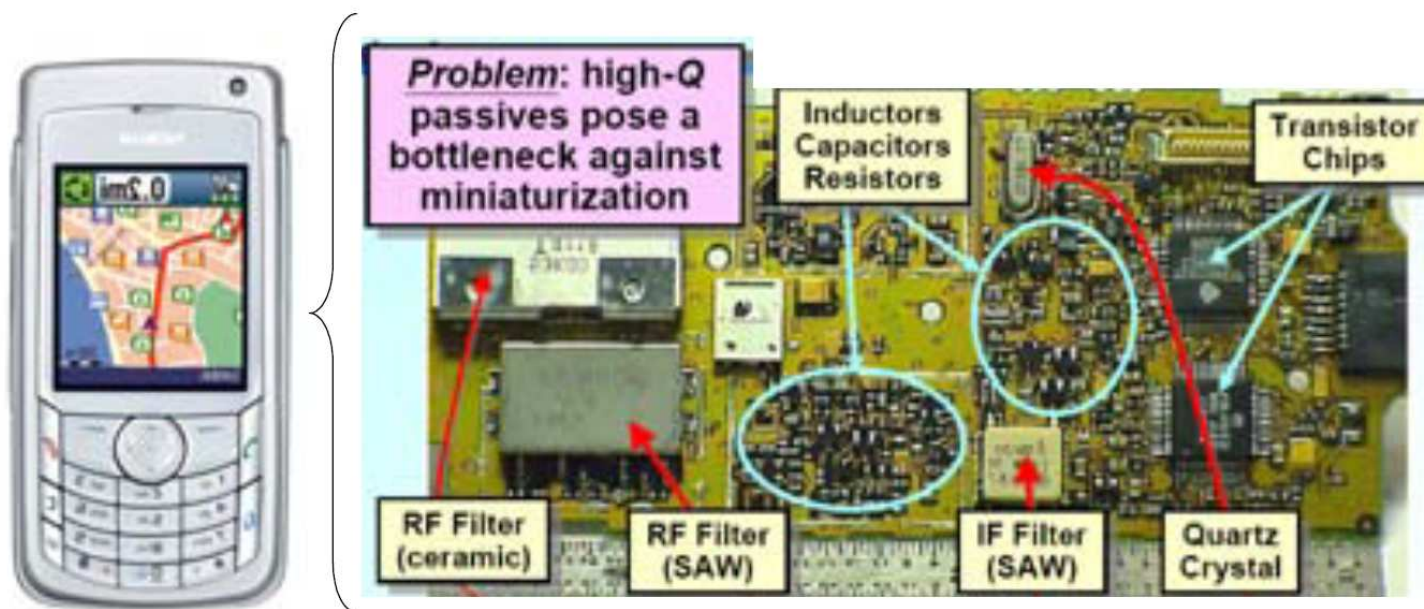


PODSTAWOWE ELEMENTY ELEKTRONICZNE i ELEKTRO-MECHANICZNE

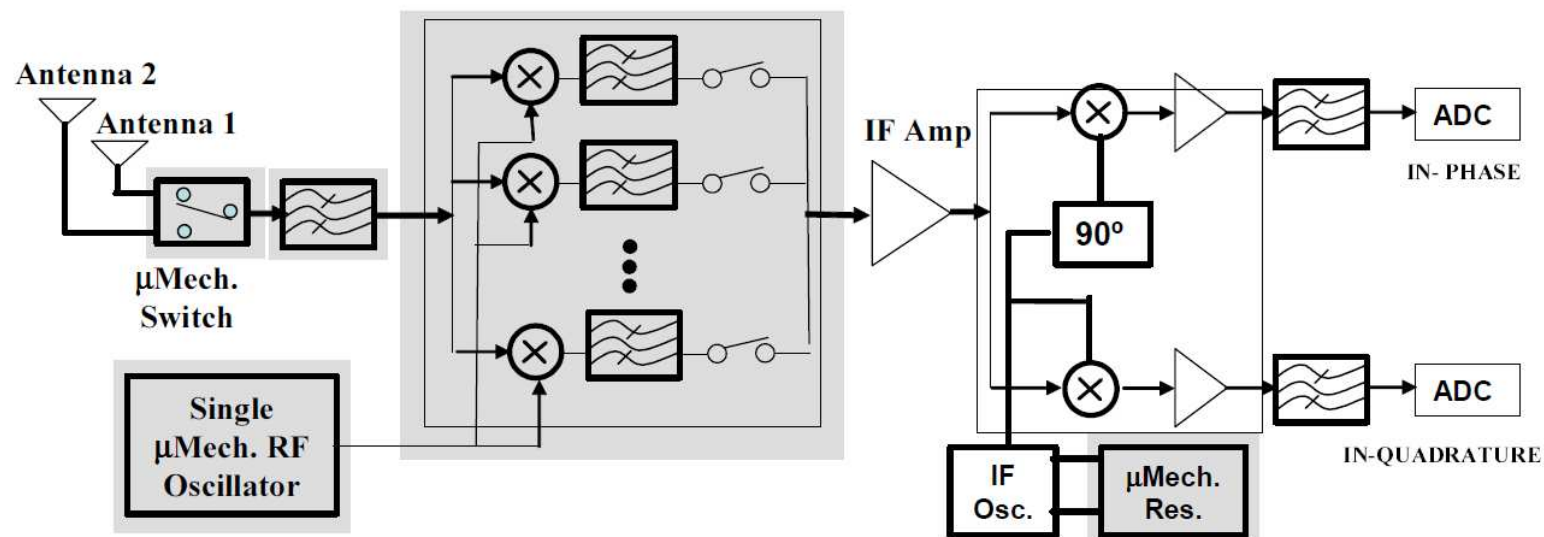
- rezystor, kondensator, cewka,
- rezonator elektromechaniczny, filtr elektromechaniczny,
- tranzystor

System elektroniczny



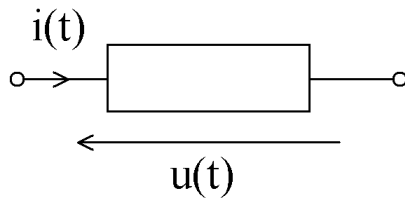
Źródło: C.T.C. Nguyen "Vibrating RF-MEMS overview: applications to wireless communications", Proc. of SPIE Conference 2005

System elektroniczny



Źródło: J. Teva Merono "Integration of CMOS-MEMS resonators for radiofrequency applications in the VHF and UHF bands" Phd thesis 2007

Rezystor, kondensator, cewka

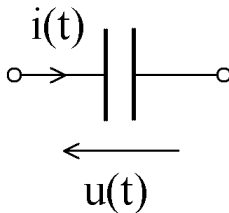


Dziedzina czasu

$$u(t) = i(t) \cdot R$$

Dziedzina
częstotliwości

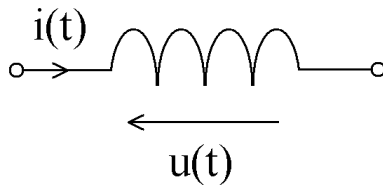
$$u(j\omega) = i(j\omega) \cdot R$$



$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

$$u(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} \cdot i(j\omega)$$

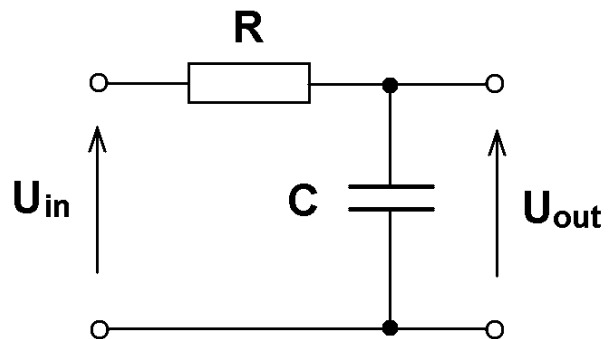


$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

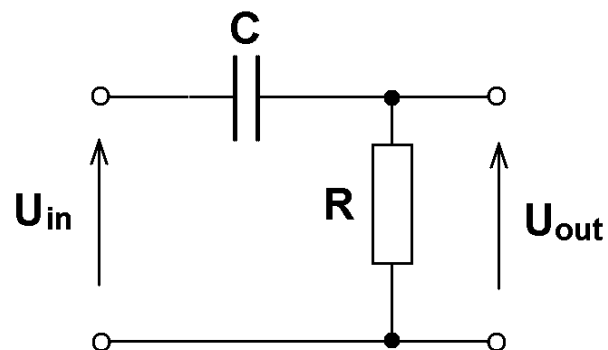
$$i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt$$

$$u(j\omega) = j\omega L \cdot i(j\omega)$$

Przykłady najprostszych filtrów:



1) Filtr dolno-przepustowy (ang. *low-pass filter*)

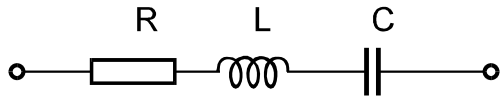


2) Filtr górno-przepustowy (ang. *high-pass filter*)

Rezystor, kondensator, cewka

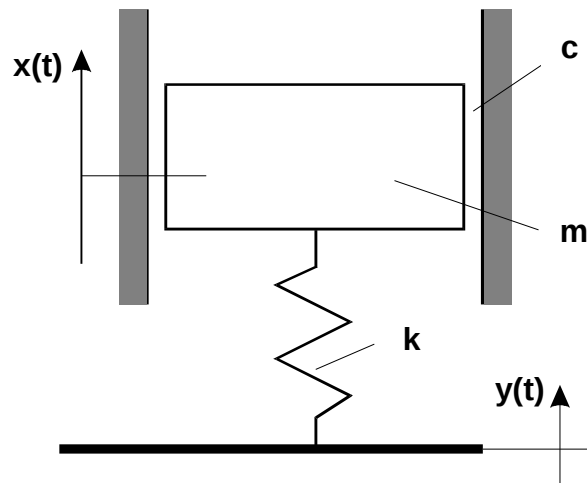
obwód rezonansowy

Spróbujmy znaleźć analogię!



Rys. 1 Szeregowy obwód rezonansowy

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t)$$



m – masa
c – współczynnik tarcia
k – współczynnik sprężystości

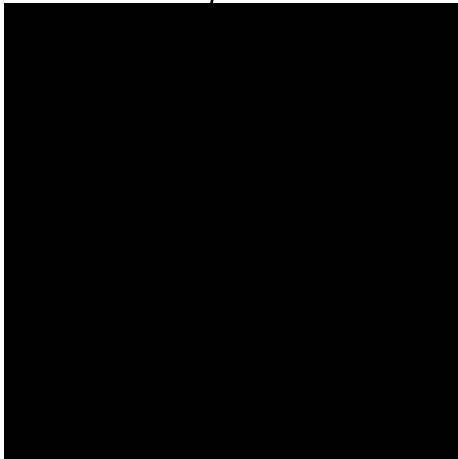
$$ky(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t)$$

Rys. 2 Drgający układ mechaniczny:
masa podparta sprężystości i drgająca w
prowadnicy z tarciem lepkim.

Rezonator elektromechaniczny piezoelektryczny

Rezonator piezoelektryczny – przykład „styku” mechaniki z elektroniką.

Zjawisko piezoelektryczne – polega na pojawieniu się ładunku elektrycznego na ściankach próbki kryształu pod wpływem zewnętrznego ciśnienia (odkształcenia mechanicznego). Występuje również efekt odwrotny: pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego próbka kryształu odkształca się mechanicznie.



Rysunek zaczerpnięto z materiałów wykładowych
<http://opatowek.wsinf.edu.pl/~mbieniec/miernictwo/>

Kwarc (SiO_2) jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów piezoelektrycznych.

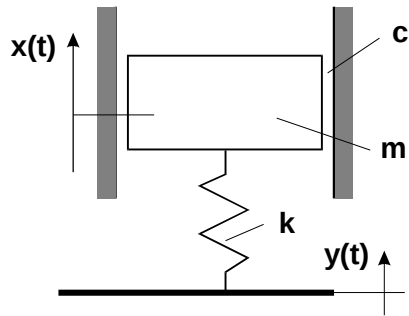


Rezonator kwarcowy pracuje jako dwójnik elektryczny. Najczęściej ma postać kostki, płytki lub innej bryły monokryształu z umieszczonymi na jej powierzchni dwiema elektrodami. Częstotliwość drgań od 100Hz do 200MHz.

Drgania mechaniczne wywołują napięcie na elektrodach i odwrotnie - napięcie powoduje drgania. To sprzężenie jest najsilniejsze dla częstotliwości rezonansu mechanicznego. Częstotliwość rezonansowa zależy od wymiarów i rodzaju materiału.

Rezonator elektromechaniczny piezoelektryczny kwarcowy

Znowu mamy analogię.

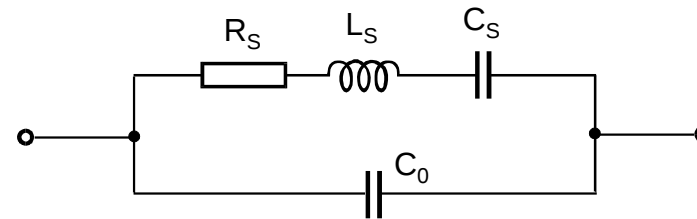


$$ky(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t)$$

m – masa

c – współczynnik tarcia

k – współczynnik sprężystości



Schemat zastępczy rezonatora.

R_s – odpowiednik współczynnika tłumienia drgań mechanicznych w kryształ

L_s i C_s – są powiązane z masą, współ. sprężystości, przenikalnością dielektryczną i stałą piezoelektryczną kryształu

C_0 – pojemność obudowy, elektrod i doprowadzeń rezonatora

Równanie opisujące zależność zmian ładunku elektrycznego w czasie od napięcia na elektrodach rezonatora będzie analogiczne do równania opisującego drgania tłumione masy zawieszonej sprężystości.

Rezystor, kondensator, cewka

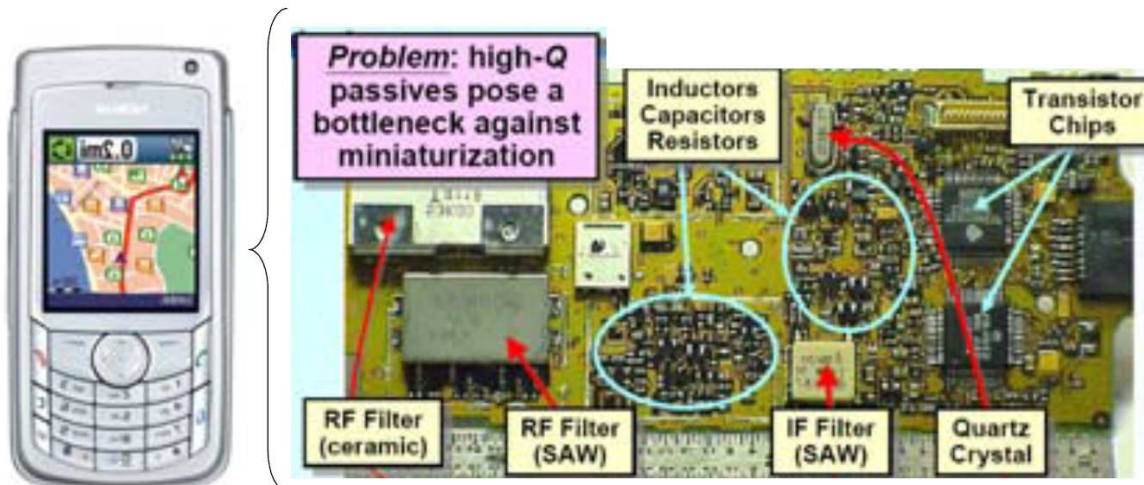
rezonator kwarcowy

Cechą rezonatorów elektromechanicznych (kwarcowych), wręcz bezcenną dla elektroniki jest duża stabilność częstotliwości drgań własnych. Rezonatory kwarcowe posiadają bardzo dużą dobroć ($10^4 \div 10^7$) oraz bardzo mały temperaturowy współczynnik zmian częstotliwości rezonansowej ($10^{-5} \div 10^{-9}$). Dla przykładu, dobroci zwykłych obwodów rezonansowych RLC są rzędu 10^2 .

Definicja dobroci = ?

Zastosowanie rezonatorów elektromechanicznych (kwarcowych, ceramicznych):

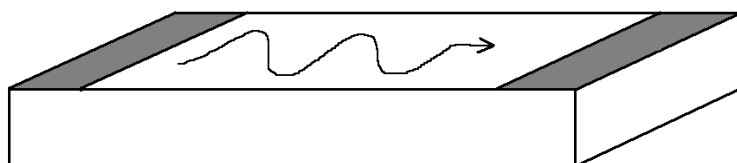
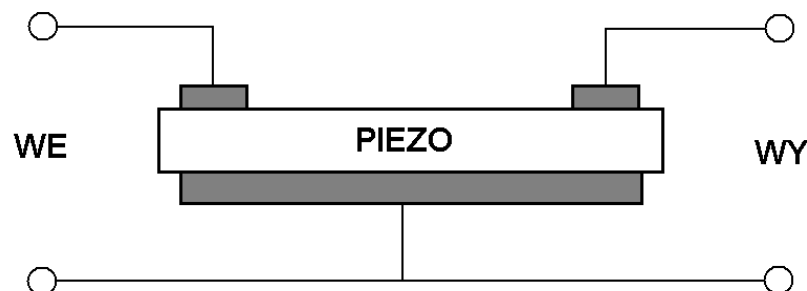
- stabilizacja drgań generatorów elektronicznych - generatory w mieszaczach odbiorników i nadajników telekomunikacyjnych, generatory w systemach komputerowych np. „zegary” taktujące pracę procesora. Obecnie większość urządzeń elektronicznych jest systemami komputerowymi: komputery osobiste, telefony komórkowe, odtwarzacze mp3/mp4, telewizory, odbiorniki GPS itp.,
- pomiar czasu – zegary (błąd względny 10^{-8}); pod względem dokładności lepsze są tylko zegary atomowe (błąd względny 10^{-10}),



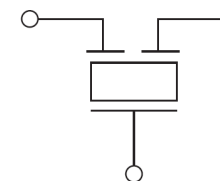
↓
Sekunda - jest to czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma poziomami $F = 3$ i $F = 4$ struktury nadsubtelnej stanu podstawowego $^{25}\text{S}_{1/2}$ atomu cezu ^{133}Cs w spoczynku w temperaturze 0K.

Filtry elektromechaniczne

Wyobraźmy sobie dwa rezonatory sprzężone w sposób pokazany na rysunku



Szczególne znaczenie mają filtry SAW – duża selektywność (dobroć), częstotliwości pracy do 3GHz.



RODZAJE FAL

fala podłużna – przemieszczenia mechaniczne są równoległe do kierunku propagacji

fala poprzeczna – przemieszczenia mechaniczne są prostopadłe do kierunku propagacji

fala objętościowa – (fala qasipodłużna) występuje dominująca składowa wzdłuż kierunku propagacji oraz składowa prostopadła do tego kierunku

fala powierzchniowa – SAW (fala Rayleigha - 1885) (*ang. SAW – surface acoustic wave*) rozchodzi się wzdłuż swobodnej powierzchni kryształu (występuje przy tym pofalowanie powierzchni kryształu), głębokość wnikania równa w przybliżeniu długości fali, prędkość nieco mniejsza od prędkości fali poprzecznej rozchodzącej się w tym samym kierunku, silny wpływ warunków elektrycznych na powierzchni kryształu na parametry fali.

Tranzystory

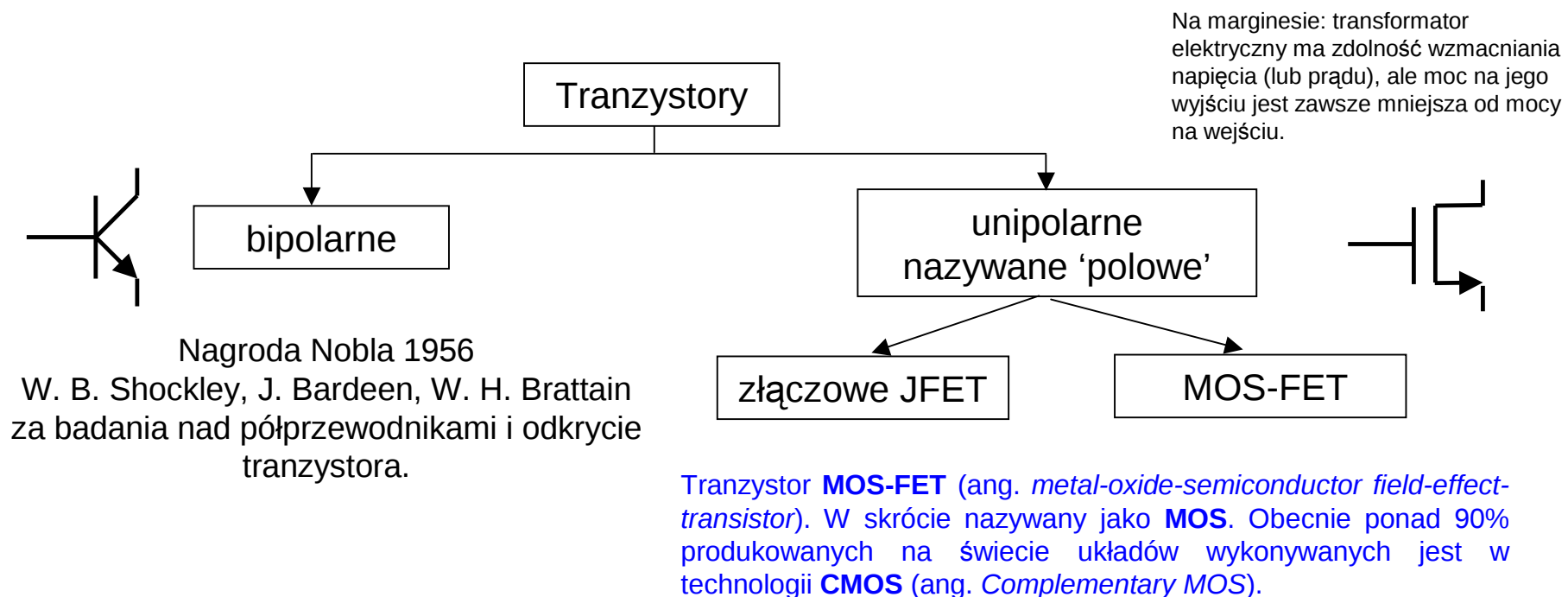
Elementy dyskretne a....



... scalone.

Tranzystory

Tranzystor – to element, który posiada zdolność wzmacniania mocy sygnału elektrycznego. Z uwagi na tą właściwość, tranzystor zalicza się do grupy elementów aktywnych.

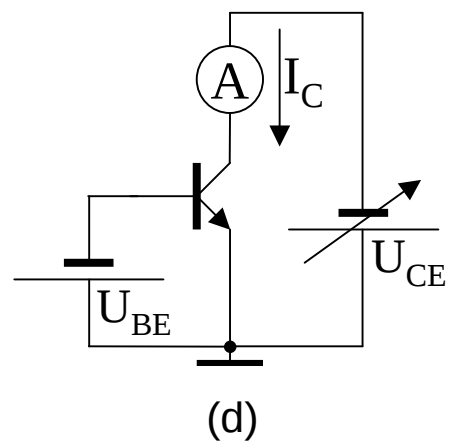
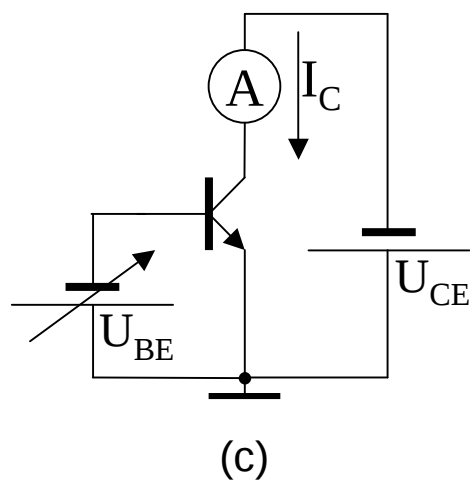
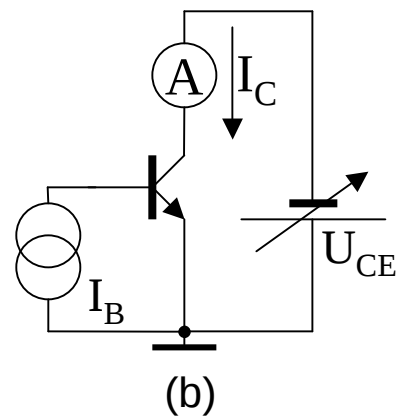
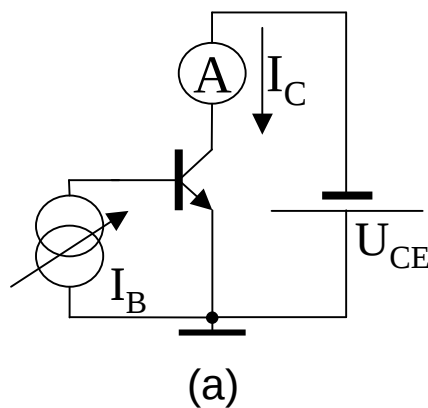
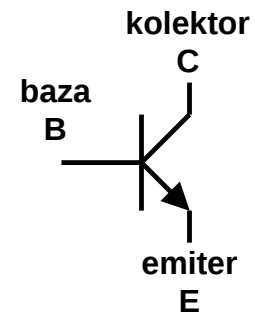


1933 r. J.E Lilienfeld - wynalazek tranzystora MOS.

1955 r. Ian Ross - wynalazek tranzystora MOS ze wzbogacanym kanałem.

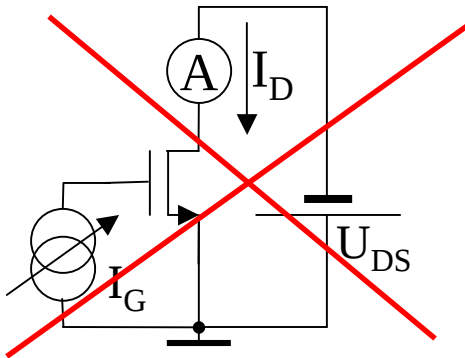
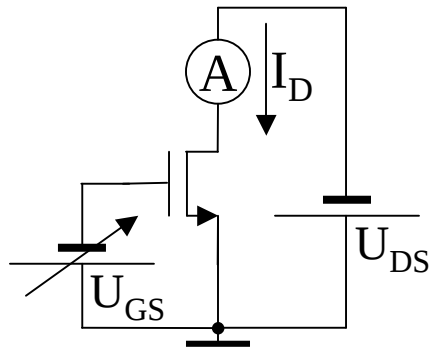
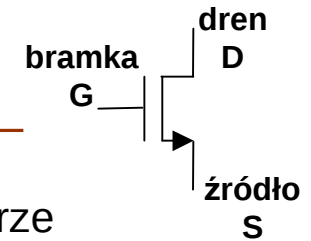
Tranzystor bipolarny

Tranzystor bipolarny jest trójkońcówkowym elementem elektronicznym o prądowych charakterze sterowania.



Tranzystor MOS-FET

Tranzystor MOS jest w uproszczeniu trójkońcówkowym (w rzeczywistości czterońcówkowym) elementem elektronicznym o napięciowym charakterze sterowania.



- W konfiguracji pokazanej na rysunku tr. MOS pracuje jako źródło prądowe sterowane napięciem.
- Zależność prądu drenu (I_D) od napięcia bramka-źródło (U_{GS}) jest bardzo złożona, zwłaszcza dla technologii submikronowych. Złożone równania opisujące tranzystor są zaimplementowane w symulatorach układów elektronicznych.
- Projektanci układów scalonych używają do „ręcznej” analizy (ang. *rough analysis*) uproszczony tzw. kwadratowy opis tranzystora MOS:

$$I_D = K_p \frac{W}{L} (U_{GS} - V_T)^2 \quad \text{dla } U_{GS} > V_T$$

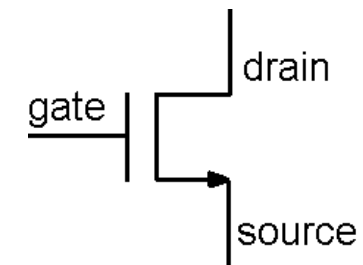
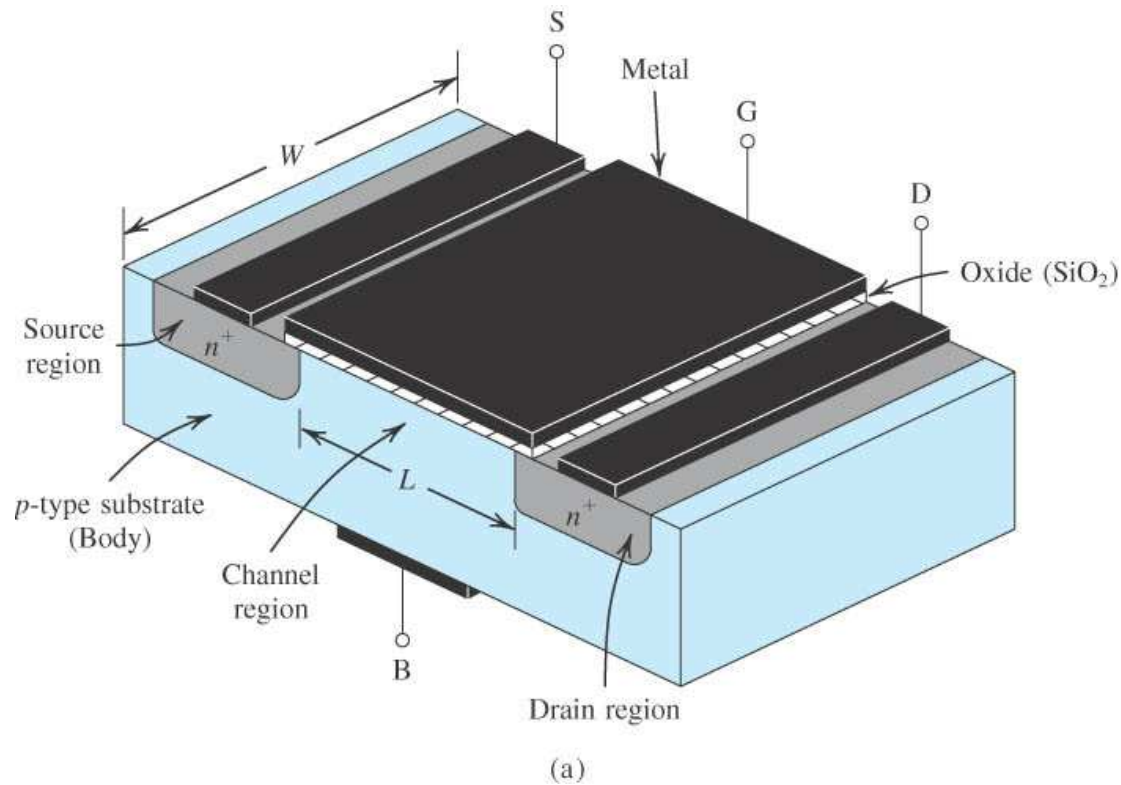
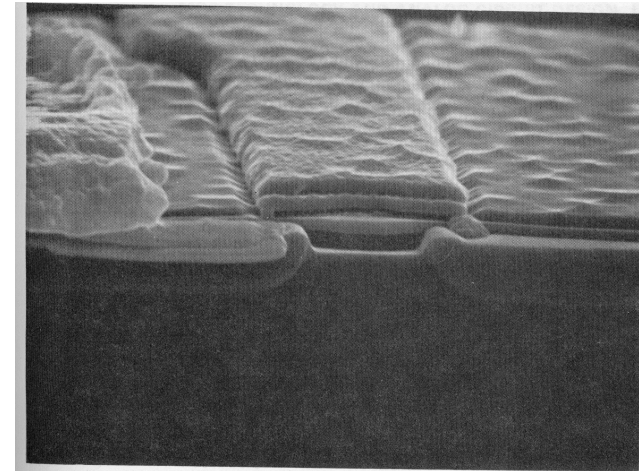
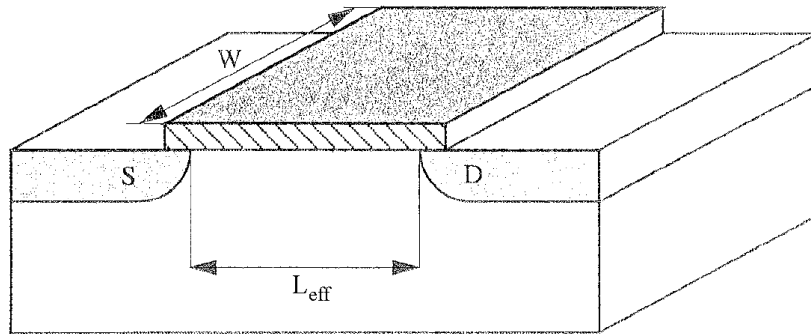
$$I_D = 0 \quad \text{dla } U_{GS} < V_T$$

K_p – parametr transkonduktancyjny (ang. *transconductance parameter*),
 V_T – napięcie progowe (ang. *threshold voltage*).

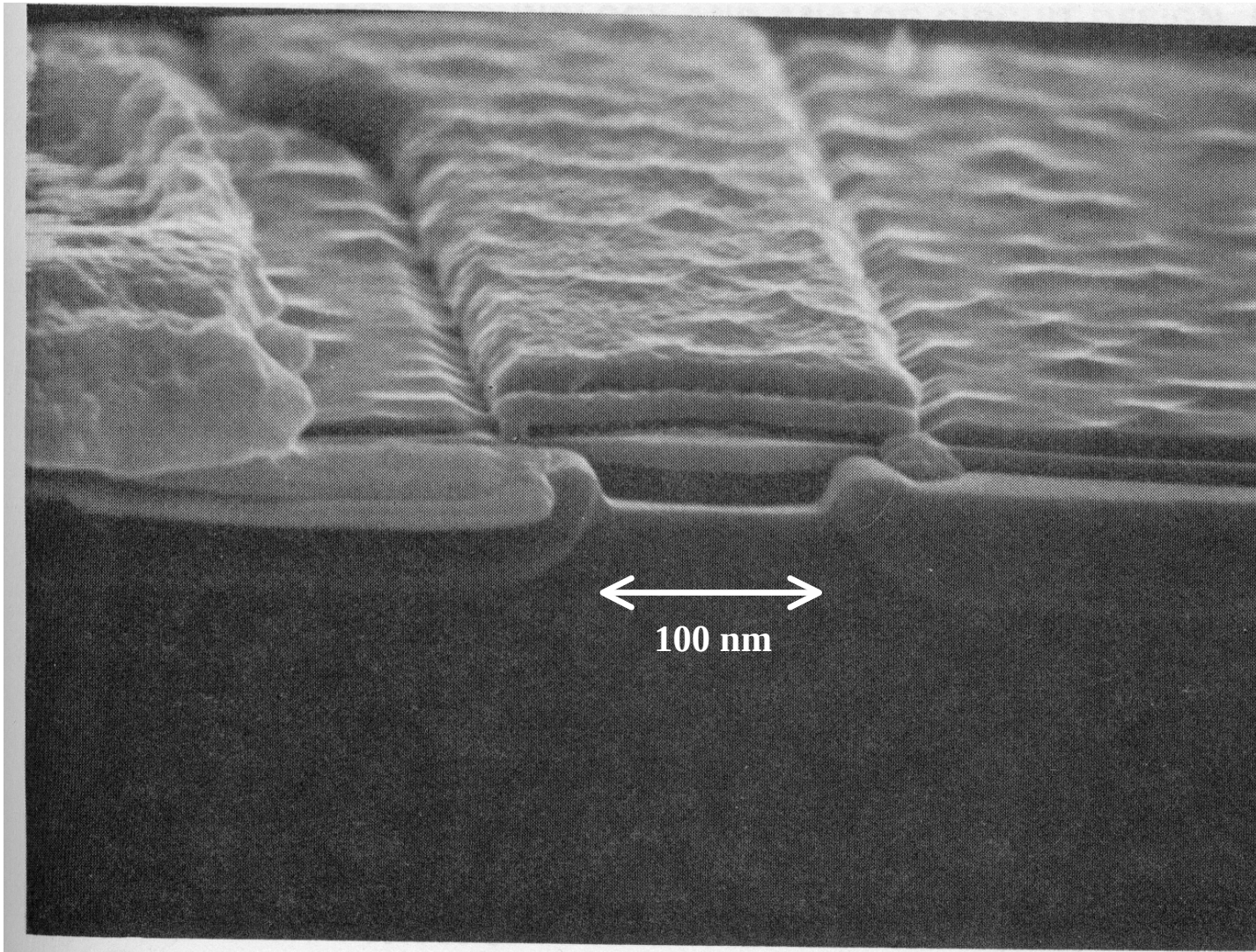
Parametr K_p wyraża się w jednostkach [$\mu\text{A}/\text{V}^2$]. Jest rzędu $\sim 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$.

Napięcie progowe V_T dla współczesnych technologii mieści się typowo w granicach $0.4 \div 0.7\text{V}$. Wykonuje się także tranzystory z napięciem $V_T = 0$ oraz $V_T < 0$.

Tranzystor MOS



Tranzystor MOS



Fotografia tranzystora MOS uzyskana z mikroskopu elektronowego. (Źródło: P. E. Allen & E. Sanchez-Sinencio „Switched capacitor circuits”, Van Nostrand Reinhold Company, New York,

Tranzystor MOS

Obecne technologie CMOS:

- 0.5 μm , napięcie zasilania układów VDD 3.3/5 V
- 0.35 μm , napięcie zasilania układów VDD 3.3/5 V
- 0.25 μm , napięcie zasilania układów VDD 2.5/3.3 V
- 0.18 μm , napięcie zasilania układów VDD 1.8/2.5/3.3 V
- 0.13 μm , napięcie zasilania układów VDD 1.2/2.5/3.3 V
- 90 nm, napięcie zasilania układów VDD 1.0/1.2 V
- 60 nm, napięcie zasilania układów VDD 1.0/1.1/1.2 V
- 40 nm, napięcie zasilania układów VDD 0.9/1.0/1.1 V
- rozwojowa 28 nm, napięcie zasilania układów VDD 0.85/1.0/1.05 V

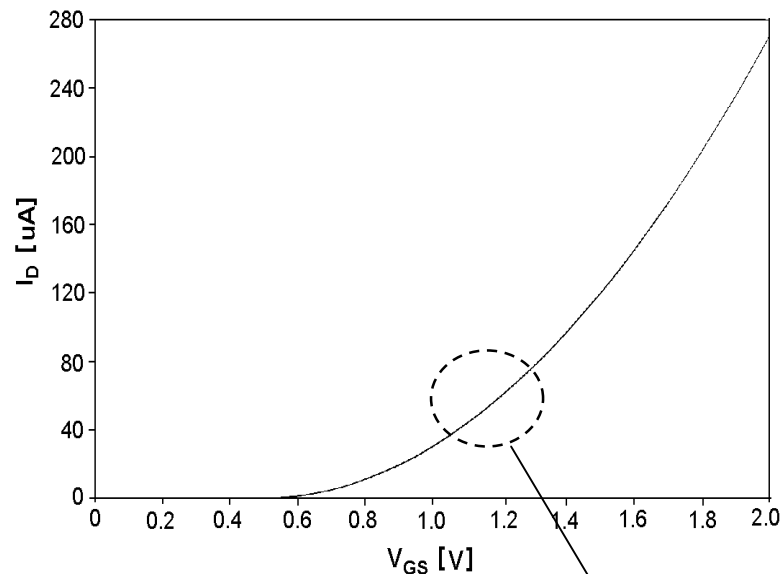
Napięcie zasilania jest ograniczone maksymalnym napięciem bramka-źródło (V_{GS}). Powyżej tego napięcia bramka tranzystora może ulec przebiciu.

Istnieją również technologie wysokonapięciowe (ang. *high voltage MOS devices*) dla napięcia zasilania 50V. Tranzystory te mają gruby tlenek pod bramką i nie ulegają przebiciu.

Tranzystor MOS jako wzmacniacz

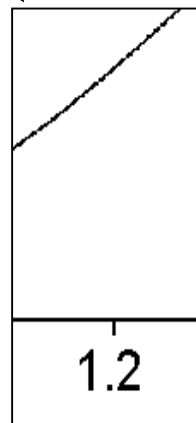
Typowa ch-ka prądowo-napięciowa: $K_p = 120 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $V_T = 0.5 \text{ V}$, $W/L = 1$.

$$I_D = K_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

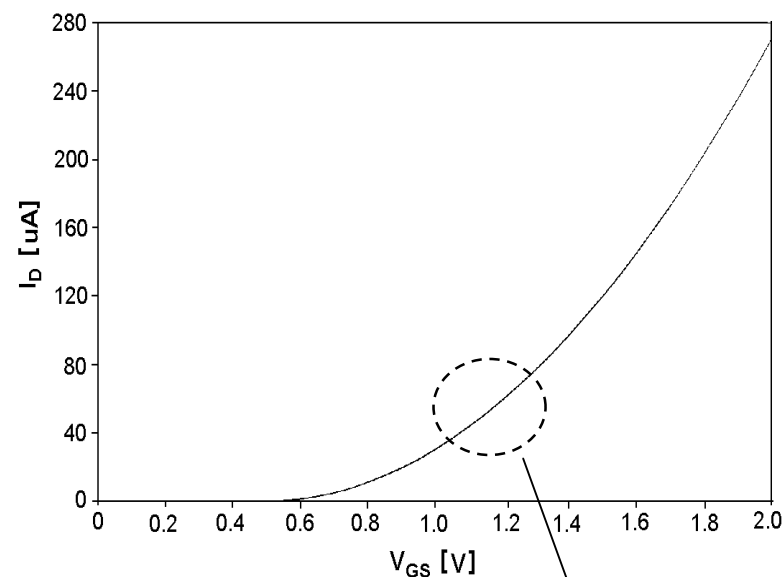
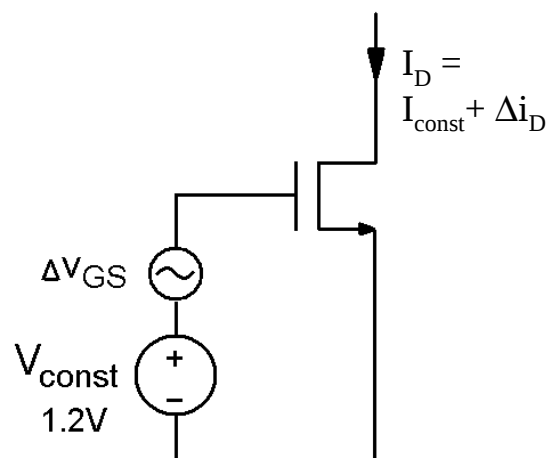


Ch-ka tranzystora jest silnie nieliniowa. Jeśli sygnał wejściowy (napięcie V_{GS}) będzie sinusoidalny, to prąd drenu będzie zawierał podstawową i drugą harmoniczną. Rzeczywista ch-ka tranzystora nie jest dokładnie kwadratowa i pojawią się także harmoniczne innych rzędów. Jakkolwiek, parzyste harmoniczne są dominujące w rzeczywistych układach CMOS.

Aby tr. MOS mógł pracować jako wzmacniacz liniowy, należy wykorzystać tylko niewielki odcinek jego ch-ki.



Tranzystor MOS jako wzmacniacz



$$I_D = K_p \cdot (W/L) \cdot (V_{\text{GS}} - V_T)^2 = K_p \cdot (W/L) \cdot (V_{\text{const}} + \Delta v_{\text{GS}} - V_T)^2 =$$

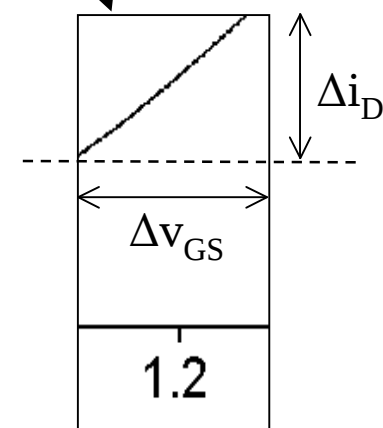
$$= K_p \cdot (W/L) \cdot [(V_{\text{const}} - V_T)^2 + 2(V_{\text{const}} - V_T)\Delta v_{\text{GS}} + (\Delta v_{\text{GS}})^2] =$$

$$= I_{\text{const}} + \Delta i_D$$

gdzie:

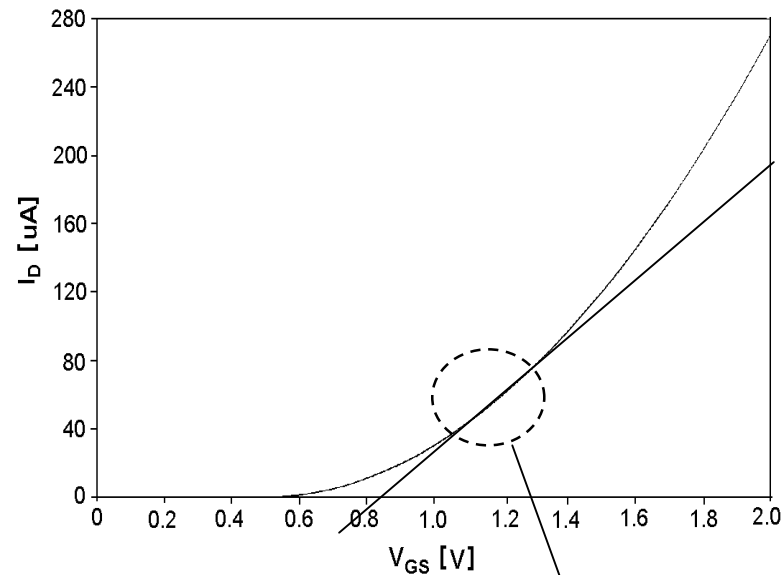
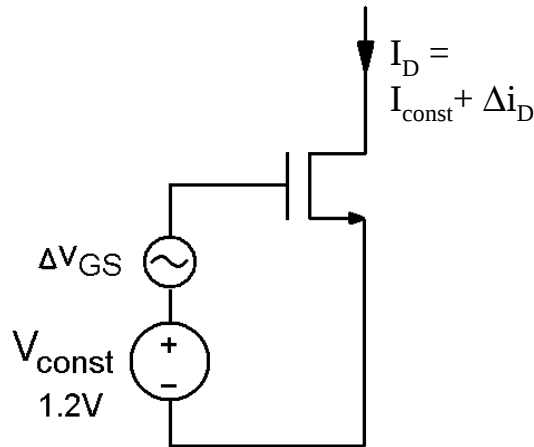
$$I_{\text{const}} = K_p \cdot (W/L) \cdot (V_{\text{const}} - V_T)^2$$

$$\Delta i_D = K_p \cdot (W/L) \cdot [2(V_{\text{const}} - V_T)\Delta v_{\text{GS}} + (\Delta v_{\text{GS}})^2]$$



I_{const} , V_{const} – jest to punkt pracy tranzystora (ang. *operating point*)

Tranzystor MOS jako wzmacniacz



Zaanalizujemy układ trochę inaczej. W punkcie pracy można wyznaczyć współczynnik kierunkowy stycznej:

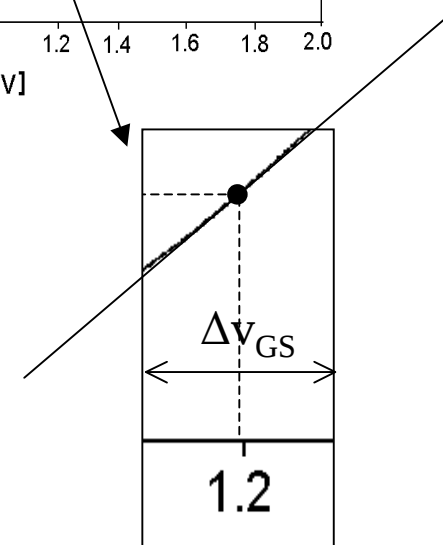
$$\left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{\text{GS}}} \right|_{V_{\text{GS}}=V_{\text{const}}} = 2K_p \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{\text{GS}} - V_T) \bigg|_{V_{\text{GS}}=V_{\text{const}}} = 2K_p \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{\text{const}} - V_T)$$

Można teraz wyznaczyć składową zmienną prądu drenu:

$$\Delta i_D = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{\text{GS}}} \right|_{V_{\text{GS}}=V_{\text{const}}} \cdot \Delta V_{\text{GS}} = 2K_p \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{\text{const}} - V_T) \cdot \Delta V_{\text{GS}}$$

Zauważmy, że nie ma już składnika $(\Delta V_{\text{GS}})^2$.

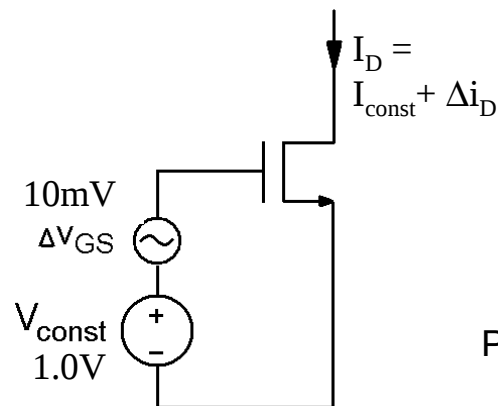
Pochodna $\delta I_D / \delta V_{\text{GS}} = g_m$ jest to transkonduktancja (małosygnałowa).



Tranzystor MOS jako wzmacniacz – przykład obliczeń 1

W układzie jak na rysunku:

- 1) wyznaczyć punkt pracy tranzystora
- 2) obliczyć transkonduktancję tranzystora w obliczonym punkcie pracy
- 3) obliczyć amplitudę prądu I_D przy pobudzeniu amplitudą 10mV.



Dane: $K_p = 150 \mu\text{A}/\text{V}^2$,
 $V_T = 0.5 \text{ V}$,
 $W/L = 10$.

Potrzebny wzór na prąd drenu: $I_D = K_p \cdot (W/L) \cdot (V_{GS} - V_T)^2$

Ad. 1)

$$V_{GS, \text{const}} = 1.0 \text{ V}, \quad I_{D, \text{const}} = 150 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot (1 - 0.5)^2 = 375 \cdot 10^{-6} = 375 \mu\text{A}$$

Ad. 2)

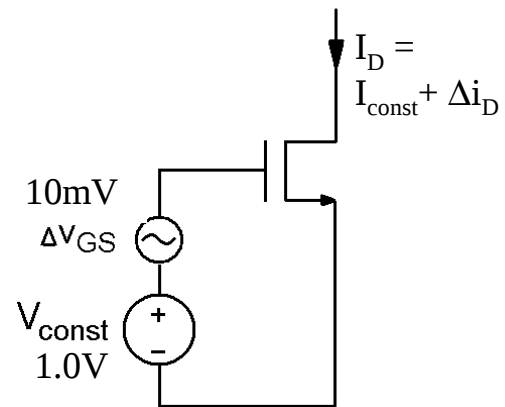
$$g_m = \delta I_D / \delta V_{GS} = 2 K_p \cdot (W/L) \cdot (V_{GS} - V_T) = 2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot (1 - 0.5) = 1.5 \cdot 10^{-3} = 1.5 \text{ mS}$$

Ad. 3)

$$\Delta i_D = g_m \cdot \Delta v_{GS} = 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 15 \mu\text{A}$$

Tranzystor MOS jako wzmacniacz – przykład obliczeń 1 c.d.

Jak zrobimy wzmacniacz?



Tranzystory - zastosowania

Tranzystor bipolarny:

- wzmacniacze i mieszacze w torach odbiorczo-nadawczych urządzeń telekomunikacyjnych b.w.cz (bardzo wysokich częstotliwości) – np. odbiorniki satelitarne
- tranzystory dużych mocy
- urządzenia mikrofalowe (zakres kilkuset GHz) – np. radar

Tranzystor MOS:

- układy cyfrowe – np. procesory komputerów
- komórki pamięci – cyfrowe pamięci komputerów
- przełączniki (klucze) elektroniczne

Rysunek klucza...