



# Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptak

Politechnika Rzeszowska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113  
konsultacje: pn. – cz. 11-12



## Plan wykładu



### Tranzystor JFET

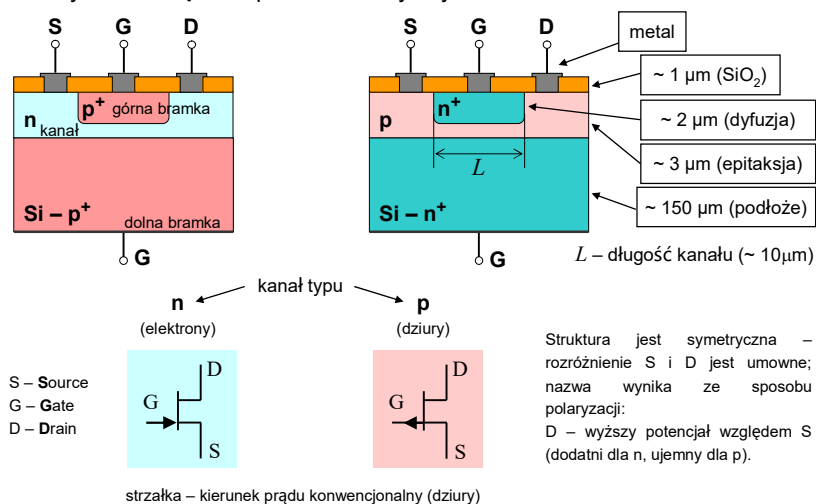
- Budowa i polaryzacja
- Zasada działania – charakterystyka przejściowa
- Zasada działania – charakterystyka wyjściowa
- Charakterystyki statyczne
- Parametry statyczne
- Modele tranzystora
- Parametry małosygnałowe



## Tranzystor złączowy PNFET



Tranzystor ze złączem p-n – struktury i symbole



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

3

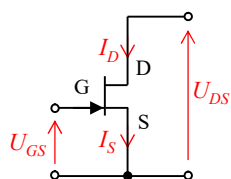


## Tranzystor złączowy PNFET



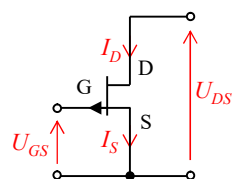
Tranzystor ze złączem p-n – oznaczanie prądów i napięć

Tranzystor z kanałem typu n



$$U_{GS} < 0$$
$$U_{DS} > 0$$

Tranzystor z kanałem typu p



$$U_{GS} > 0$$
$$U_{DS} < 0$$

W stanie ustalonym prąd bramki jest, praktycznie biorąc, równy zero.

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

4



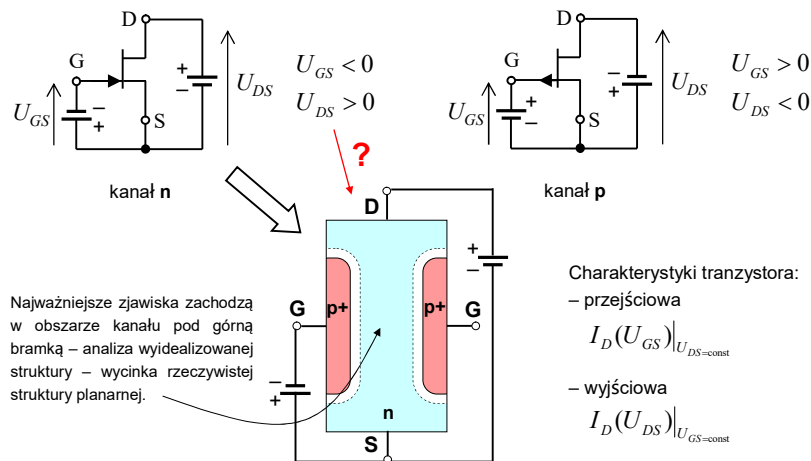
## Tranzystor złączowy PNFET - polaryzacja

KPE



Tranzystor pracuje tylko przy zaporowej polaryzacji złącza bramka-kanal –

– jeden sposób polaryzacji tranzystora.



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

5

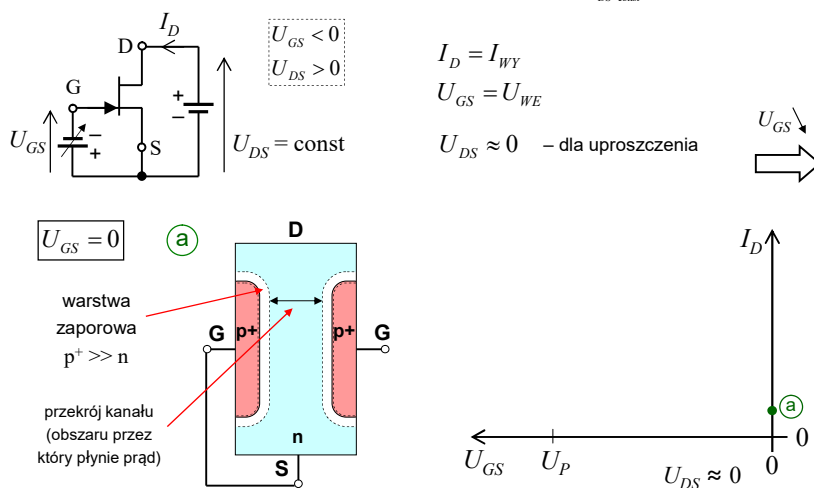


## Tranzystor PNFET – ch-ka przejściowa

KPE



Statyczna charakterystyka przejściowa tranzystora:  $I_D(U_{GS})|_{U_{DS}=\text{const}}$  kanal n



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

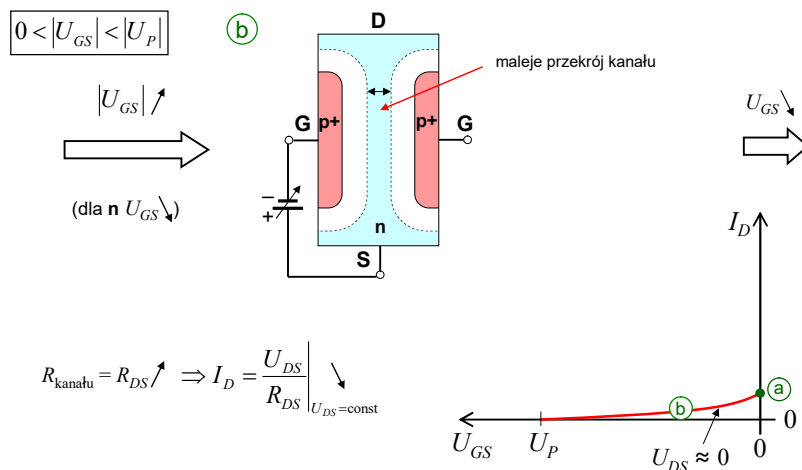
6



## Tranzystor PNFET – ch-ka przejściowa



Statyczna charakterystyka przejściowa tranzystora:  $I_D(U_{GS})|_{U_{DS}=\text{const}}$  kanał n



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

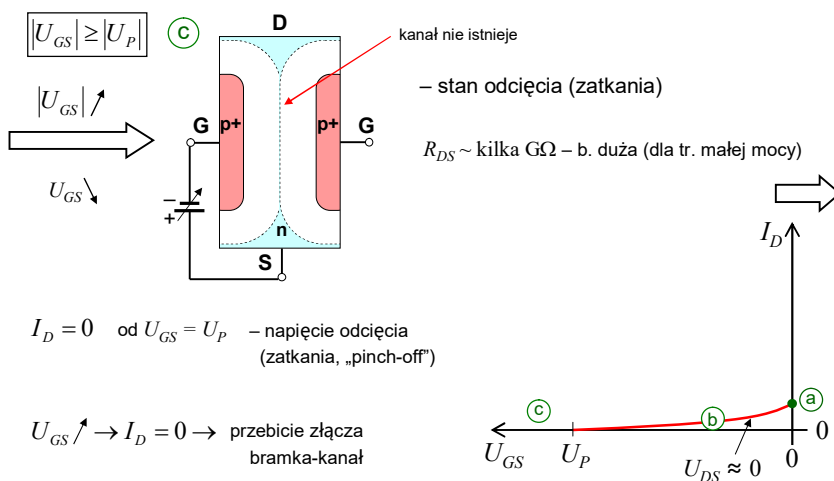
7



## Tranzystor PNFET – ch-ka przejściowa



Statyczna charakterystyka przejściowa tranzystora:  $I_D(U_{GS})|_{U_{DS}=\text{const}}$  kanał n



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

8



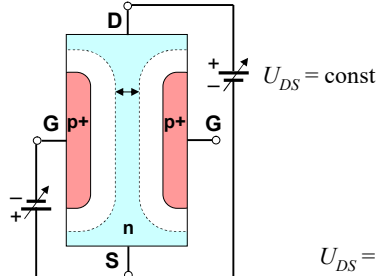
## Tranzystor PNFET – ch-ka przejściowa



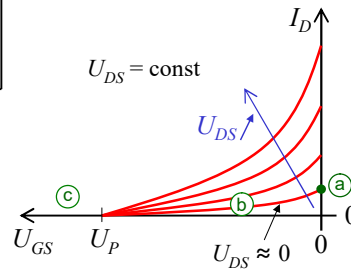
Statyczna charakterystyka przejściowa tranzystora:  $I_D(U_{GS})|_{U_{DS}=\text{const}}$  kanał n

Wpływ napięcia  $U_{DS}$

$$0 \leq |U_{GS}| \leq |U_P|$$



Złącze bramka-kanal jest spolaryzowane zaporowo – bardzo duża  $R_{WE}$ ! (zaleta!)  
Inna polaryzacja nie ma sensu praktycznego.



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

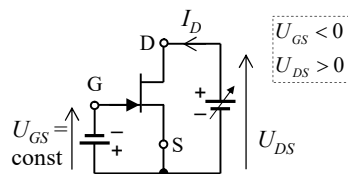
9



## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n



$U_{GS} = 0$  – na początek

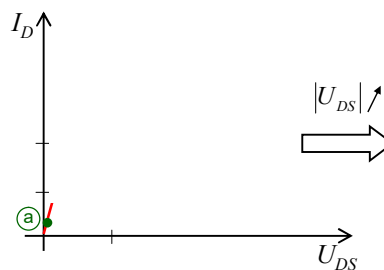
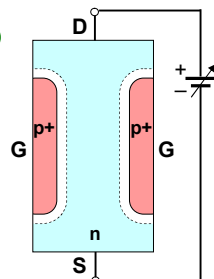
Złącze bramka-kanal jest polaryzowane zaporowo.

$$U_{DS} \approx 0$$

(a)

tranzystor zachowuje się jak rezystor liniowy

$$\Delta I_D \sim \Delta U_{DS}$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

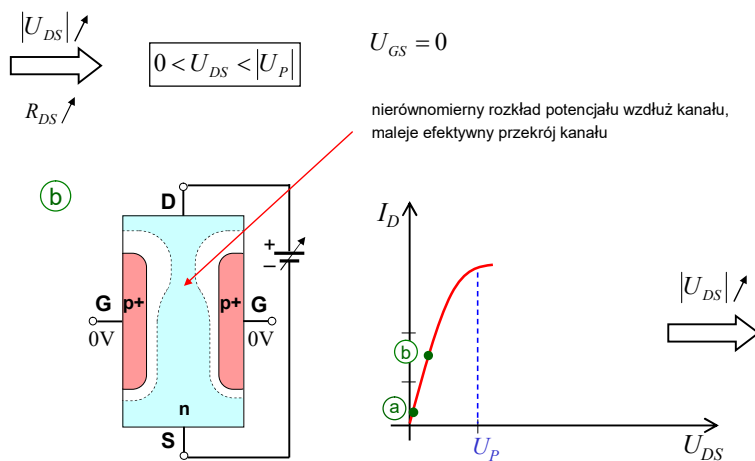
10



## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

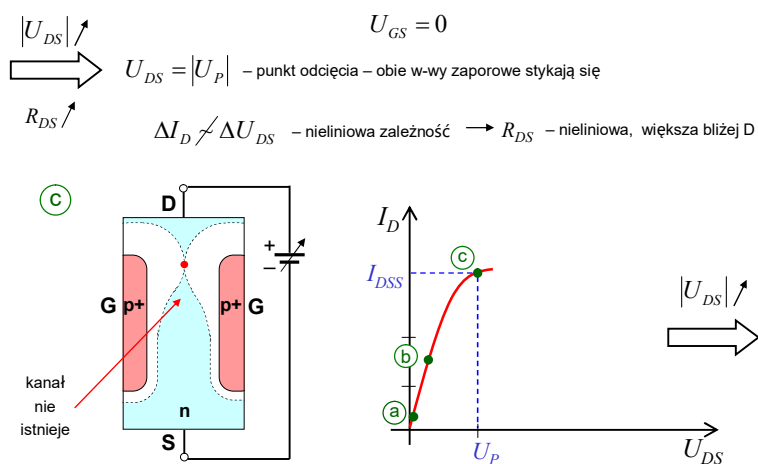
11



## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

12



## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa

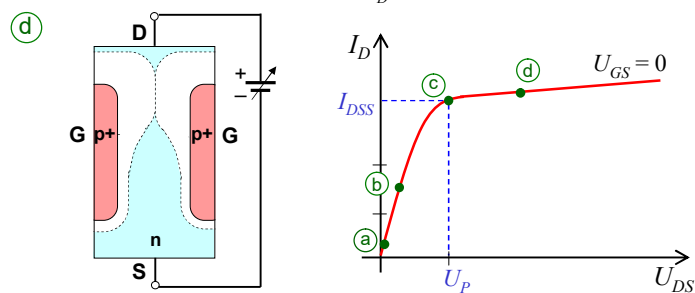


Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n

$|U_{DS}| \uparrow$   
 $\Rightarrow U_{DS} > |U_P|$  – dalszy wzrost  $U_{DS}$  nie powoduje prawie żadnych zmian  $I_D$ ;  
nasycenie prądu ( $I_D \approx I_{DSS}$ )

$$U_{GS} = 0$$

$$R_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \text{ – bardzo duża}$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

13

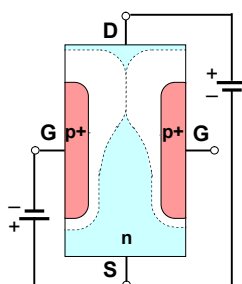


## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n

Dlaczego prąd  $I_D$  płynie mimo odcięcia kanału?



W obszarze zubożonym zachodzi transport nośników:

- składowa wzdłużna pola elektrycznego (przez  $U_{DS}$ ) unosi elektrony w stronę drenu (podobnie jak w tr. bipolarnym z złączu BC spolaryzowanym zaporowo),
- nie dochodzi do całkowitego zetknięcia się warstw zaporowych – gdy kanał zwęża się, napięcie w małym odcinku przy drenie osiąga tak duże wartości, że następuje nasycenie unoszenia elektronów, a przez to prądu (zostaje bardzo cienki kanał).

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

14

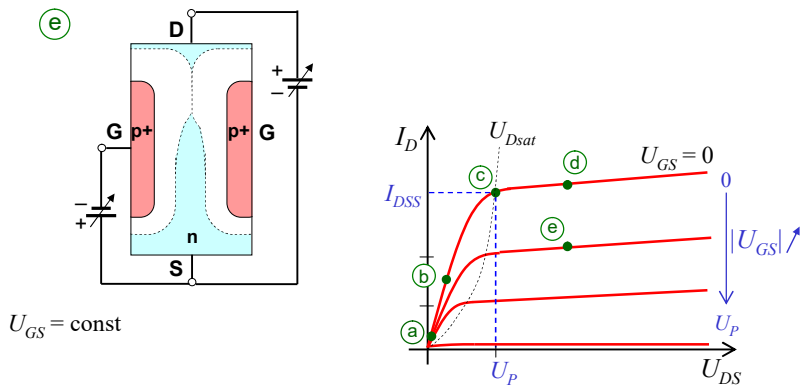


## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n

Wpływ napięcia  $U_{GS}$  (ujemnej polaryzacji bramki)



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

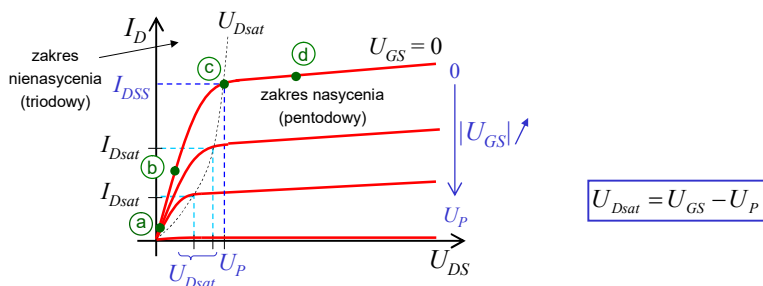
15



## Tranzystor PNFET – ch-ka wyjściowa



Statyczna charakterystyka wyjściowa tranzystora:  $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=\text{const}}$  kanał n



$$\left. \begin{array}{l} I_D = I_{Dsat} \\ U_{DS} = U_{Dsat} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \max I_{Dsat} = I_{DSS} \\ \max U_{Dsat} = |U_P| \end{array} \right\} \text{ dla } U_{GS} = 0$$

$U_{Dsat}$  – napięcie drenu, przy którym rozpoczyna się stan odcięcia kanału (tranzystor wchodzi w stan nasycenia)

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

16

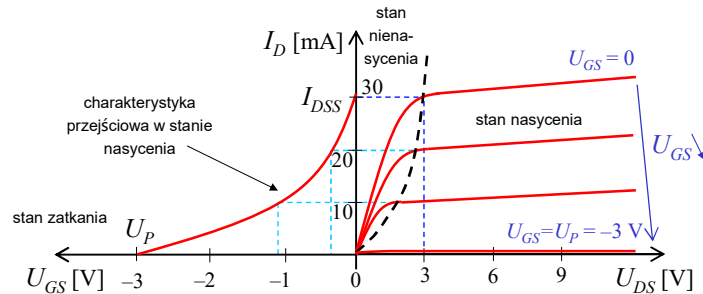




## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Charakterystyki statyczne – kanał typu n



#### Stany pracy tranzystora

- nieprzewodzenia (zatkana):  $|U_{GS}| > |U_P|$ ,  $U_{DS}$  – dowolne
- nienasycenia:  $|U_{GS}| < |U_P|$  i  $|U_{DS}| \leq |U_{Dsat}|$
- nasycenia:  $|U_{GS}| < |U_P|$  i  $|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

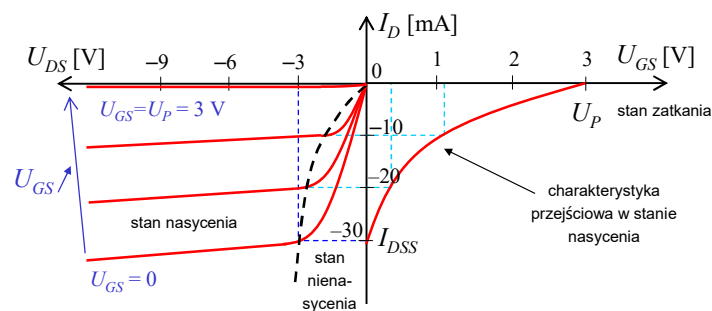
17



## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Charakterystyki statyczne – kanał typu p



#### Stany pracy tranzystora

- nieprzewodzenia (zatkana):  $|U_{GS}| > |U_P|$ ,  $U_{DS}$  – dowolne
- nienasycenia:  $|U_{GS}| < |U_P|$  i  $|U_{DS}| \leq |U_{Dsat}|$
- nasycenia:  $|U_{GS}| < |U_P|$  i  $|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

18



## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne

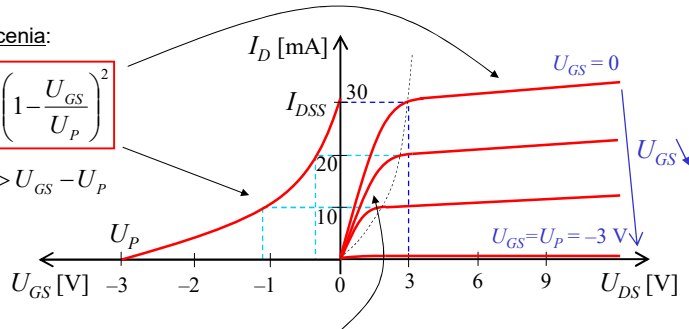


Równania charakterystyk statycznych – kanał typu n:  $I_D = I_{DSS} = \text{const}$   
(analogicznie dla kanału typu p)

Stan nasycenia:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

dla  $U_{DS} > U_{GS} - U_P$



Stan nienasycenia:  
(zakres liniowy)

$$I_D = G_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_P}} \right) U_{DS}$$

dla  $U_{DS} < U_{GS} - U_P$

$$G_0 = \frac{qaW\mu_n N_d}{L}$$

– konduktancja kanału

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

19



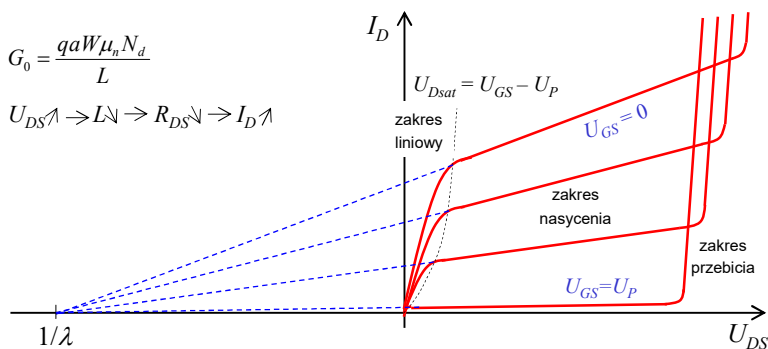
## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



Effekt modulacji (skrócenia) długości kanału

$$G_0 = \frac{qaW\mu_n N_d}{L}$$

$$U_{DS} \uparrow \rightarrow L \downarrow \rightarrow R_{DS} \downarrow \rightarrow I_D \uparrow$$



$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 (1 + \lambda U_{DS})$$

– prąd drenu w zakresie nasycenia  
(uwzględniając skrócenie kanału)

$\lambda$  – współczynnik modulacji długości kanału ( $\sim 0,001 \div 0,1 \text{ V}^{-1}$ )

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

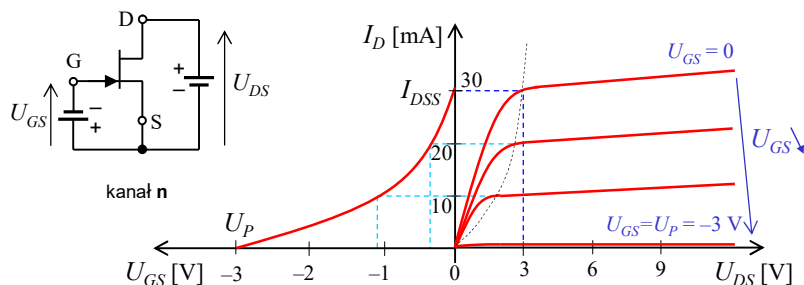
20



## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Parametry statyczne



- $U_P$  – napięcie odcięcia,
- $I_{DSS}$  – prąd nasycenia dla  $U_{GS} = 0$ ,
- $r_{DS}$  – rezystancja D-S przy  $U_{GS} = 0$  i  $U_{DS} \approx 0$ ,
- $I_{GSS}$  – prąd bramki przy dużym  $U_{GS}$  i  $U_{DS} = 0$  (zwarcie D i S),
- $U_{GSS}$  – napięcie przebicia G-S przy  $U_{DS} = 0$ , gdy  $I_G$  osiągnie dużą wartość, np.  $I_G = 1 \mu A$ .

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

21

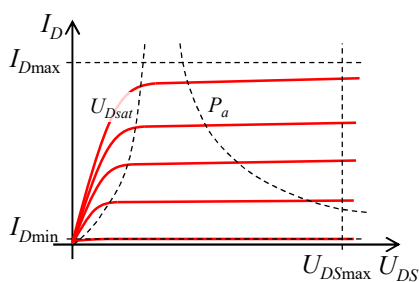


## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Parametry statyczne – ograniczenie stanu nasycenia

- stan nienasycenia,
- stan odcięcia,
- $P_a$ ,
- $I_{Dmax}$ ,
- $U_{DSmax}$ .



- $U_{DSat}$  – napięcie nasycenia ( $U_{DSat} = U_{GS} - U_P$ ).
- $I_{Dmin}$  – prąd minimalny – granica między nasyceniem i odcięciem (zniekształcenia nieliniowe).
- $P_a$  – moc admissyjna – maksymalna wartość  $I_{dc} \cdot U_{dc}$  – hiperbola mocy.
- $I_{Dmax}$  – prąd maksymalny – zniekształcenia związane z różnym nachyleniem ch-k wyjściowych.
- $U_{DSmax}$  – napięcie maksymalne – ograniczenie ze względu na zjawiska przebiciowe.

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

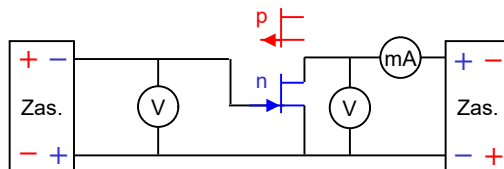
22



## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Pomiar charakterystyk



- Określić zakres dopuszczalnych zmian prądów i napięć.
- Pomiar prądu  $I_{DSS}$  (przy  $U_{GS} = 0$ ), praktycznie nie zależy od  $U_{DS}$ .
- Pomiar napięcia  $U_P$  (dla 3 wartości  $U_{DS}$ ):  $U_{GS} = 0 \rightarrow U_P, I_D \rightarrow 0$ , w praktyce np.  $I_D = 10 \mu A$ .  
 $U_{GS}$  nie może zbyt przekroczyć  $U_P$  – przebicie tranzystora. Można mierzyć razem z:
- Pomiar ch-k przejściowych ( $U_{DS} = \text{const}$ ) – dla trzech różnych wartości  $U_{DS}$ .
- Pomiar ch-k wyjściowych ( $U_{GS} = \text{const}$ ) – dla trzech wartości  $U_{GS}$  (w tym  $U_{GS} = 0$ ).
- Wyznaczyć parametry statyczne tranzystora.

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

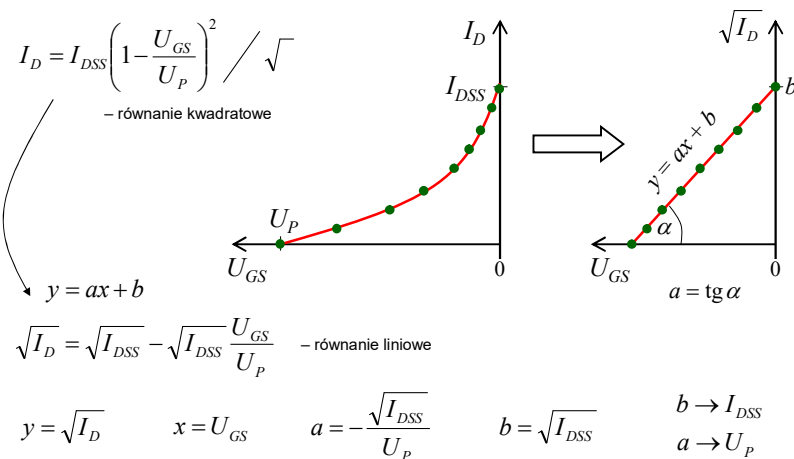
23



## Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



### Wyznaczenie parametrów statycznych na podstawie pomiarów ch-k.

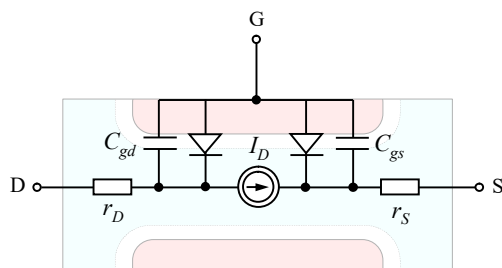


Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

24



## Model wielosygnałowy tr. PNFET



$$I_D = G_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_P}} \right) U_{DS}$$

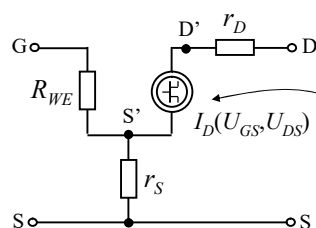
$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$



## Model statyczny tranzystora PNFET



Dla układu WS



$R_{WE}$  – rezystancja złącza bramka-kanal spolaryzowanego w kierunku zaporowym

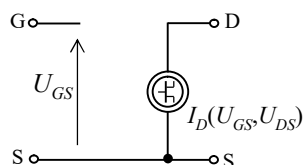
$R_{WE} \sim$  kilka  $M\Omega$  – kilka  $G\Omega$

$$I_G \approx 0$$

zależne źródło prądowe opisane równaniami charakterystyk statycznych

$r_D, r_S$  – zwykle pomijane na schematach ze względu na niewielki wpływ

$r_D, r_S <$  kilkadziesiąt  $\Omega$



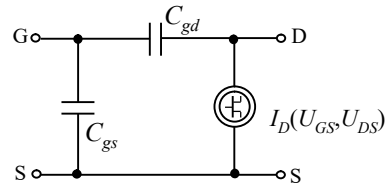


## Model dynamiczny nieliniowy



Powstaje przez dołożenie pojemności do modelu statycznego tranzystora.

Dla układu WS



$C_{gs}, C_{gd} \sim$  pojedynczych pF

Reakcja tranzystora PNFET na szybką zmianę warunków polaryzacji nie jest natychmiastowa z powodu dwóch zjawisk:

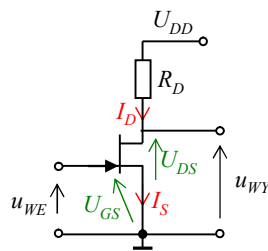
- ładowania warstwy zaporowej złącza bramka-kanal,
- skończonego czasu przelotu nośników przez kanał.



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WS



Obliczenie punktu pracy tranzystora ( $I_D, U_{DS}$ ) – w stanie nasycenia



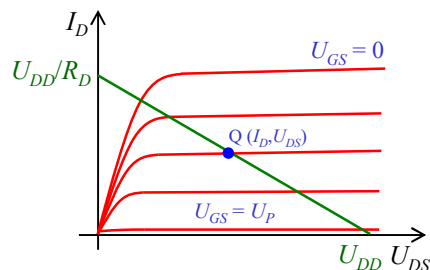
$U_{GS}$  – z oczka

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

Prosta pracy:  $U_{DD} - I_D R_D - U_{DS} = 0$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D} \cdot U_{DS} + \frac{U_{DD}}{R_D}$$

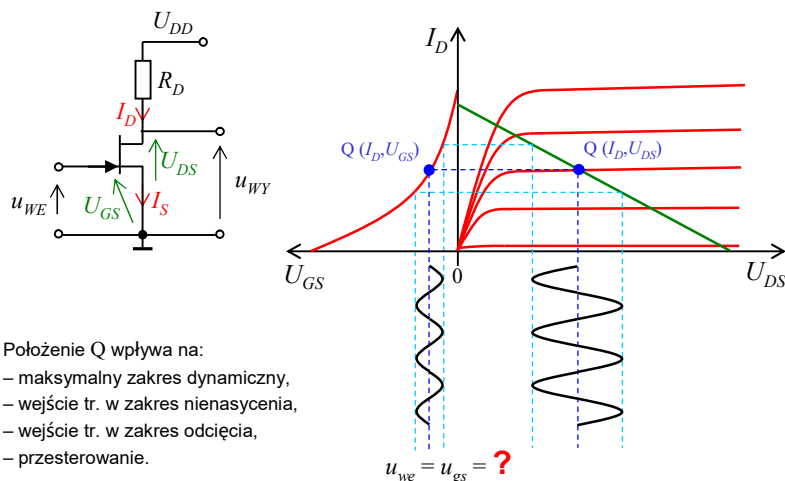




## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WS



Wybór punktu pracy – wpływ na właściwości wzmacniające wzmacniacza



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

29



## Parametry małosygnałowe tranzystora



Linearyzacja charakterystyk tranzystora – zakres wartości  $u_{we}$

$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2 \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{całkowity prąd drenu} \\ \text{w stanie nasycenia} \end{array} \quad u_{GS} = U_{GS} + u_{gs} \quad \leftarrow \text{całkowite napięcie na bramce}$$

$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} - \frac{u_{gs}}{U_P} \right)^2 = \underbrace{I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2}_{I_D, \text{ składowa stała}} - \underbrace{2I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right) \frac{u_{gs}}{U_P}}_{i_d, \text{ składowa zmienna}} + I_{DSS} \frac{u_{gs}^2}{U_P^2}$$

$$2I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right) \frac{u_{gs}}{U_P} \gg I_{DSS} \frac{u_{gs}^2}{U_P^2} \quad \rightarrow \quad \boxed{2(U_P - U_{GS}) \gg u_{gs}} = u_{we}$$

– warunek „małosygnałowości”

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

30



## Parametry małosygnałowe tranzystora



Transkonduktancja małosygnałowa  $g_m$

$$i_D = \underbrace{I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2}_{I_D, \text{ składowa stała}} - 2I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right) \frac{u_{gs}}{U_P} + \cancel{I_{DSS} \frac{u_{gs}^2}{U_P^2}}$$

$2I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right) \frac{u_{gs}}{U_P} \gg I_{DSS} \frac{u_{gs}^2}{U_P^2}$

$$i_D = I_D - \frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right) u_{gs}$$

$$\left. \begin{aligned} g_m &= -\frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right) \end{aligned} \right\} i_D = I_D + g_m u_{gs} \Rightarrow i_d = g_m u_{gs}$$

$g_m [\text{A/V}]$  – zależy od punktu pracy tranzystora oraz jego własności fizycznych reprezentowanych przez  $U_P$  i  $I_{DSS}$

Analogiczne zależności można wyprowadzić dla stanu nienasycenia tranzystora.



## Parametry małosygnałowe tranzystora



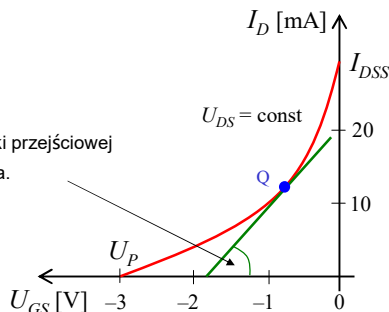
Transkonduktancja małosygnałowa  $g_m$

$$g_m \equiv \left. \frac{dI_D}{dU_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{const}} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)$$

$$g_{m\max}|_{U_{GS}=0} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

**Interpretacja graficzna:**  
nachylenie stycznej do ch-ki przejściowej  
w punkcie pracy tranzystora.



Transkonduktancja opisuje własności wzmacniające tranzystora.





## Parametry małosygnałowe tranzystora



### Konduktancja wyjściowa (kanału; drenu) $g_{ds}$

- Z definicji:  $g_{ds} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{const}}$  – różne zależności dla stanu nasycenia i nienasycenia
- Dla rzeczywistego tranzystora (uwzględniając skrócenie kanału):  $g_{ds} \equiv \lambda I_{Dsat}$

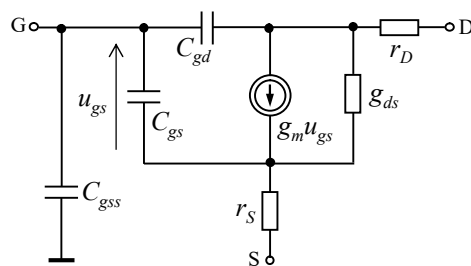
### Pojemności bramka-dren $C_{gd}$ i bramka-źródło $C_{gs}$

- Pojemność bramki jest rozłożona wzdłuż kanału, jednak dla uproszczenia jest reprezentowana w modelu zastępczym przez dwie pojemności.

$$C_{gs} = C_{gs0} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{\phi_0} \right)^{-1/3} \quad C_{gd} = C_{gd0} \left( 1 - \frac{U_{GD}}{\phi_0} \right)^{-1/3}$$



## Model małosygnałowy dla WS



W zależności od zakresu częstotliwości i dokładności analizy można pominąć wybrane elementy modelu!

### Pojemność między bramką a podłożem $C_{gss}$ : $C_{gss} = C_{gss0} \left( 1 - \frac{U_{GSS}}{\phi_0} \right)^{-1/2}$

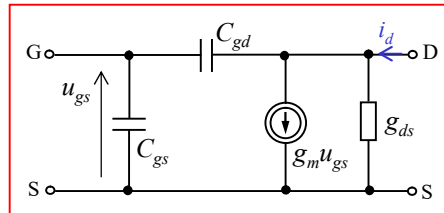
- stosuje się w modelu monolitycznego tranzystora
- (często pomijana)

### Rezystancje szeregowe drenu i źródła $r_D$ i $r_S$

- zwykle pomijane na schematach ze względu na niewielki wpływ



## Model małosygnałowy dla WS

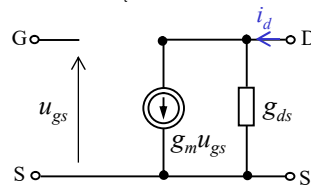


W zależności od zakresu częstotliwości i dokładności analizy można pominąć wybrane elementy modelu!

$g_m u_{gs}$  – źródło prądowe (zależne) sterowane sygnałem z wejścia



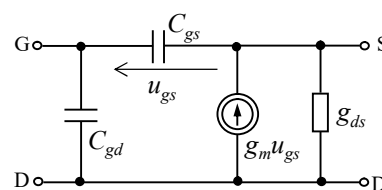
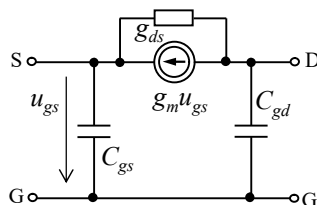
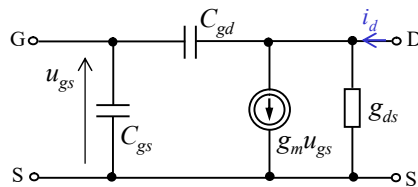
Model quasi-statyczny; dla małych i średnich częstotliwości:



Dla innych układów włączenia tranzystora (WG, WD) schemat należy zmodyfikować.



## Model małosygnałowy dla WG i WD

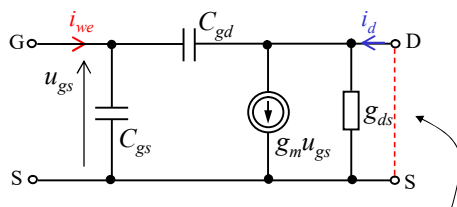




## Częstotliwość odcięcia



Częstotliwość odcięcia  $f_T$  – skutek dość dużej pojemności bramki:  $C_g = C_{gs} + C_{gd}$



$f_T$  – częstotliwość, przy której prąd wejściowy (przy zwartym wyjściu) jest równy prądowi źródła sterowanego:

$$i_{we} = g_m \cdot u_{gs}$$

Przy zwartym wyjściu prąd wejściowy jest prądem ładowania pojemności wejściowych:

$$i_{we} = j\omega(C_{gs} + C_{gd})u_{gs}$$

$$\text{przy } f_T: |i_{we}| = \omega_T(C_{gs} + C_{gd})u_{gs}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$