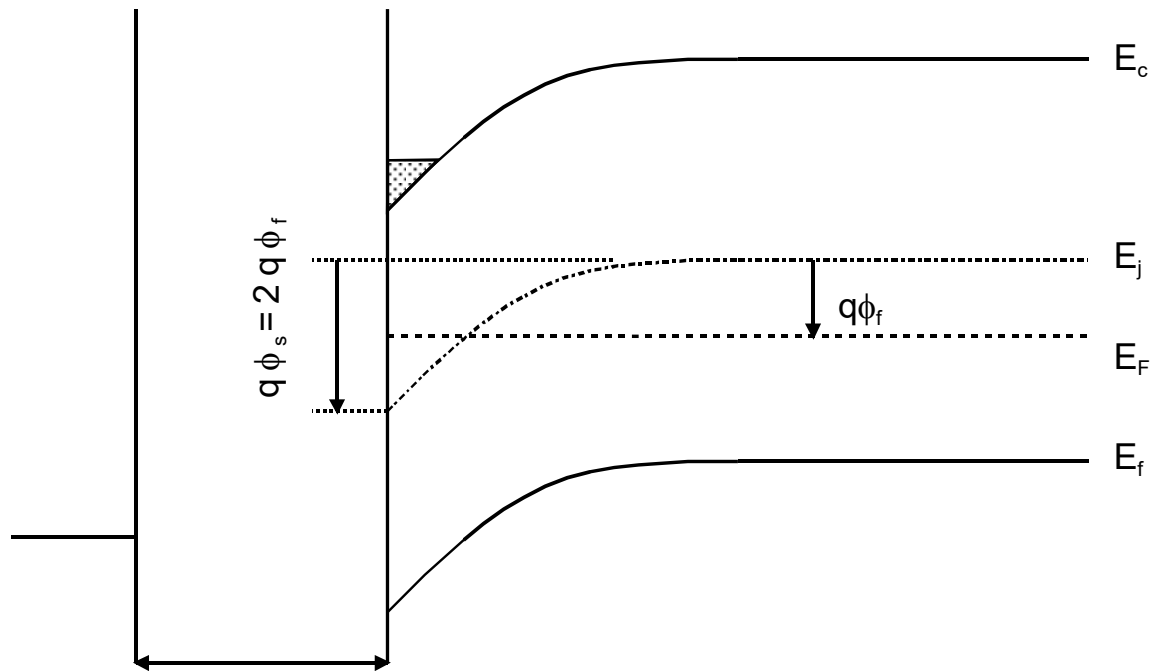
- Z kanałem zubożanym (wbudowanym) *ang. depletion*
- Z kanałem wzbogacającym (indukowanym) *ang. enhancement*

Tranzystor nMOS ze spolaryzowaną bramką

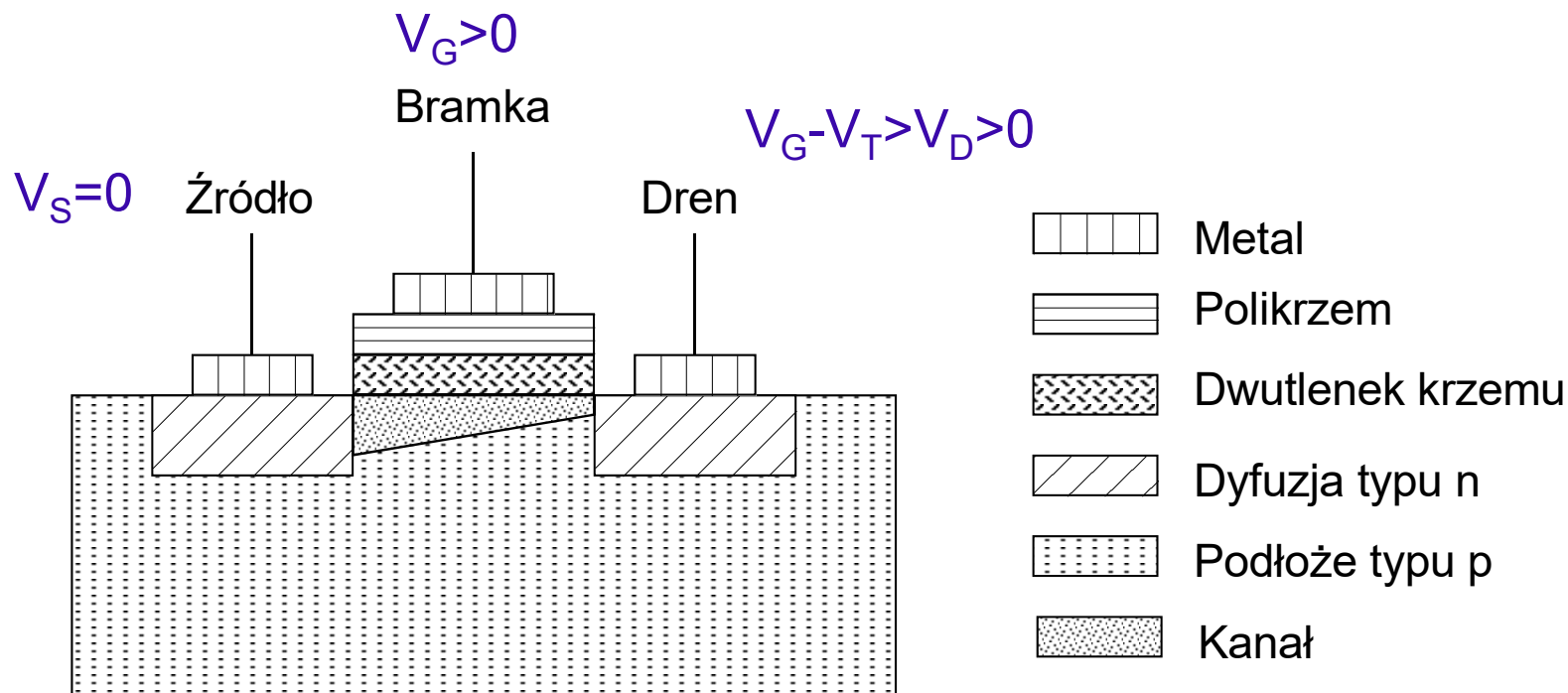


Początek silnej inwersji

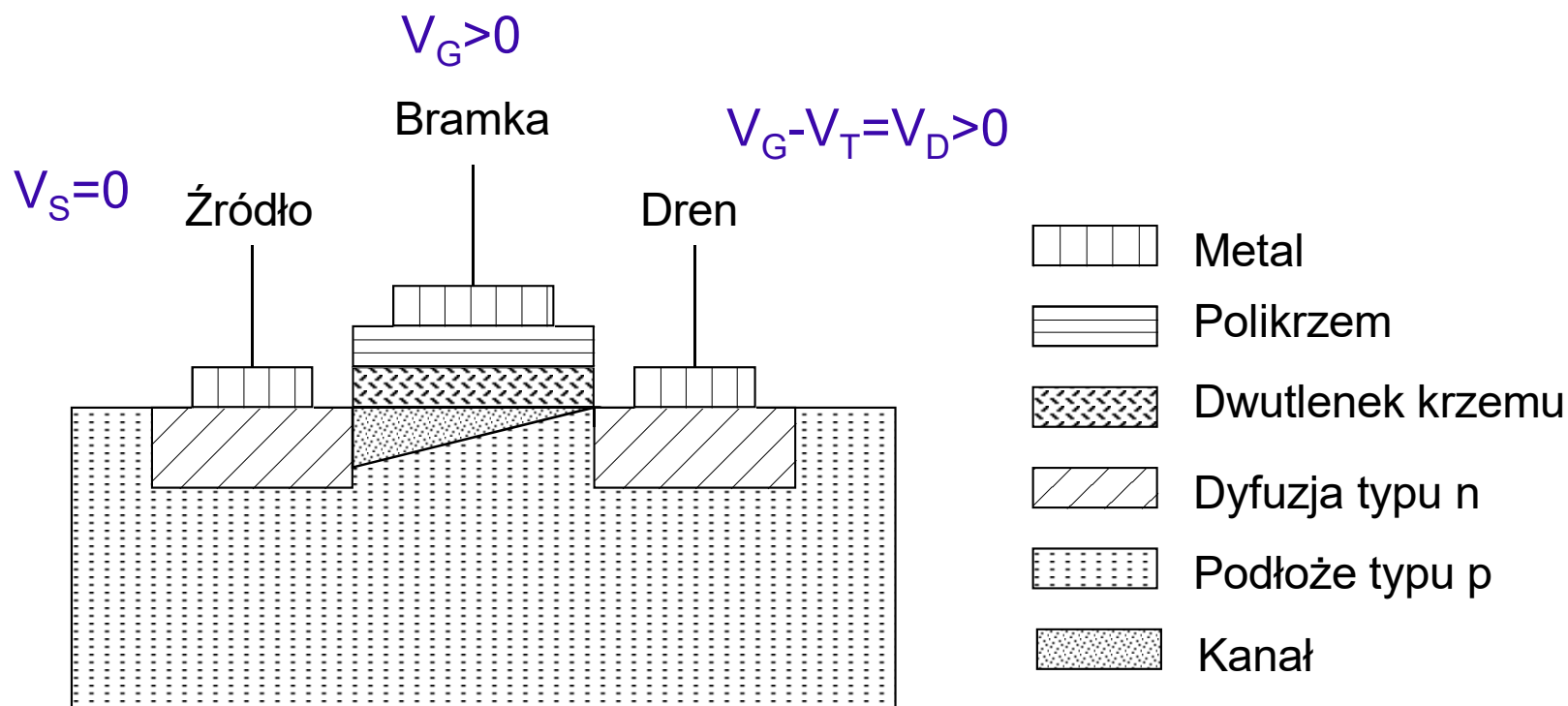
$$V_G = V_T$$



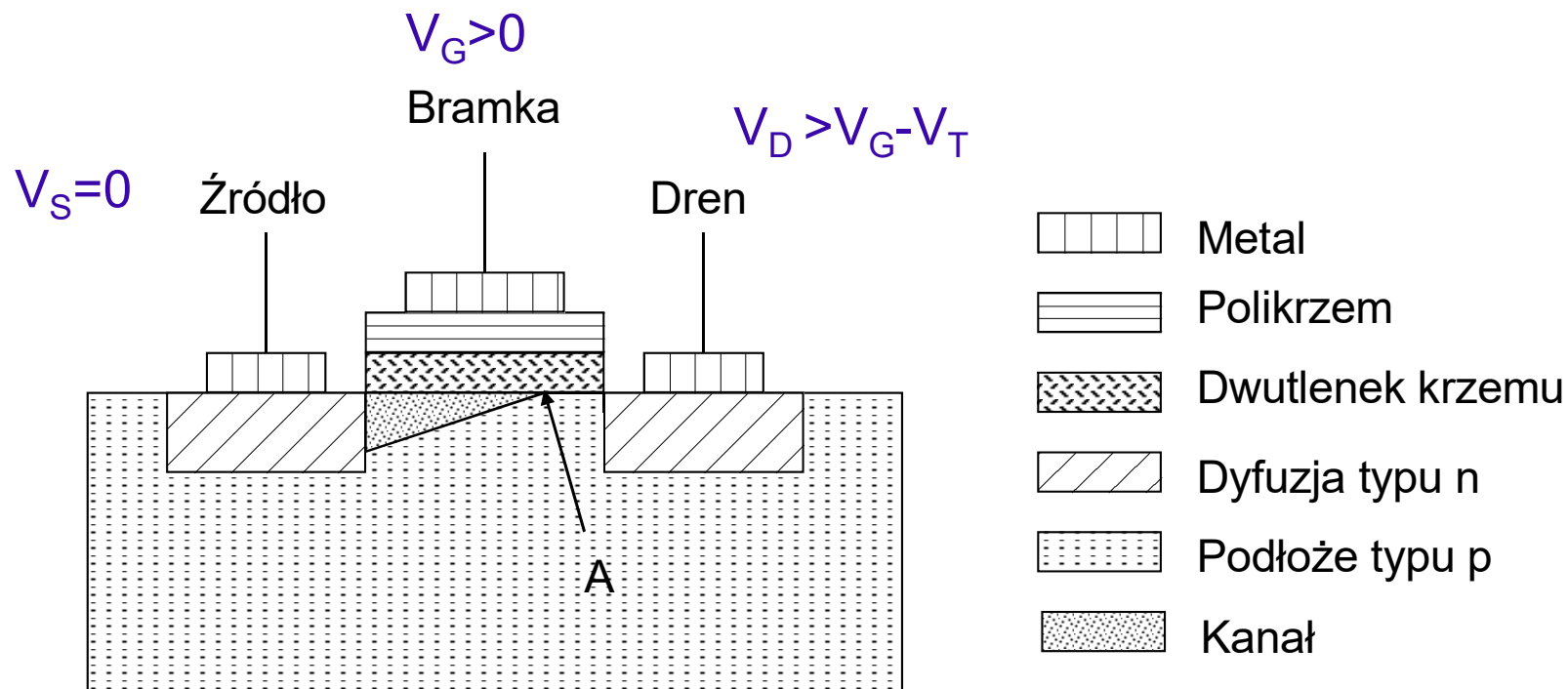
Przewodzący tranzystor nMOS



Przewodzący tranzystor nMOS na granicy nasycenia

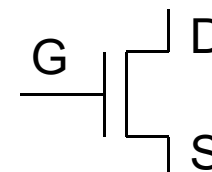
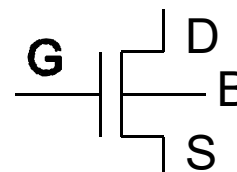
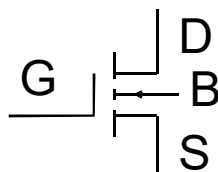


Nasycony tranzystor nMOS

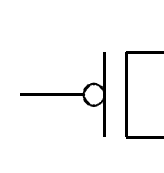
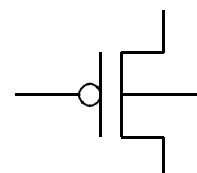
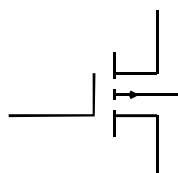


Symbole tranzystorów MOS

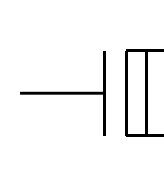
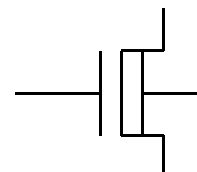
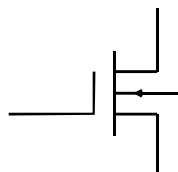
Kanał wzbogacający typu n



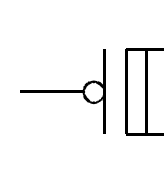
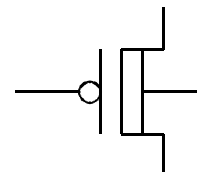
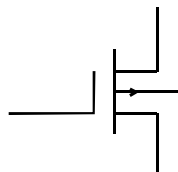
Kanał wzbogacający typu p



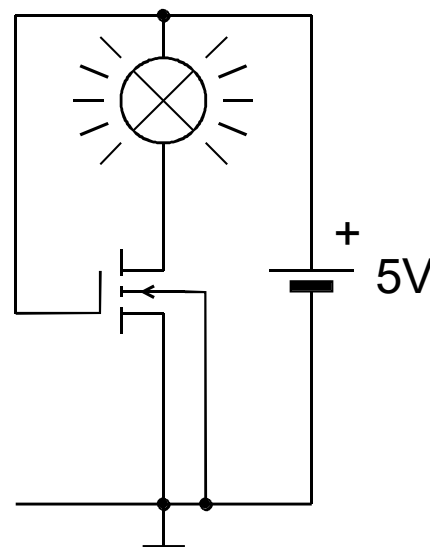
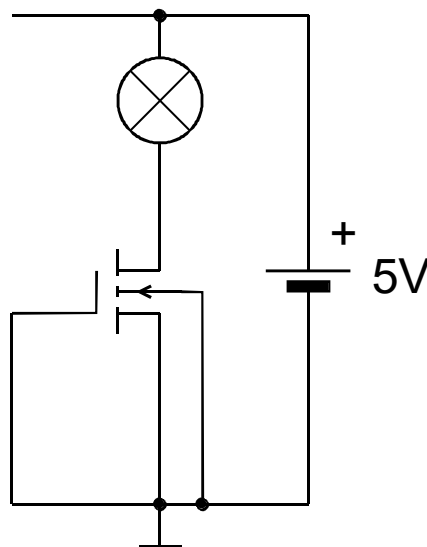
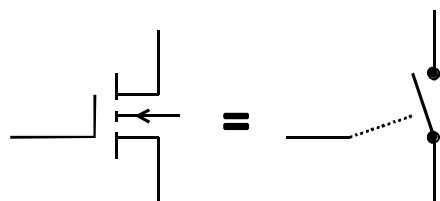
Kanał zubożający typu n



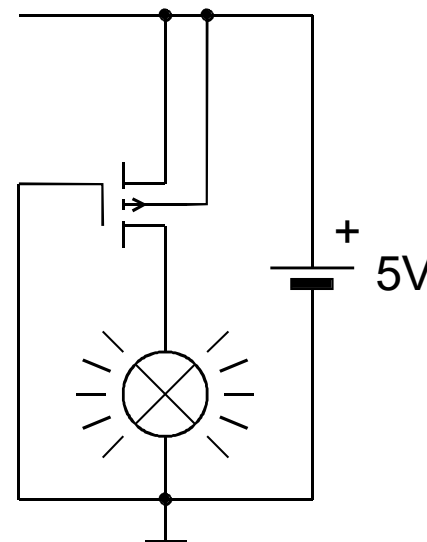
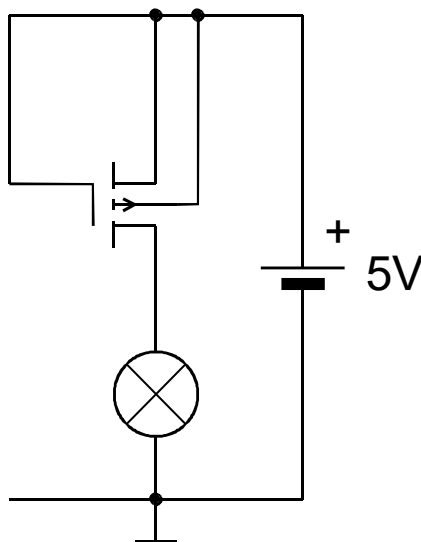
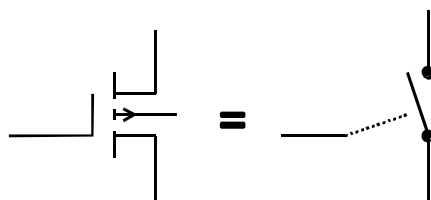
Kanał zubożający typu p



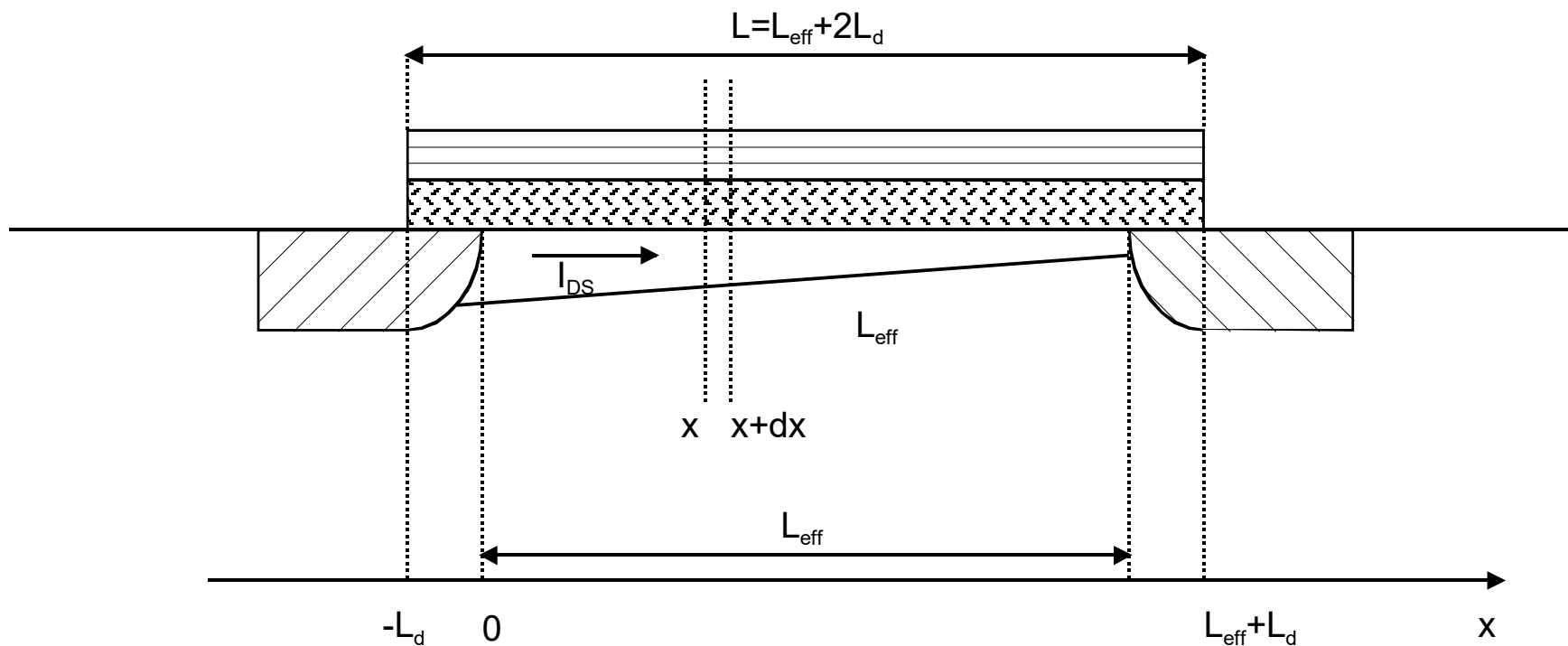
Tranzystor nMOS jako przełącznik



Tranzystor pMOS jako przełącznik



Tranzystor MOS w zakresie liniowym



$$I_{DS} = \mu \frac{W_{eff}}{L_{eff}} C_{ox} \int_0^{U_{DS}} (U_{GS} - V_{T0} - V(x)) dV$$

$$I_{DS} = \mu \frac{W_{eff}}{L_{eff}} C_{ox} \left((U_{GS} - V_{T0}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right)$$

$$I_{DS} = k_p \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \left((U_{GS} - V_{T0}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right) \quad \text{Nienasycenie}$$

$$I_{DS} = \frac{k_p}{2} \frac{W_{eff}}{L_{eff}} (U_{GS} - V_{T0})^2 \quad \text{Nasycenie}$$

$$\beta = \mu \epsilon / t_{ox} (W/L) \quad \text{Transistor gain factor}$$

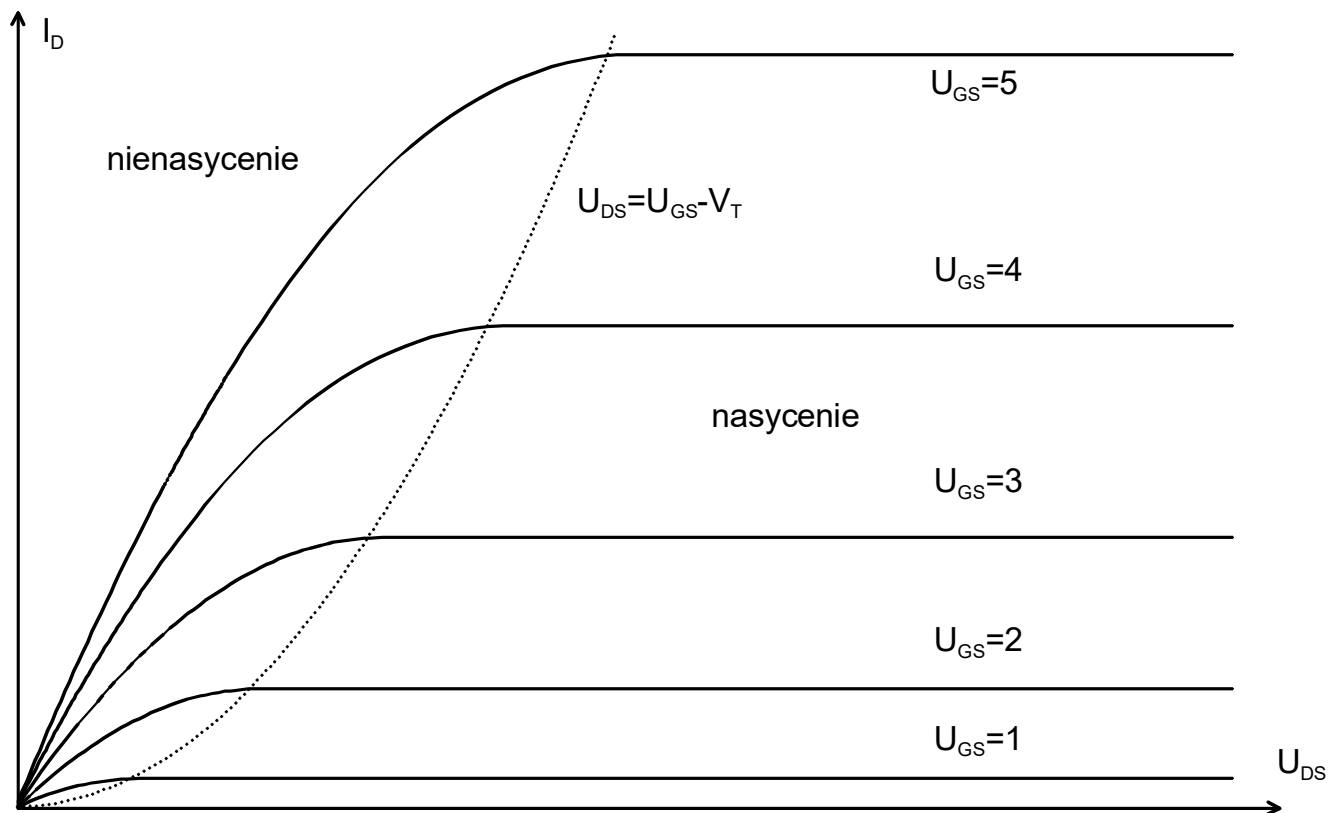
Przykład

Dany jest tranzystor o następujących parametrach

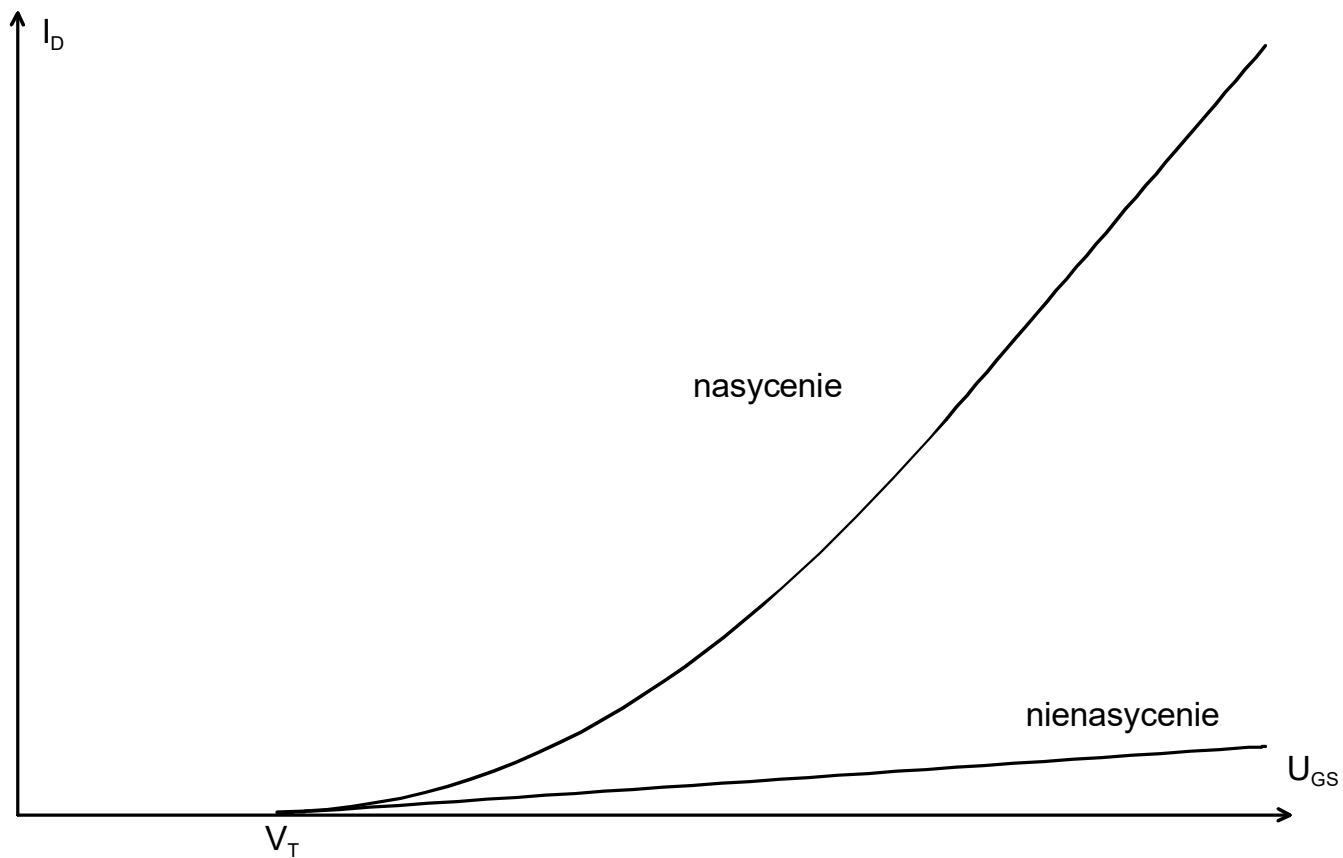
$$N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad t_{ox} = 10 \text{ nm} \quad U_{FB} = -1.04 \text{ V}$$

Obliczyć napięcie progowe tego tranzystora

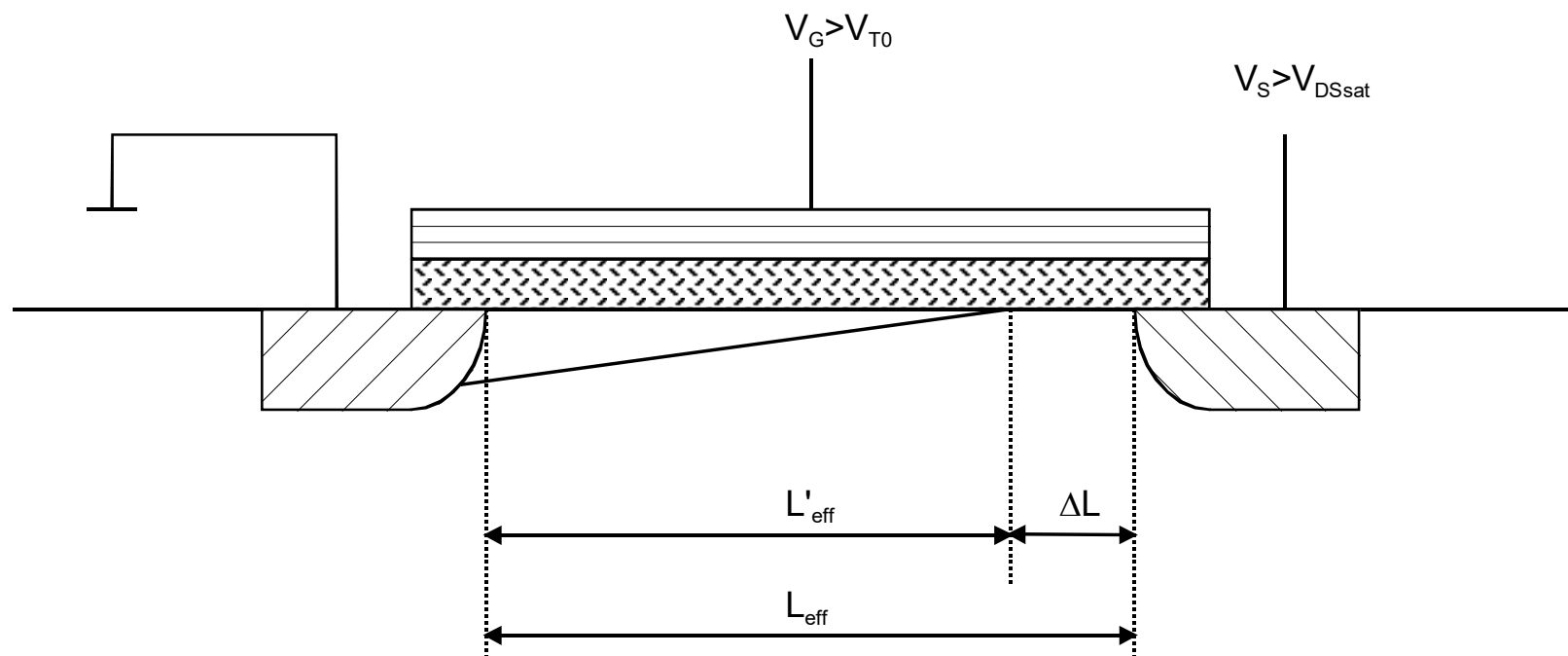
Charakterystyki wyjściowe MOS



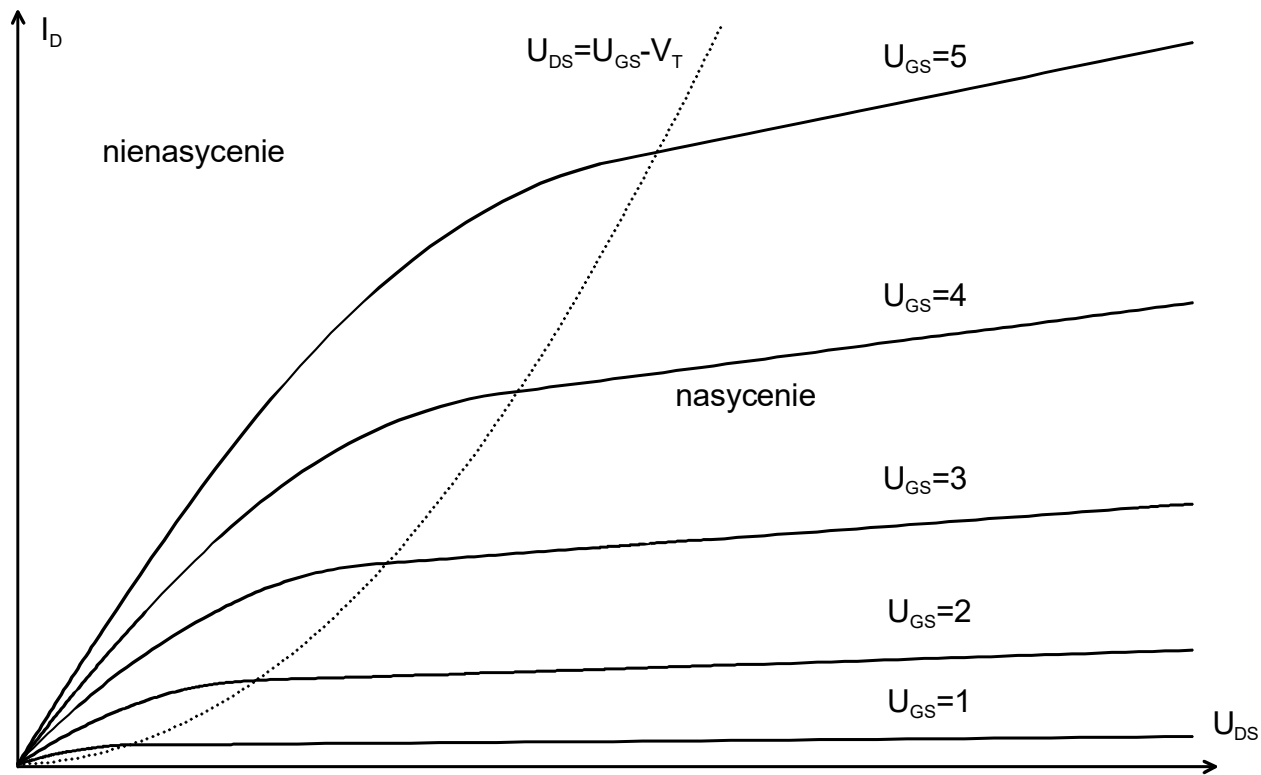
Charakterystyki przejściowe MOS



Modulacja długości kanału



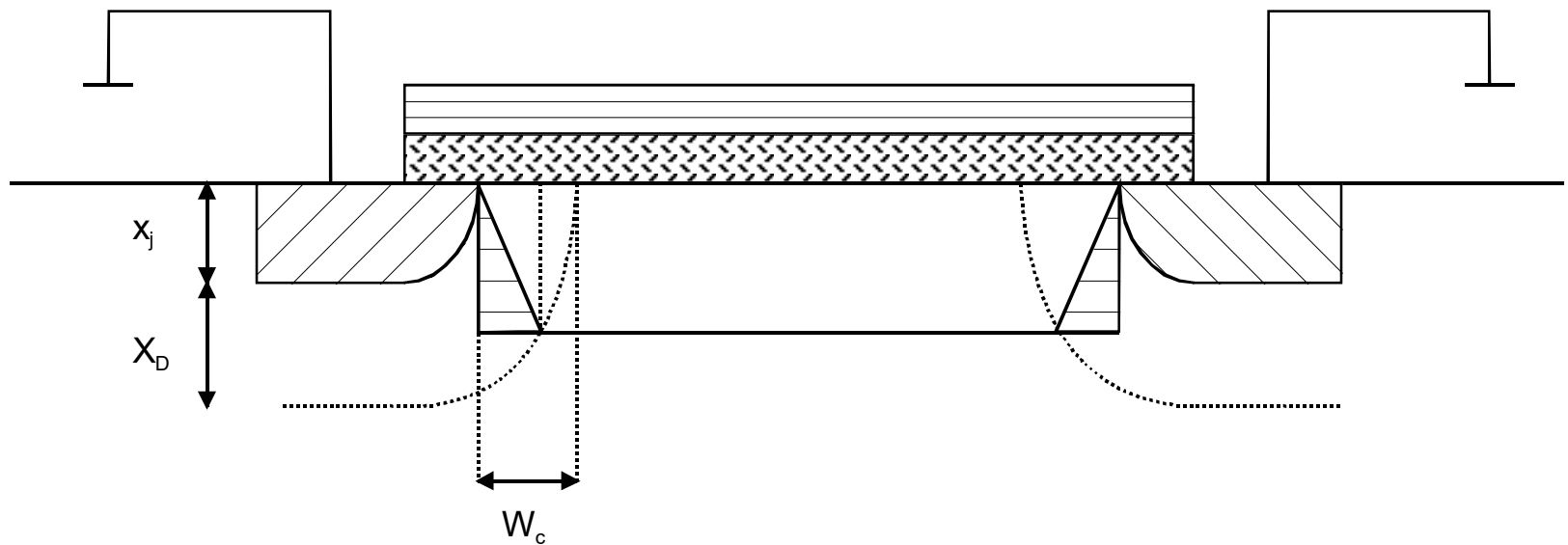
Model LEVEL1



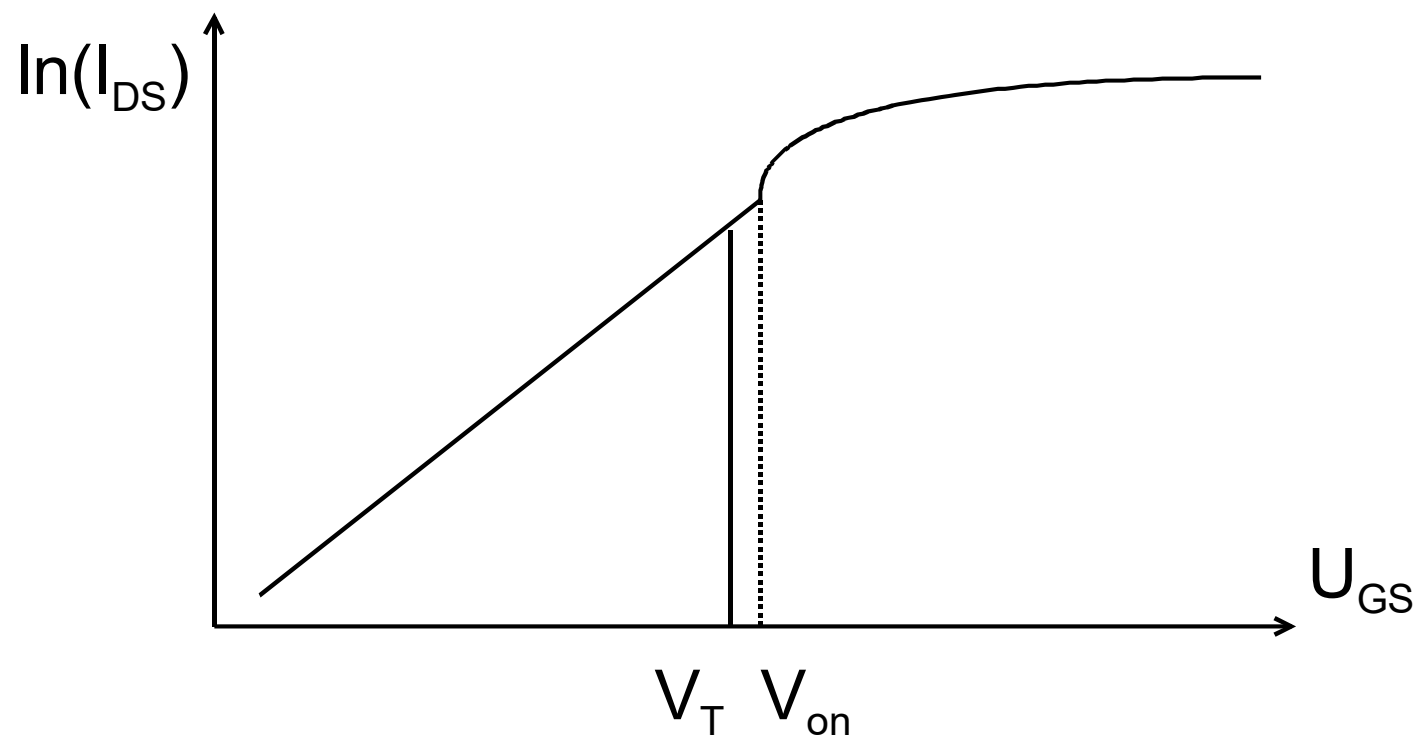
Co nowego w modelu LEVEL3

- Zmodyfikowany model napięcia progowego, z uwzględnieniem obniżania bariery podłoże-kanal pod wpływem wzrostu potencjału drenu (ang. DIBL - Drain Induced Barrier Lowering).
- Model ruchliwości nośników zależnej od pola wzdłużnego i poprzecznego.
- Ulepszony model modulacji długości kanału i napięcia nasycenia.
- Uwzględnienie podprogowego zakresu pracy tranzystora (słaba inwersja).

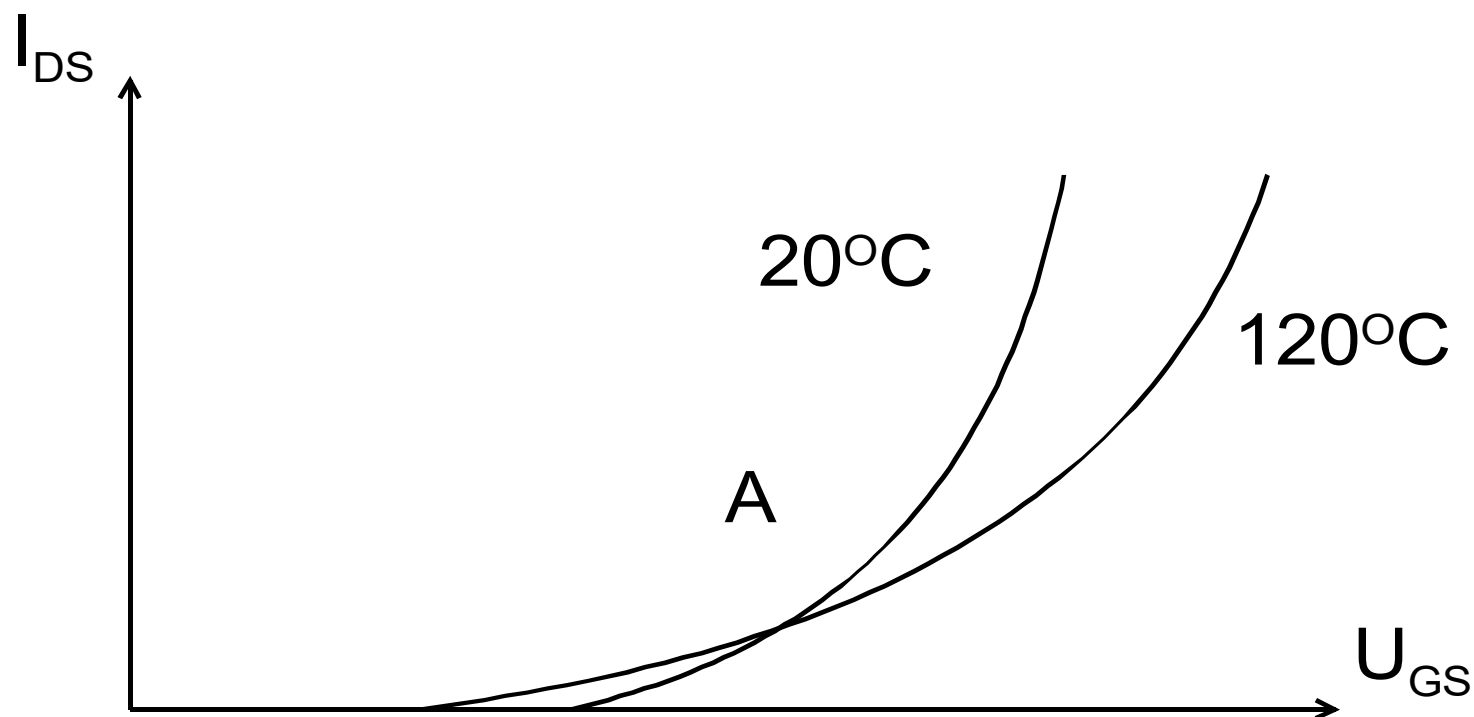
Aproksymacja ładunku przy pomocy trapezu



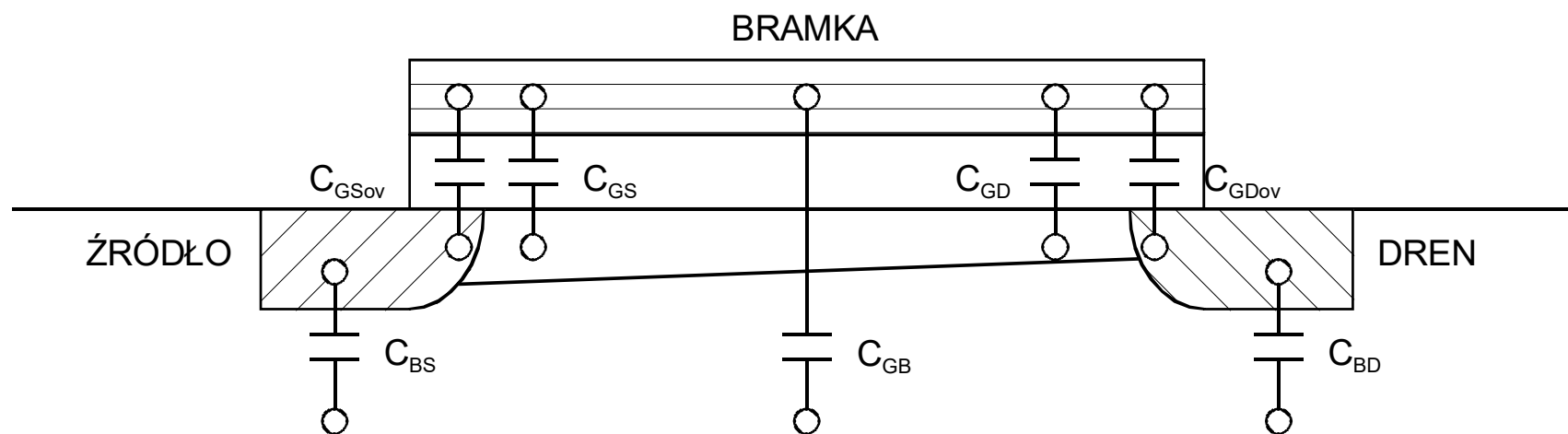
Zakres podprogowy



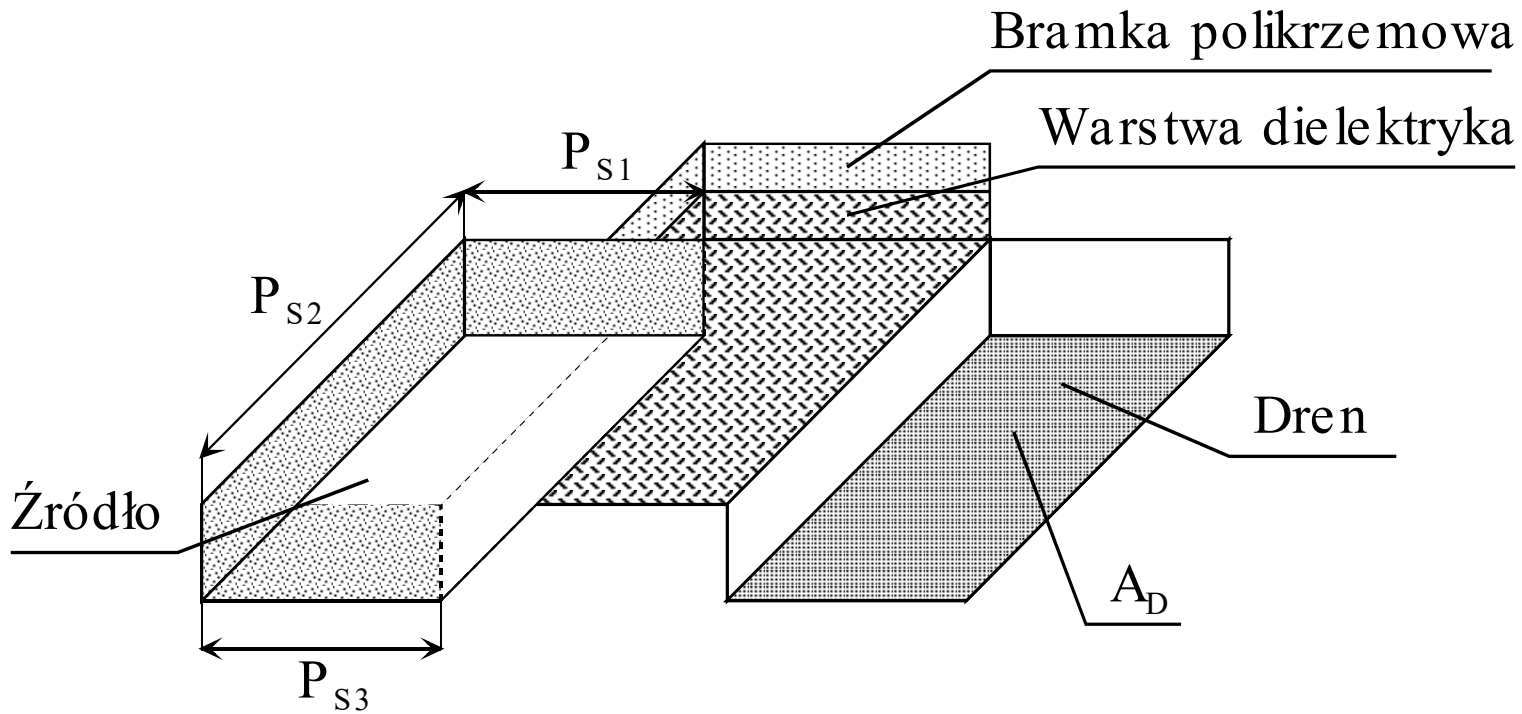
Wpływ temperatury na charakterystyki MOS



Pojemności tranzystora MOS



Pojemności tranzystora MOS



Pojemności tranzystora MOS

$$C_{BD} = \frac{C_j A_D}{\left(1 - \frac{U_{BD}}{\phi_j}\right)^{M_j}} + \frac{C_{jsw} P_D}{\left(1 - \frac{U_{BD}}{\phi_j}\right)^{M_{jsw}}}$$

$$C_{BS} = \frac{C_j A_S}{\left(1 - \frac{U_{BS}}{\phi_j}\right)^{M_j}} + \frac{C_{jsw} P_S}{\left(1 - \frac{U_{BS}}{\phi_j}\right)^{M_{jsw}}}$$

$$C_{GDov} = C_{GDO} W_{eff}$$

$$C_{GSov} = C_{GSO} W_{eff}$$

$$C_{GSO} = C_{GDO} = C_{ox} L_d$$

Akumulacja

$$C_{GB} = C_{ox} W_{eff} L_{eff}$$

Zubożenie

$$C_{GB} = \frac{C_{ox} W_{eff} L_{eff}}{\sqrt{1 + 4 \left(\frac{U_{GB} - U_{FB}}{\gamma^2} \right)}}$$

Pojemności tranzystora MOS

Zakres liniowy (pojemność $C_{GB} = 0$)

$$C_{GS} = \frac{2}{3} C_{ox} W_{eff} L_{eff} \left(1 - \frac{(U_{GS} - U_T)^2}{(U_{GS} - U_T + U_{GD} - U_T)^2} \right)$$

$$C_{GD} = \frac{2}{3} C_{ox} W_{eff} L_{eff} \left(1 - \frac{(U_{GD} - U_T)^2}{(U_{GS} - U_T + U_{GD} - U_T)^2} \right)$$

dla $U_{GS} \approx U_{GD}$ $C_{GS} \approx C_{GD} \approx \frac{1}{2} C_{ox} W_{eff} L_{eff}$

Zakres nasycenia (pojemność $C_{GD} = 0$)

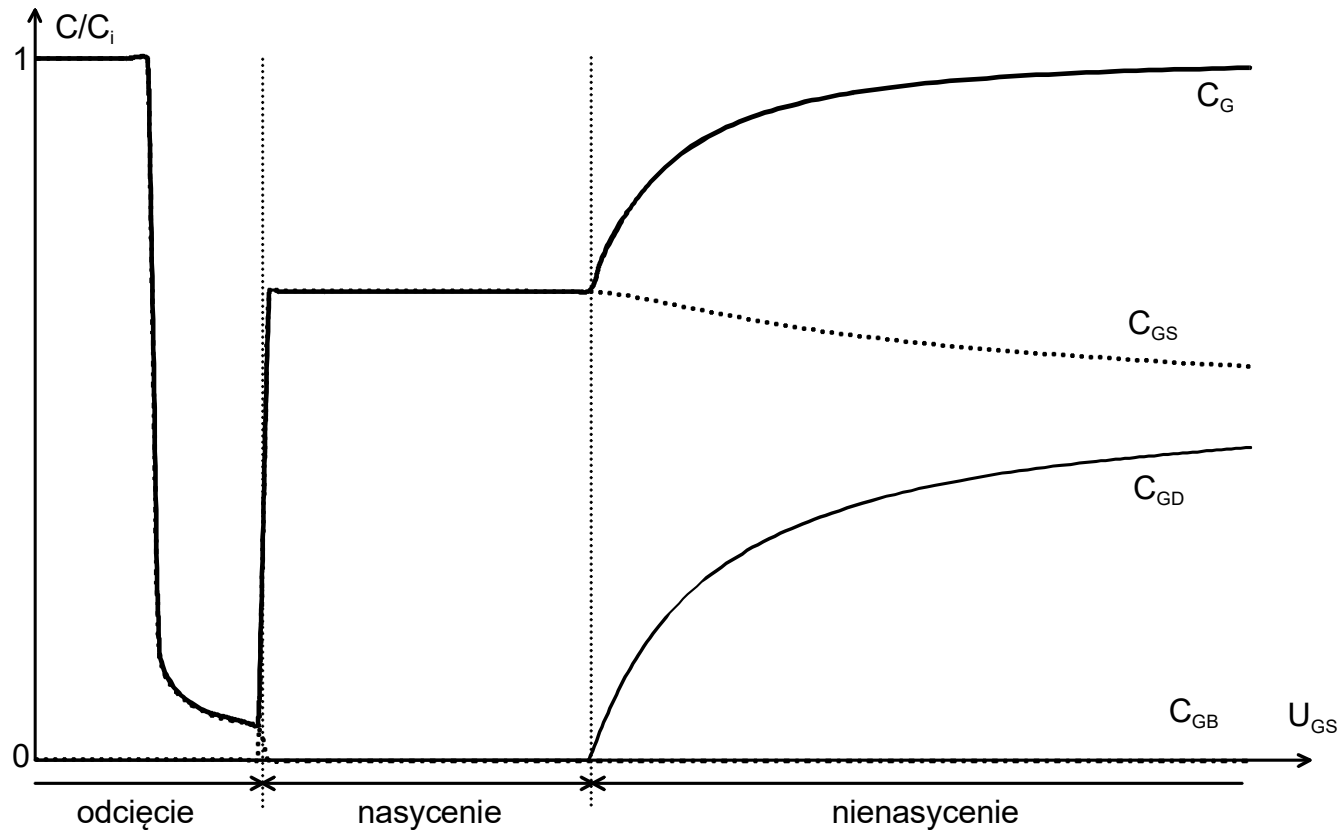
$$C_{GS} = \frac{2}{3} C_{ox} W_{eff} L_{eff}$$

Czego nie uwzględnia model LEVEL3

- Efektu „gorących” nośników, czyli nośników nie będących w równowadze termodynamicznej z siatką krystaliczną.
- Zjawiska przekłucia (punch-through), czyli przebicia wynikającego z zetknięcia rozszerzających się obszarów zubożonych drenu i źródła.
- Nierównomiernego domieszkowania podłoża, wynikającego m.in. z powierzchniowej implantacji jonów w celu regulacji napięcia progowego.

Charakterystyki napięciowe pojemności

$$C_i = C_{ox} L_{eff} W_{eff}$$



Tranzystor MOS - podsumowanie

Zakres pracy	Napięcia na końcówkach
Zakres odcięcia, nieprzewodzenia	$U_{GS} < U_{FB}$
Zakres liniowy, nienasylenia, triodowy	$U_{GS} \geq V_T$ i $U_{DS} < U_{Dsat}$
Zakres nasycenia, pentodowy	$U_{GS} \geq V_T$ i $U_{DS} \geq U_{Dsat}$
Zakres podprogowy, słabej inwersji	$U_{FB} \leq U_{GS} < V_T$

