

XI.
PRZYRZĄDY ELEKTRONOWE

1 Dioda na złączu $p - n$

1.1 Złącze $p - n$ w równowadze

Złącze $p - n$ (homozłącze $p - n$) jest to utworzone z jednorodnego materiału półprzewodnikowego, który zawiera **nadmiar donorów z jednej strony i nadmiar akceptorów ze drugiej strony**.

Zatem złącze $p - n$ **nie jest stykiem** dwóch kawałków półprzewodników o różnym typie przewodnictwa.

Jednakże w opisie teoretycznym złącza wygodnie jest przyjąć, że oba materiały były początkowo odizolowane od siebie, a następnie zostały zetknięte z sobą. W tym sposobie opisu można wykorzystać znane przebiegi pasm elektronowych w obszarach odległych od złącza, a zajmować się zmianami potencjału jedynie w obszarze samego złącza.

Metody wytwarzania złącz $p - n$

- (1) stapianie powierzchniowe dwóch różnych materiałów,
- (2) dyfuzja domieszek,
- (3) wzrost epitaksjalny,
- (4) implantacja jonów.

W złączu $p - n$, wytworzonym za pomocą każdej z metod, warstwa rozdzielająca obszar typu p od obszaru typu n posiada grubość d o wartości rzędu

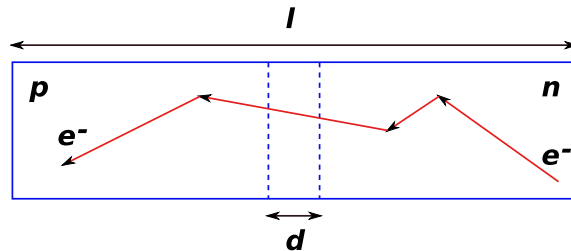
$$d \simeq 10^{-6} \text{m} = 1000 \text{ nm} .$$

Natomiast **średnia droga swobodna l dyfuzji nośników ładunku** jest rzędu

$$l \simeq 10^{-3} \text{m} .$$

\Rightarrow grubość złącza $p - n$ spełnia nierówność

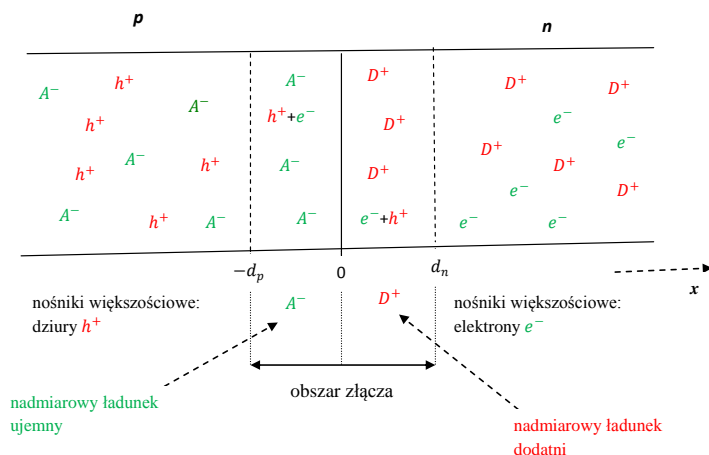
$$d \ll l .$$



Schemat złącza $p - n$. d = grubość warstwy zaporowej.

Zjawiska fizyczne zachodzące w złączu $p - n$ w równowadze

Rozważmy zjawiska zachodzące w złączu $p - n$ w temperaturze pokojowej, czyli $T \simeq 300$ K, bez obecności pól zewnętrznych, czyli bez podłączonego napięcia zewnętrznego.



Schemat rozkładu ładunków w obszarze złącza $p - n$.

Zmiany rozkładu ładunków na złączu $p - n$

W półprzewodniku typu n występuje nadmiar donorów, spośród których znaczna część ulega jonizacji termicznej w temperaturze pokojowej, co prowadzi do powstania jonów dodatnich D^+ , tworzących tzw. **ładunek przestrzenny**, i quasi-swobodnych elektronów, będących większościowymi nośnikami ładunku ujemnego.

W półprzewodniku typu p ładunek przestrzenny tworzą zjonizowane centra akceptorowe A^- , a większościowymi nośnikami ładunku są dodatnio naładowane dziury.

W obszarze złącza $p - n$ nośniki ładunku dyfundują przez granicę między półprzewodnikami p i n i ulegają rekombinacji, co prowadzi do redukcji ich liczby w obszarze złącza. Dodatkowo powstające w obszarze złącza silne pole elektryczne wymiata z niego swobodne nośniki. W rezultacie w obszarze złącza liczba swobodnych nośników ładunku ulega znacznej redukcji, stąd obszar ten nazywany jest **warstwą zubożoną**.

Równocześnie w obszarze złącza pojawiają się ładunki przestrzenne o przeciwnych znakach:

- dodatnim, po stronie półprzewodnika typu n (ładunek ten pochodzi od zjonizowanych donorów), oraz
- ujemnym, po stronie półprzewodnika typu p (ładunek ten pochodzi od zjonizowanych akceptorów).

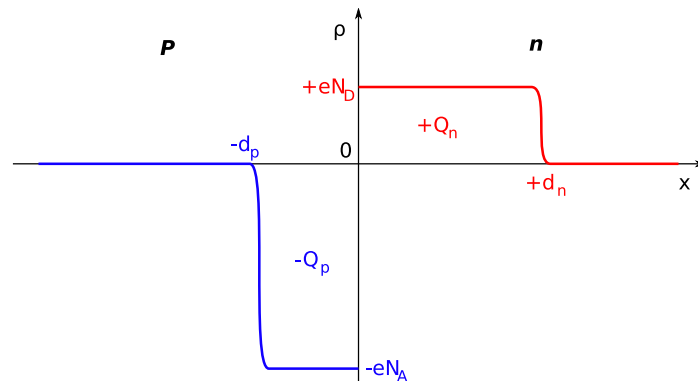
Dodatnie i ujemne ładunki przestrzenne są zlokalizowane w obu częściach złącza, tworzące w obszarze złącza **warstwę dipolową**.

Grubości warstwy dipolowej po stronach p i n są na ogół różne.

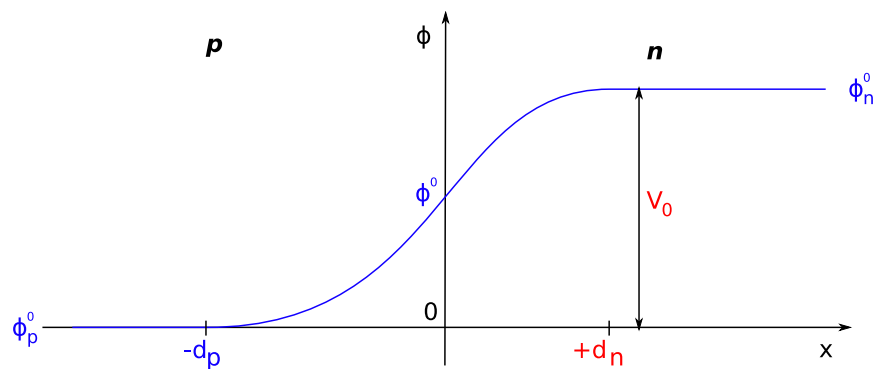
Rozkład potencjału i pola elektrycznego w obszarze złącza $p - n$ w stanie równowagi

W stanie równowagi zewnętrzne napięcie przyłożone do złącza jest równe zero.

Zakładamy, że w półprzewodnikach typu p i n występują całkowicie zjonizowane akceptory i donory o koncentracjach N_A i N_D , które zmieniają się skokowo w płaszczyźnie styku $p - n$, czyli w płaszczyźnie $x = 0$.



Rozkład ładunku przestrzennego na złączu $p - n$.

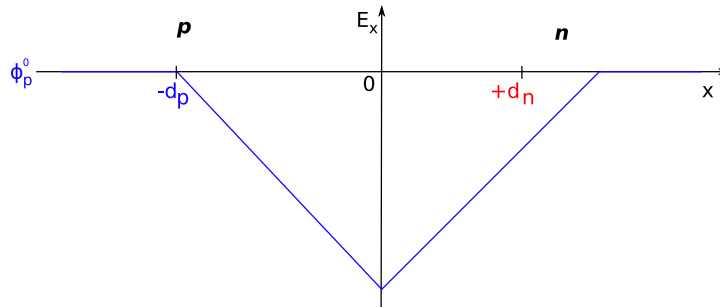


Rozkład potencjału na złączu $p - n$.

W stanie równowagi pomiędzy obszarami n i p występuje tzw. **napięcie wbudowane**

$$V_0 = \phi_n^0 - \phi_p^0. \quad (1)$$

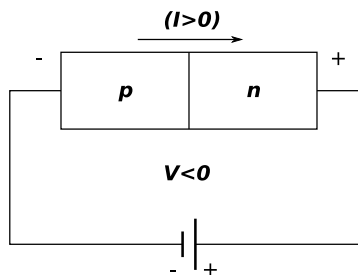
Napięcie wbudowane wytwarza w obszarze złącza **pole elektryczne**.



Składowa x -owa pola elektrycznego w obszarze złącza $p - n$.

1.2 Złącze $p - n$ z dołączonym zewnętrznym napięciem

Polaryzacja złącza w kierunku zaporowym



Polaryzacja złącza $p - n$ w kierunku zaporowym.

Polaryzacja złącza w kierunku zaporowym oznacza, że zewnętrzne źródło napięcia V podłączone jest biegunem ujemnym do półprzewodnika typu p , a dodatnim – do półprzewodnika typu n . Przyjmujemy umownie, że natężenie prądu płynącego z obszaru p do n ma znak $+$. Podobna umowa dotyczy znaku napięcia:

Napięcie wywołujące prąd z obszaru p do n ma znak $+$.

A zatem napięcie zewnętrzne V w kierunku zaporowym jest ujemne.

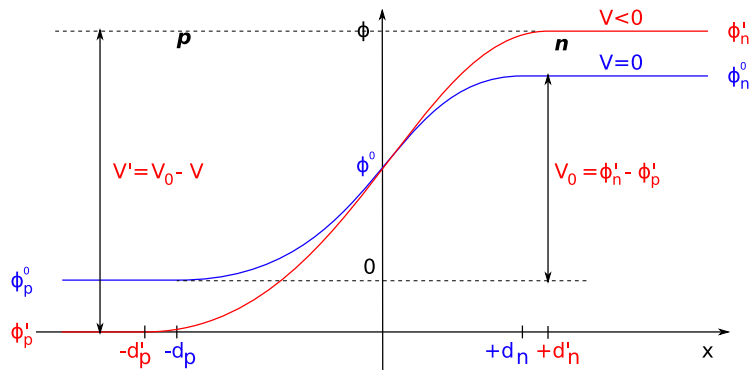
Po przyłożeniu napięcia V w kierunku zaporowym potencjały obszarów p i n ulegają zmianie, co prowadzi do następującej zmiany napięcia na złączu:

$$V_0 \longrightarrow V' ,$$

gdzie

$$V' = V_0 - V . \quad (2)$$

Dla kierunku zaporowego $V < 0$, a zatem $V' > V_0$.

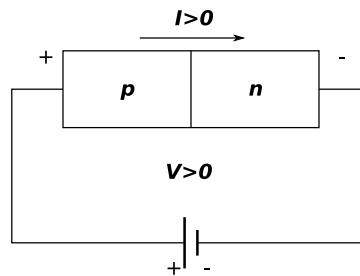


Profil potencjału w obszarze złącza $p - n$ spolaryzowanego w kierunku zaporowym.

Przyłożenie zewnętrznego napięcia w kierunku zaporowym prowadzi do następujących efektów:

- (1) wzrostu napięcia na złączu,
- (2) zwiększenia szerokości warstwy zubożonej w nośniki ładunku.

Polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia



Polaryzacja złącza $p - n$ w kierunku przewodzenia.

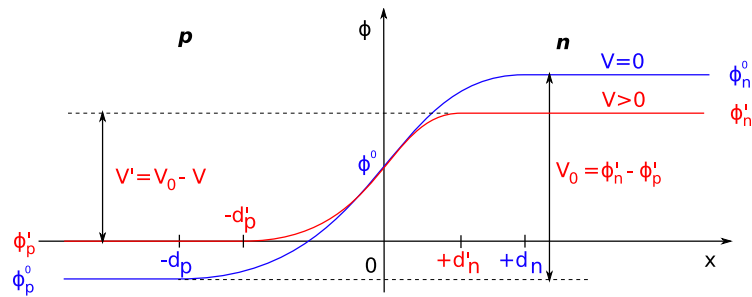
W tym przypadku zewnętrzne źródło napięcia podłączone jest biegunem dodatnim do półprzewodnika typu p , a ujemnym – do półprzewodnika typu n . Zatem napięcie zewnętrzne V ma znak dodatni.

Wskutek przyłożenia napięcia V w kierunku przewodzenia napięcie na złączu zmienia się następująco:

$$V' = V_0 - V . \quad (3)$$

A zatem w przypadku polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia napięcie wypadkowe

$$V' < V_0 .$$



Profil potencjału na złączu $p - n$ spolaryzowanym w kierunku przewodzenia.

Przyłożenie zewnętrznego napięcia w kierunku przewodzenia prowadzi do następujących efektów:

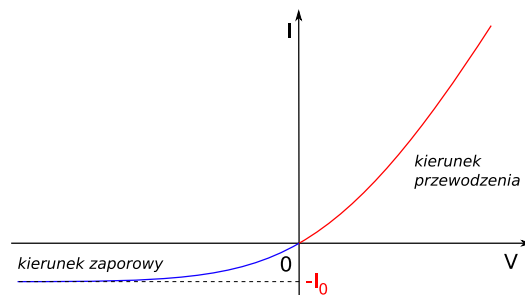
- (1) **obniżenia napięcia na złączu,**
- (2) **zmniejszenia szerokości warstwy zubożonej w nośniki ładunku.**

1.3 Przepływ prądu przez złącze $p - n$

Natężenie prądu płynącego przez złącze $p - n$ opisane jest **wzorem Shockleya**

$$I = I_0 \left[e^{eV/(k_B T)} - 1 \right] , \quad (4)$$

gdzie I_0 jest **maksymalnym natężeniem prądu płynącego w kierunku zaporowym.**



Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza $p-n$. $I_0 = 1\mu\text{A}$ dla Ge, $I_0 = 1 \div 10 \text{ nA}$ dla Si.

Dyskusja

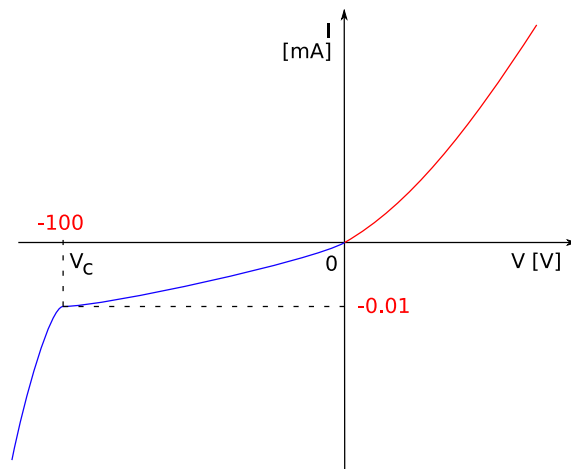
- (1) Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza $p-n$ jest asymetryczna względem zewnętrznego napięcia V .
- (2) Dla $V > 0$ natężenie prądu $I = I(V)$ jest szybko rosnącą funkcją napięcia zewnętrznego V . Przypadek ten odpowiada **kierunkowi przewodzenia złącza $p-n$** .
- (3) Jeżeli $V < 0$, to mamy do czynienia z **kierunkiem zaporowym złącza $p-n$** .
Jeżeli $V \rightarrow \infty$, to $I \rightarrow -I_0$.

Podsumowując widzimy, że złącze $p-n$ działa jak **dioda prostownicza**.

Jeżeli do diody $p-n$ podłączymy odpowiednio wysokie napięcie w kierunku zaporowym, czyli $V \ll 0$, to dioda ulegnie **przebicciu**.

Przyczyny przebiccia diody:

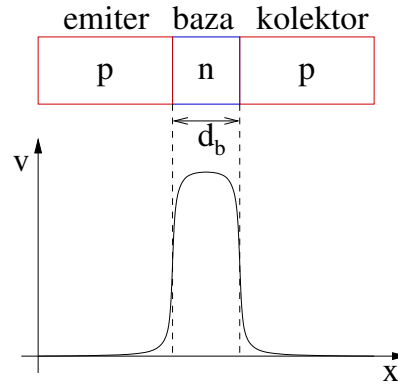
- (1) **przepływ prądu tunelowego (zjawisko Zenera)**,
- (2) **jonizacja lawinowa**.



Przebicie diody $p-n$ wskutek **tunelowego efektu Zenera i jonizacji lawinowej**.

2 Tranzystor bipolarny

Rozważamy strukturę *pn*p, która w stanie równowagi posiada rozkład potencjału, pokazany na rysunku.



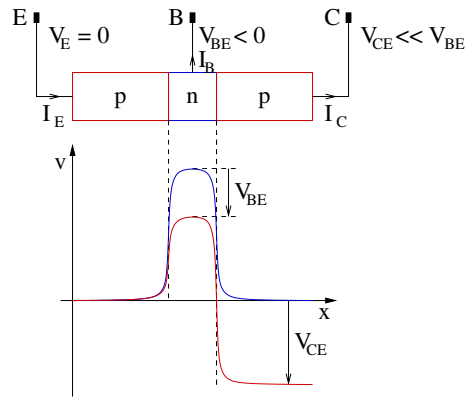
Schemat struktury *pn*p i profil potencjału.

W strukturze *pn*p (lub *npn*) wystąpi **efekt tranzystorowy**, jeżeli:

- (1) Jedno złącze (**złącze emiter-baza**) jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a drugie złącze (**złącze baza-kolektor**) jest spolaryzowane w kierunku zaporowym.
- (2) Grubość bazy ($d_b \simeq 10^{-6} \div 10^{-5}$ m) jest znacznie mniejsza od średniej drogi swobodnej ($l \simeq 10^{-5} \div 10^{-4}$ m) nośników większościowych emitera.
- (3) Koncentracja nośników ładunku w emiterze jest znacznie większa od koncentracji nośników ładunku w bazie. W praktycznej realizacji prowadzi do tego, że prąd płynący od strony emitera do bazy jest $10^3 \div 10^5$ razy większy niż prąd płynący od strony bazy do emitera.

Właściwe działanie tranzystora *pn*p zapewnione jest po przyłożeniu następujących napięć:

- napięcie przyłożone do emitera $V_E = 0$ (napięcie odniesienia)
- napięcie baza-emiter $V_{BE} < 0$
- napięcie kolektor-emiter $V_{CE} \ll V_{BE}$, czyli $|V_{CE}|$ jest duże



Rozkład potencjału w działającym tranzystorze *pnp*.

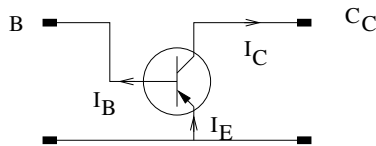
Dla rozkładu potencjału pokazanego powyżej znaczna część prądu emitera I_E dociera przez bazę do kolektora

$$I_{EBC} = \alpha I_E \quad (5)$$

I_{EBC} = natężenie prądu w obwodzie emiter-baza-kolektor α = współczynnik wzmacnienia prądowego ($\alpha \simeq 0.95 \div 0.99$)

Ponadto w obwodzie płynie prąd I_{BC} przez spolaryzowane zaporowo złącze baza-kolektor. Jest to prąd **nośników mniejszościowych** (dla struktury *pnp* są to dziury).

Obwód elektryczny ze wspólnym emiterem



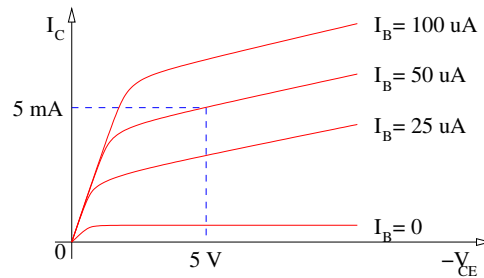
Schemat obwodu ze wspólnym emiterem.

Bilans prądów dla obwodu ze wspólnym emiterem

$$I_E = I_B + I_C \quad (6)$$

W obwodzie ze wspólnym emiterem otrzymujemy bardzo duże **wzmocnienie prądowe**, czyli

$$I_C \gg I_B \quad (7)$$



Statyczne charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora *pnp* w układzie wspólnego emitera.

Uwagi

- Tranzystor pracuje na stromej części charakterystyki $I_E(V_{BE})$. Jest to kierunek przewodzenia baza-emiter.
- Dyskutowany układ jest **układem sterowanym przez bazę**, w którym mała zmiana potencjału bazy V_{BE} powoduje duże zmiany prądów emitera I_E i kolektora I_C .
- Wynika stąd, że tranzystor działa jak **wzmacniacz prądu**, w którym niewielki prąd bazy I_B wywołuje duży prąd kolektora I_C .

3 Tranzystory unipolarne

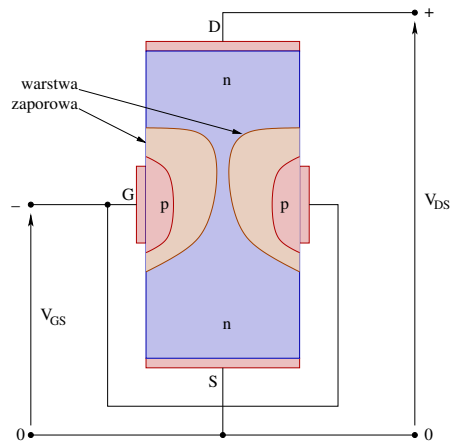
W tranzystorach istotny jest przepływ tylko jednego rodzaju nośników ładunku (elektronów lub dziur). O wystąpieniu efektu tranzystorowego decyduje wpływ pola elektrycznego elektrody bramki. Zatem tranzystory unipolarne nazywane są często **tranzystorami polowymi**.

(angielska nazwa: **FET = Field Effect Transistor**)

3.1 Tranzystory złączone

Inna nazwa tranzystora złączonego: **tranzystor unipolarny ze złączem *pn***.

Schemat jego budowy pokazany jest na rysunku.



Schemat budowy tranzystora złączowego. Oznaczenia elektrod: **G = bramka (Gate)**, **D = Dren (ujście)**, **S = źródło (Source)**.

W unipolarnym tranzystorze złączowym w obszarze półprzewodnika typu n tworzy się **kanał przewodzenia**, przez który płynie prąd elektronowy ze źródła S do drenu D. Oba złącza pn w pobliżu bramek G są spolaryzowane w kierunku zaporowym napięciem V_{GS} . Oznacza to, że opór wejściowy tranzystora jest bardzo duży. Jeżeli napięcie dren-źródło $V_{DS} > 0$, to złącza pn wzdłuż kanału przewodzenia są spolaryzowane napięciem zwiększającym się od źródła S do drenu D. Napięcie wzdłuż kanału przewodzenia rośnie w przybliżeniu liniowo od wartości $V = 0$ dla źródła S do wartości $V = V_{DS}$ dla drenu D.

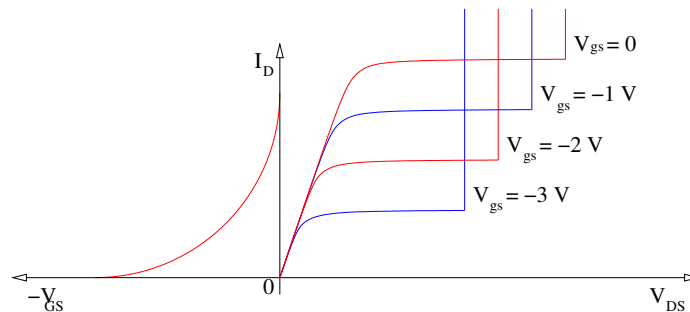
Liniowy wzrost napięcia powoduje, że warstwa zaporowa (obszar zubożony w nośniki ładunku) rozszerza się od S do D, a zatem szerokość kanału przewodzenia maleje, co prowadzi do **wzrostu oporu elektrycznego kanału**, czyli do **zamykania kanału**.

Całkowite zamknięcie kanału nie następuje, lecz pozostaje w nim szczelina o bardzo małej szerokości. Występuje wtedy **nasycenie** charakterystyki prądowo-napięciowej. Oznacza to, że powyżej pewnego napięcia V_{DS} zachodzi

$$I_D = f(V_{DS}) \longrightarrow const \quad (8)$$

dla ustalonego napięcia bramki $V_{GS} = V_{off}$. Nasycenie zachodzi przy tzw. **napięciu odcięcia** V_{off} bramki względem źródła.

Dla bardzo dużych napięć V_{DS} następuje **przebiecie złącza pn bramka-kanał**.



Statyczna charakterystyka prądowo-napięciowa unipolarnego tranzystora złączowego.

Własności unipolarnych tranzystorów złączowych

- (1) W liniowym obszarze charakterystyki $I_D(V_{DS})$ uzyskujemy możliwość zmiany oporu elektrycznego przyrządu, która jest sterowana napięciem bramki V_{GS} .
- (2) W obszarze nasycenia prąd drenu I_D może być modulowany napięciem bramki V_{GS} analogicznie jak prąd anodowy był modulowany napięciem siatki w dawnej próżniowej lampie elektronowej (triodzie).
- (3) Porównanie z tranzystorem bipolarnym: w tranzystorze bipolarnym prąd kolektora modulowany jest prądem bazy, w tranzystorze unipolarnym w celu modulacji prądu drenu wystarczy zmieniać napięcie bramki, co jest korzystniejszym sposobem modulacji prądu.

3.2 Tranzystory unipolarne z izolowaną bramką

Główne typy tych tranzystorów:

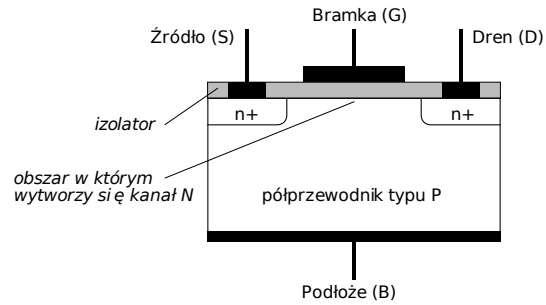
- **tranzystory MIS (Metal-Insulator-Semiconductor)**
- **tranzystory MOS (Metal-Oxide-Semiconductor)** (izolatorem jest SiO_2) inaczej zwane **MOSFET**

Budowa tranzystora typu n -MOS (tranzystora MOS z kanałem przewodzenia typu n)

W tranzystorze tym nośnikami prądu są elektrony.

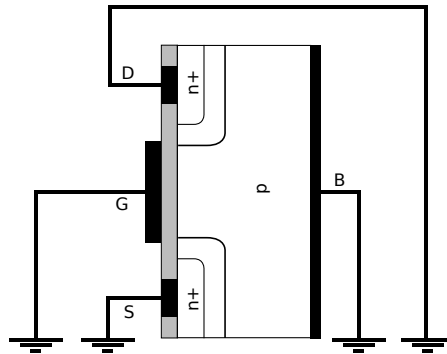
- Konstrukcja tranzystora MOS jest w pewnym stopniu analogiczna do kondensatora: jedną okładkę kondensatora stanowi metaliczna bramka, izolatorem jest warstwa SiO_2 , drugą okładkę kondensatora stanowi domieszkowany półprzewodnik typu p (najczęściej p -Si).

- Obszary półprzewodnika przyległe do elektrod źródła i drenu są silnie domieszkowane donorami, czyli są to warstwy typu n^+ .

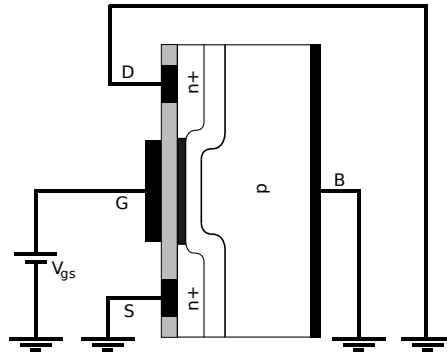


Schemat budowy tranzystora n -MOS. S, G, D = metalowe elektrody, izolatorem jest SiO_2 , n^+ = półprzewodnik silnie domieszkowany donorami, p = półprzewodnik normalnie domieszkowany akceptorami.

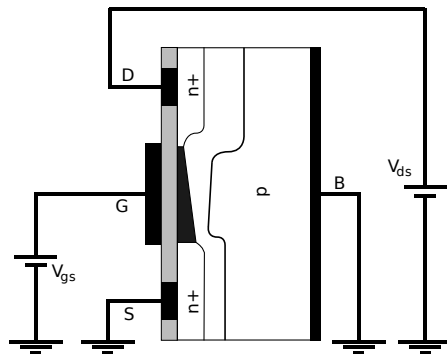
Działanie tranzystora n -MOS



(a) Wszystkie napięcia są równe zero, czyli $V_{GS} = V_{DS} = 0$, pomiędzy obszarami typu n^+ i p istnieje **warstwa zaporowa zubożona w nośniki**. Opór elektryczny obszaru pomiędzy źródłem i drenem jest bardzo duży.



(b) Bramka spolaryzowana dodatnio względem podłoża (źródła), czyli $V_{GS} > 0$, napięcie źródło-dren $V_{DS} = 0$, pomiędzy obszarami typu n^+ w pobliżu bramki G powstaje **kanał przewodzenia typu n** o dużej koncentracji elektronów.



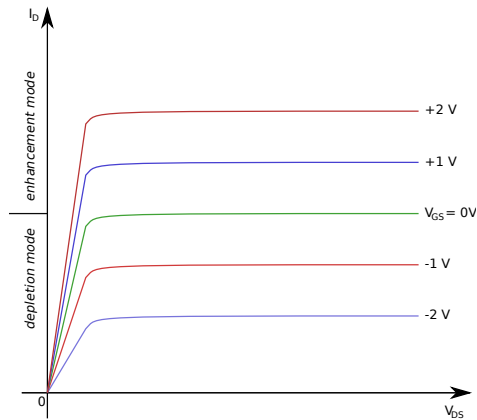
(c) Bramka spolaryzowana dodatnio względem podłoża ($V_{GS} > 0$), dren spolaryzowany dodatnio względem źródła ($V_{DS} > 0$). Następuje **zwiększenie szerokości warstwy zaporowej**, przy czym szerokość ta rośnie przy zbliżaniu się do drenu \implies kanał przewodzenia przyjmuje **kształt klinowaty**, co prowadzi do **zamykania kanału przewodzenia**.

Zwężenie kanału przewodzenia prowadzi do **nasycenia charakterystyki**, czyli

$$I_D = f(V_{DS}) \longrightarrow const \text{ dla } V_{GS} = const$$

Sposoby (mody) pracy tranzystora n -MOS

- (1) $V_{GS} > 0$: praca ze **wzbogaceniem** kanału przewodzenia w nośniki ładunku
- (2) $V_{GS} < 0$: praca ze **zubożeniem** kanału przewodzenia w nośniki ładunku



Charakterystyki statyczne tranzystora *n*-MOS.

4 Zastosowania

- prostowniki prądu zmiennego (dioda na złączu *p – n*)
- wzmacniacze prądu (tranzystory)
- sterowanie prądem (tranzystory)
- elementy pamięci
 - pamięci ulotne (volatile memories): DRAM (Dynamic Access Random Memory) oraz SRAM (Static Random Access Memory)
 - pamięci nieulotne (nonvolatile memories): EPROM (Erasable-Programmable Read-Only Memory), EEPROM (Electrically Erasable-Programmable Read-Only Memory)
- obwody scalone: VLSI (Very Large Scale Integration): liczba składników (tranzystorów)/chip = $10^5 \div 10^7$, ULSI (Ultra Large Scale Integration): liczba składników (tranzystorów)/chip $> 10^7$.

Najnowsze przyrządy:

- **nanoelektroniczne**: rozmiary tranzystorów < 100 nm
- **spintroniczne**: prądy spolaryzowane spinowo \equiv transport spinu elektronu
- **kwantowe elektroniczne**: tranzystory jednoelektronowe, \implies **Single-Electron Memory Cell (pamięć jednoelektronowa zrealizowana w temperaturze pokojowej!!!)**
- **kwantowe optyczne**: jednofotonowe źródła światła