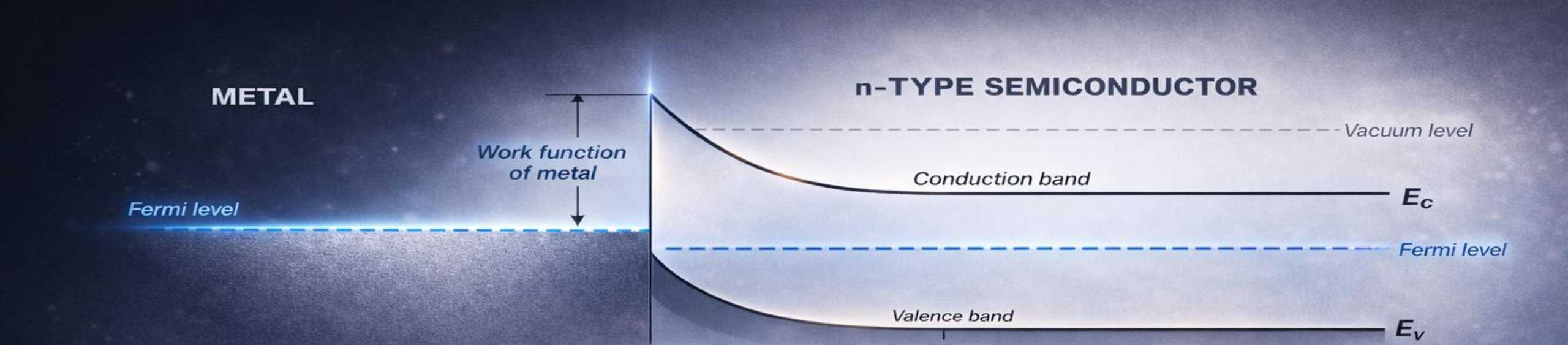




WYKŁAD 4

Kontakt Schottky'ego. Diagram pasmowy. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody Schottky'ego oraz kontaktu omowego. Model idealnego i rzeczywistego złącza Schottky'ego.

Eunika Zielony



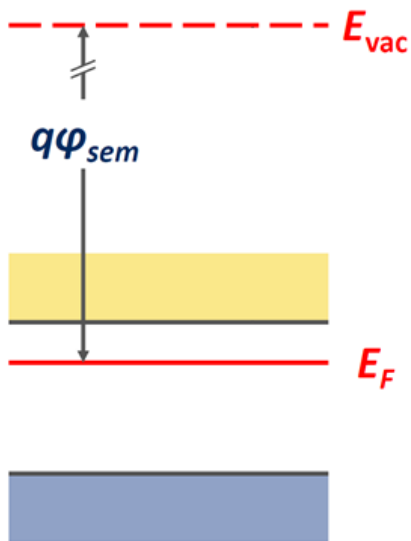
Złącze metal-półprzewodnik

Półprzewodnik typu n

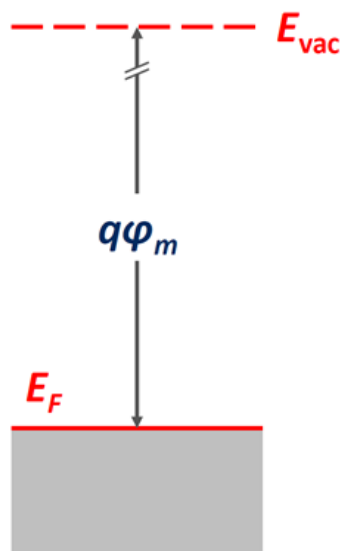
Kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

Kontakt omowy $\rightarrow \varphi_m < \varphi_{sem}$

φ_m - praca wyjścia elektronów z metalu; φ_{sem} - praca wyjścia elektronów z półprzewodnika



n-typu

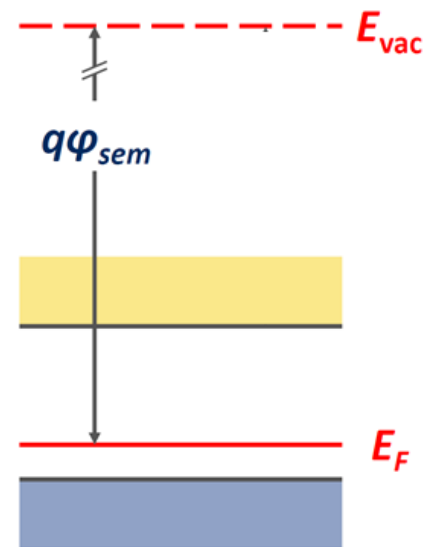


metal

Półprzewodnik typu p

Kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m < \varphi_{sem}$

Kontakt omowy $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

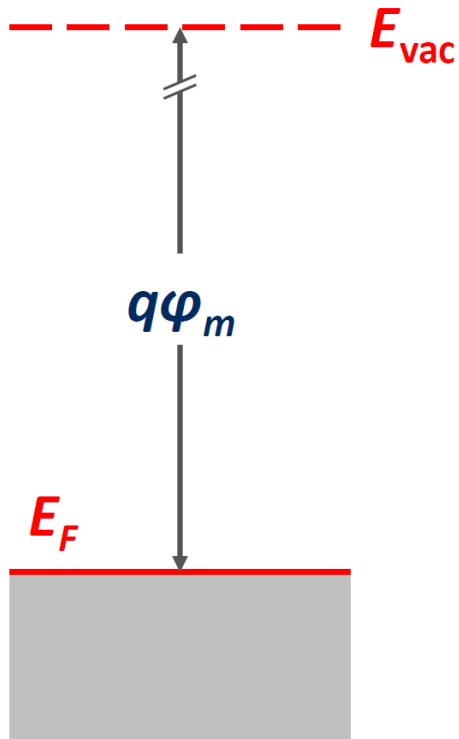


p-typu

Metal-półprzewodnik typu n – powstawanie złącza

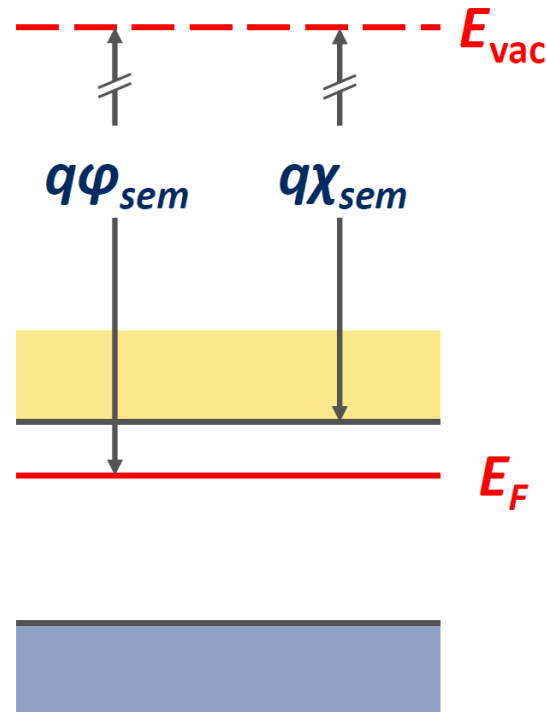
Rozważmy kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

Przed połączeniem



φ_m - praca wyjścia elektronów z metalu

φ_{sem} - praca wyjścia elektronów z półprzewodnika



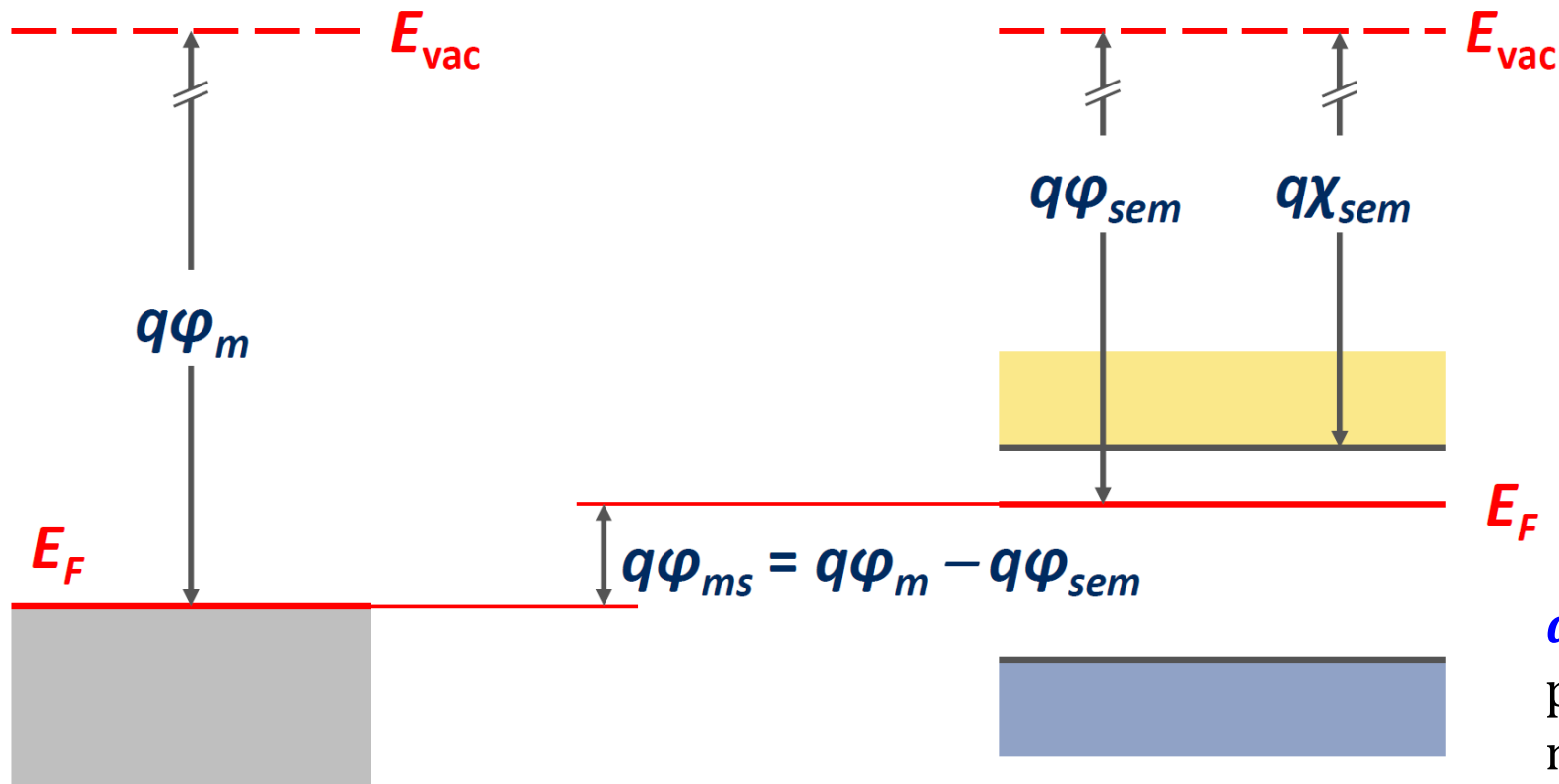
χ_{sem} – powinowactwo elektronowe dla półprzewodnika

E_{vac} – poziom próżni

Metal-półprzewodnik typu n – powstawanie złącza

Kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

Przed połączeniem



$q\varphi_{ms}$ – praca wyjścia złącza metal-półprzewodnik $\rightarrow$ patrz różnica między położeniem E_F

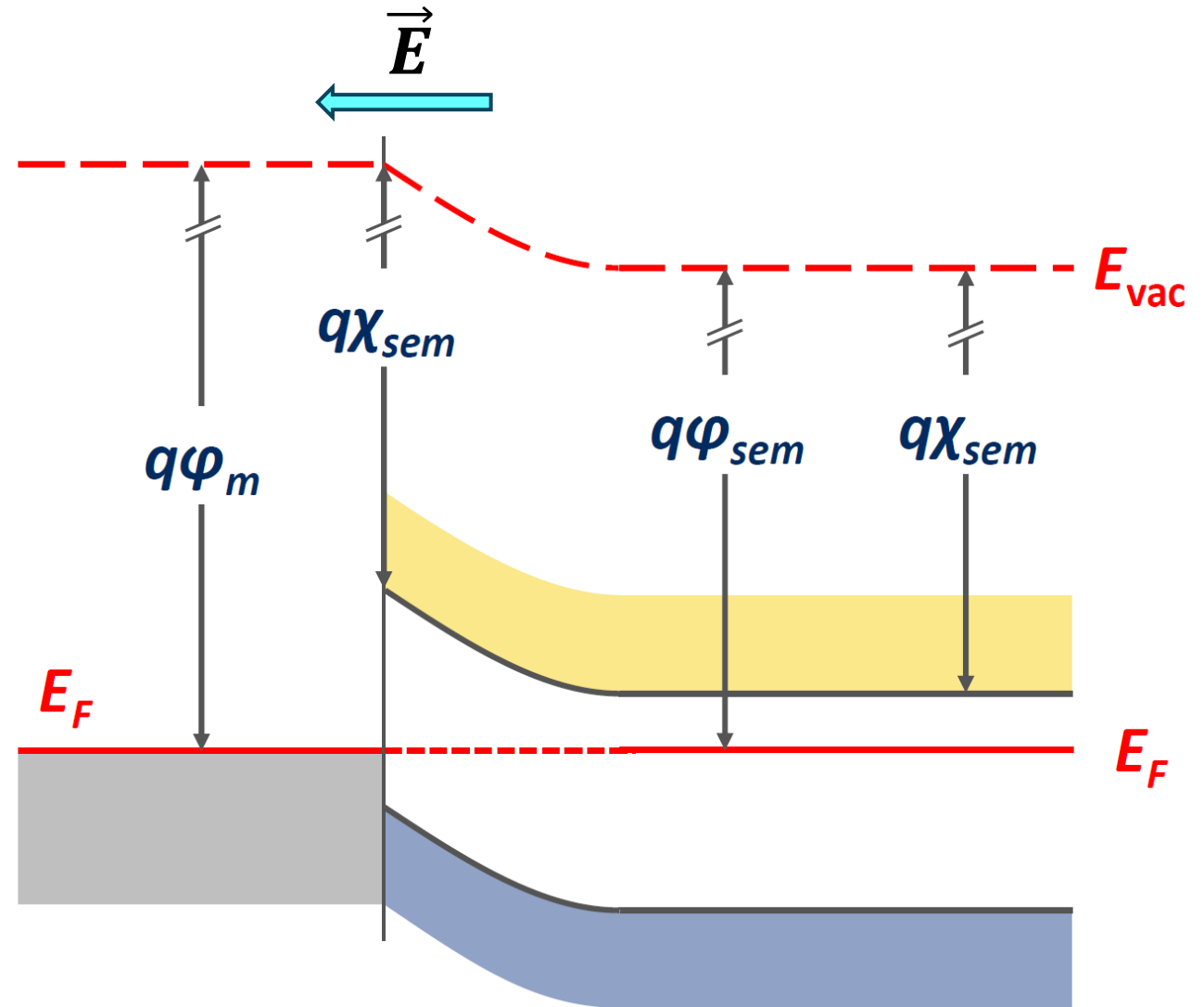
Złącze metal-półprzewodnik typu n – kontakt Schottky'ego

Kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

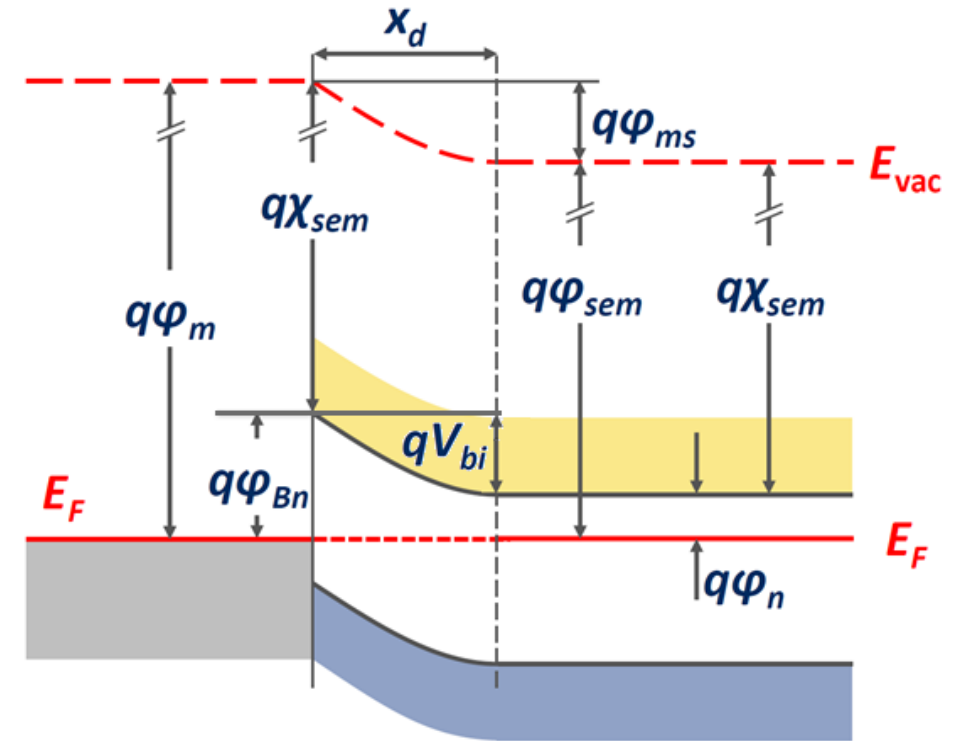
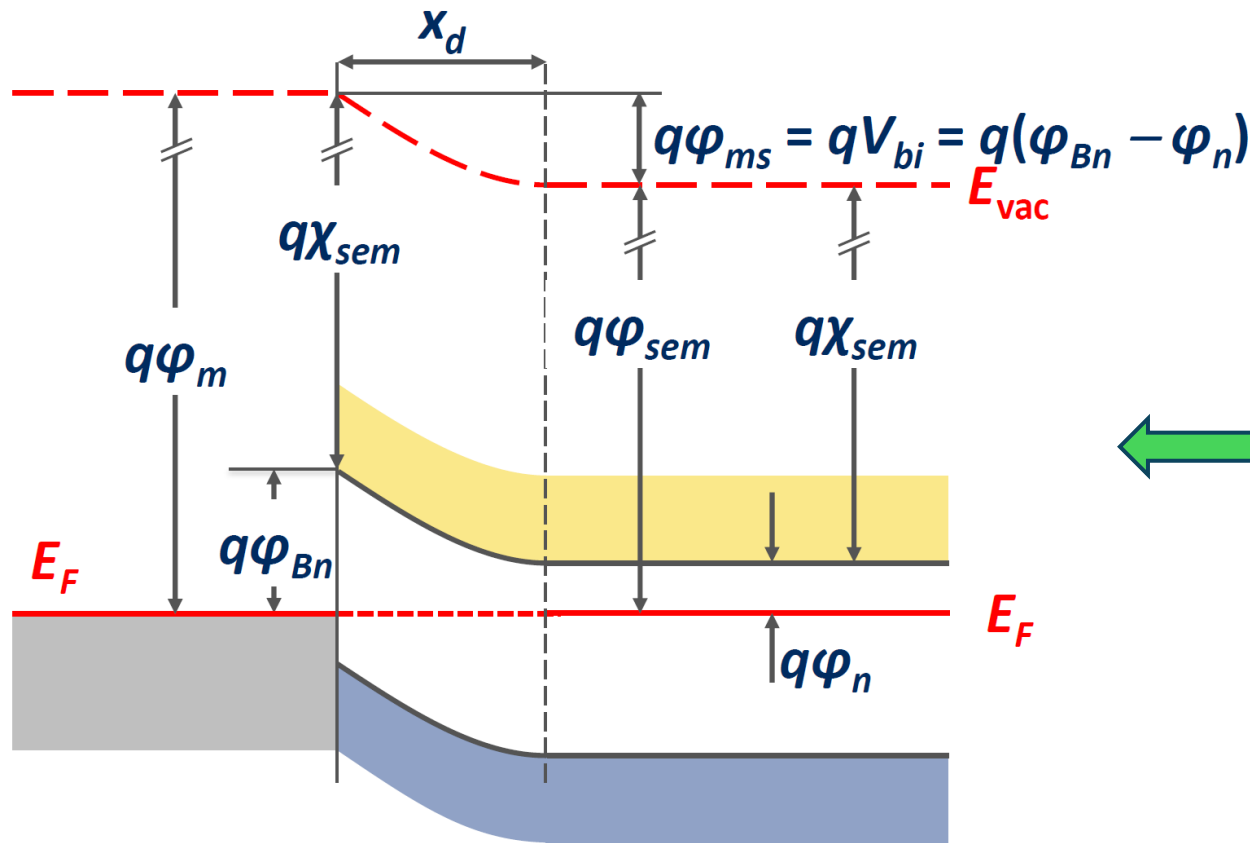
Po połączeniu



Uwaga: W tym przypadku elektrony będą przechodziły z półprzewodnika do metalu (bo półprzewodnik ma mniejszą pracę wyjścia). W związku z tym metal naładuje się ujemnie a półprzewodnik dodatnio.



Złącze metal-półprzewodnik typu n – kontakt Schottky'ego



ϕ_n – różnica potencjałów pomiędzy położeniem poziomu Fermiego w półprzewodniku a krawędzią pasma przewodnictwa

Bariera potencjału od str. metalu

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi_{sem})$$

To są dwie różne bariery !!!!

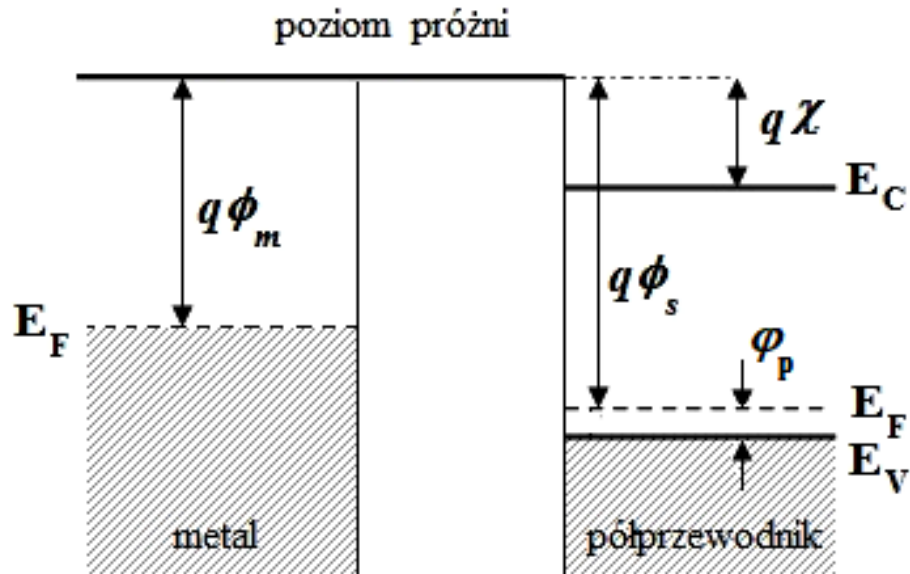
Bariera potencjału od str. półprzewodnika

$$qV_{bi} = q(\phi_m - \phi_{sem}) = q(\phi_{Bn} - \phi_n)$$

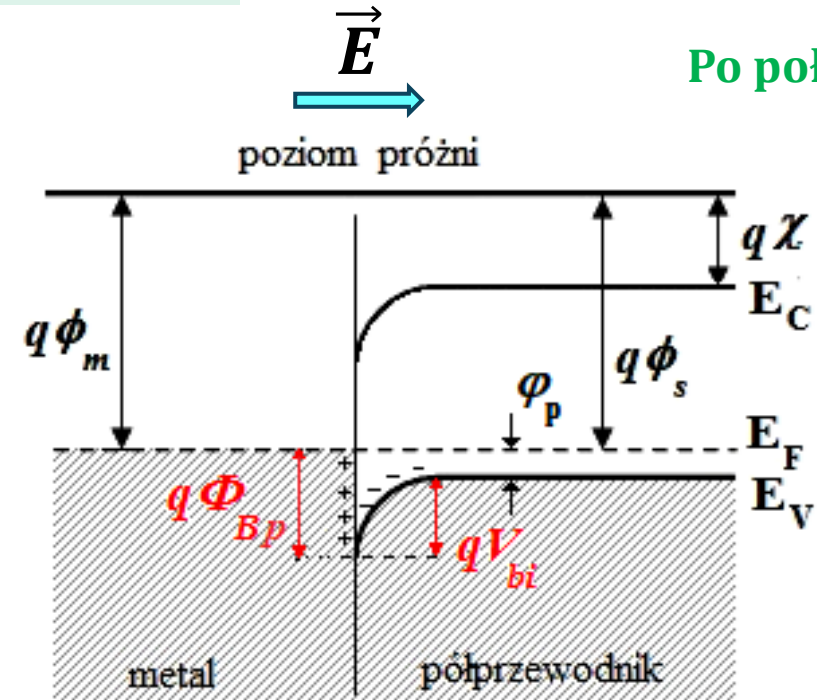
Złącze metal-półprzewodnik typu p – kontakt Schottky'ego

Rozważmy kontakt prostujący (Schottky'ego) $\rightarrow \varphi_m < \varphi_{sem}$

Przed połączeniem



Po połączeniu



Bariera potencjału od str. półprzewodnika

$$qV_{bi} = q(\varphi_{Bp} - \varphi_p)$$

φ_p – różnica potencjałów pomiędzy położeniem poziomu Fermiego w półprzewodniku a krawędzią pasma walencyjnego

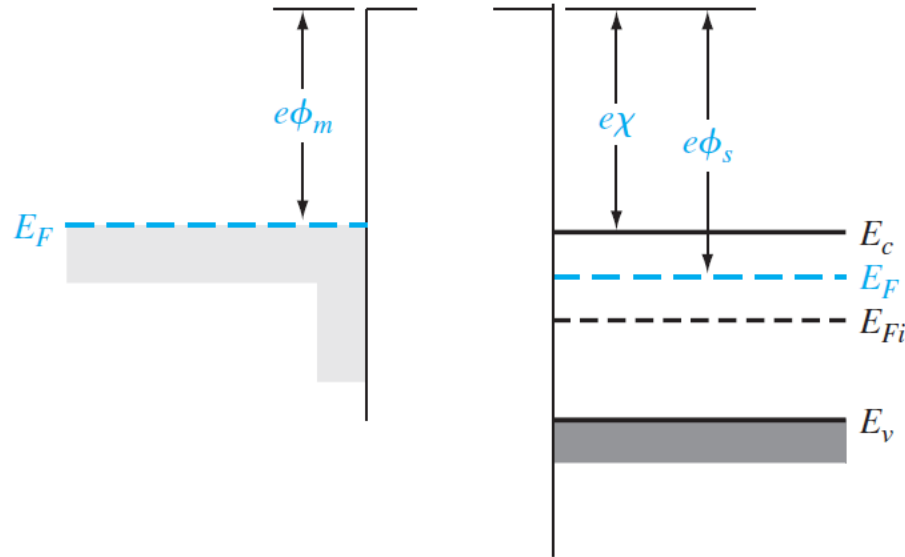
$q\phi_{Bp}$ – bariera potencjału od str. metalu

Uwaga: W tym przypadku elektrony będą przechodziły z metalu do półprzewodnika (bo metal ma mniejszą pracę wyjścia). W związku z tym półprzewodnik naładowuje się ujemnie a metal dodatnio. Za wygięcie pasm w półprzewodniku odpowiada pole elektryczne o natężeniu $\vec{E}$.

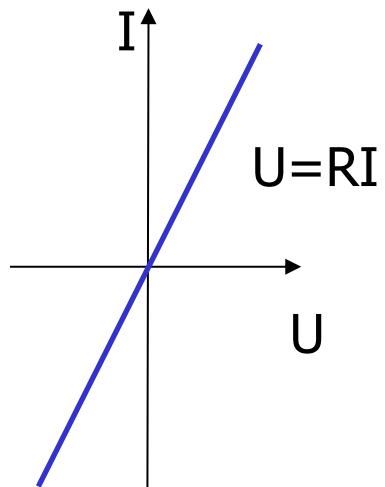
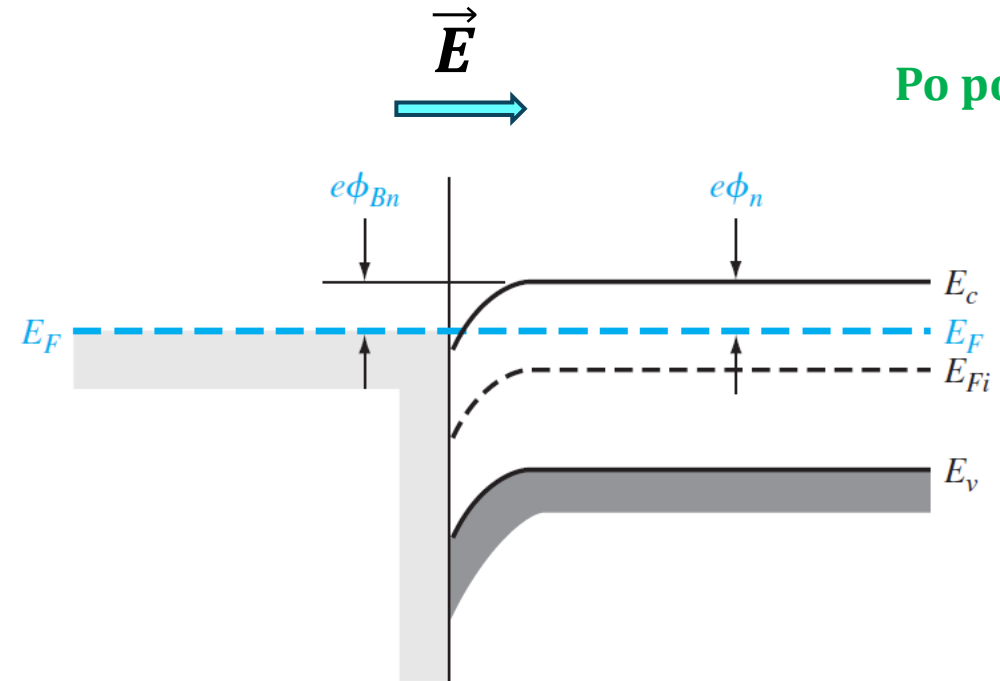
Złącze metal-półprzewodnik typu n – kontakt omowy

Kontakt omowy $\rightarrow \varphi_m < \varphi_{sem}$

Przed połączeniem



Po połączeniu



Ponieważ: $\varphi_{Bn} = \varphi_n$ to $qV_{bi} = q(\varphi_{Bn} - \varphi_n) = 0$

Kontakt omowy

charakteryzuje się niską opornością i liniową charakterystyką prądowo-napięciową (I-V).
Złącze zachowuje się jak **rezystor**.

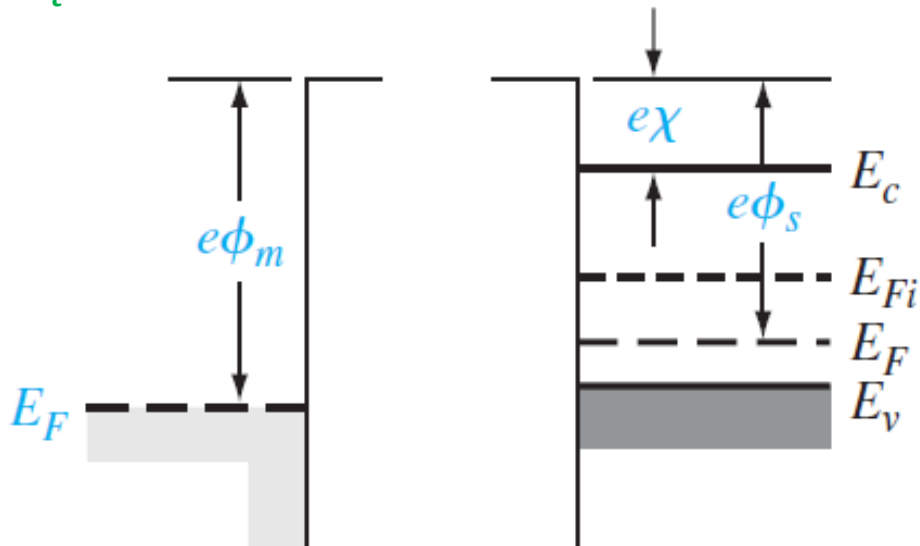
Nie ma bariery potencjału dla elektronów przepływających z półprzewodnika do metalu.



Złącze metal-półprzewodnik typu p – kontakt omowy

Rozważmy kontakt omowy $\rightarrow \varphi_m > \varphi_{sem}$

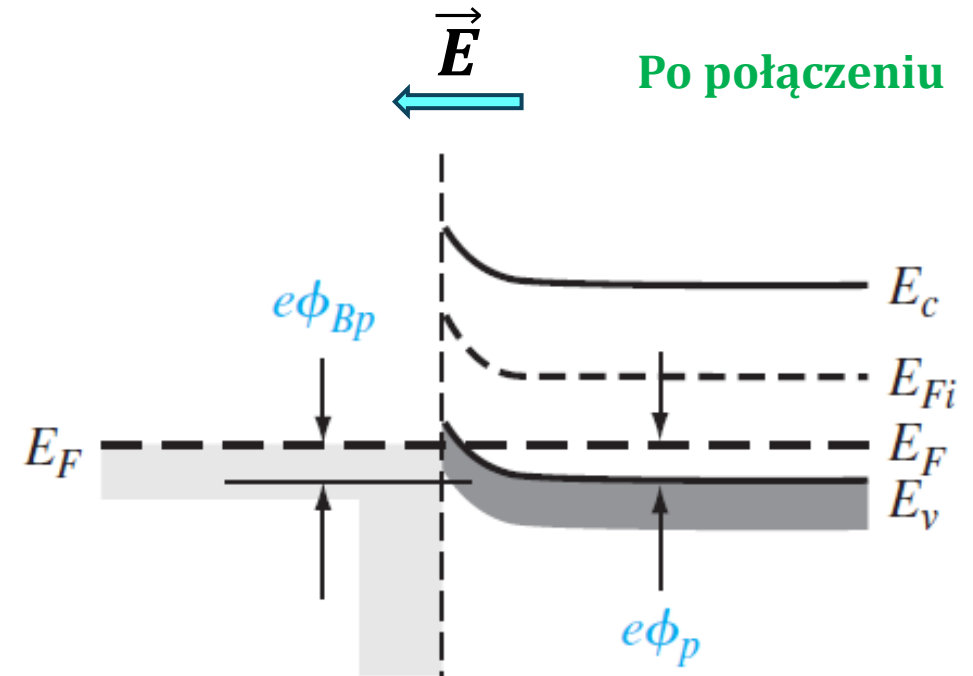
Przed połączeniem



W tym przypadku również nie ma qV_{bi} od strony półprzewodnika, bo:

$$\varphi_{Bp} = \varphi_p \text{ to } qV_{bi} = q(\varphi_{Bp} - \varphi_p) = 0$$

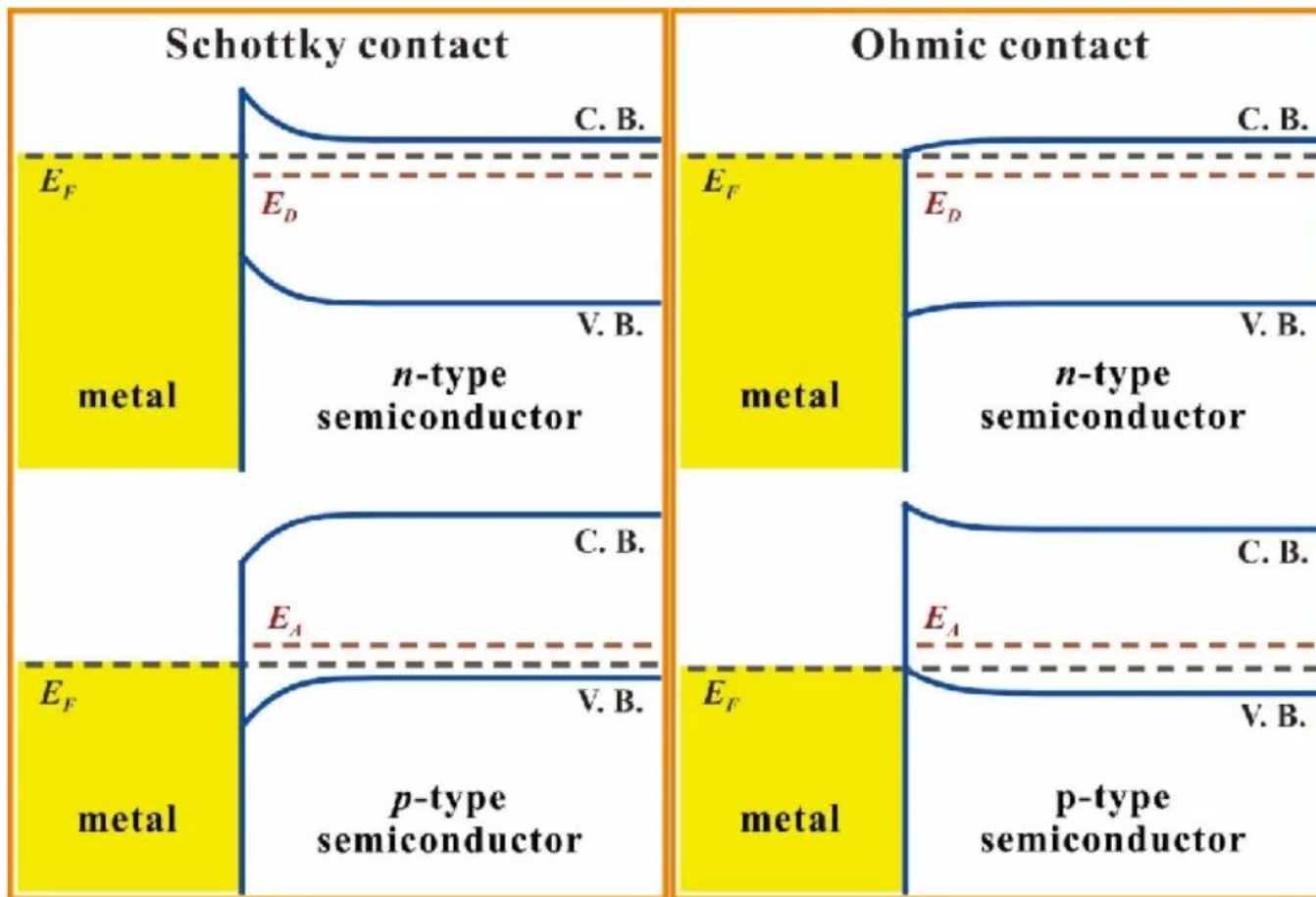
Po połączeniu



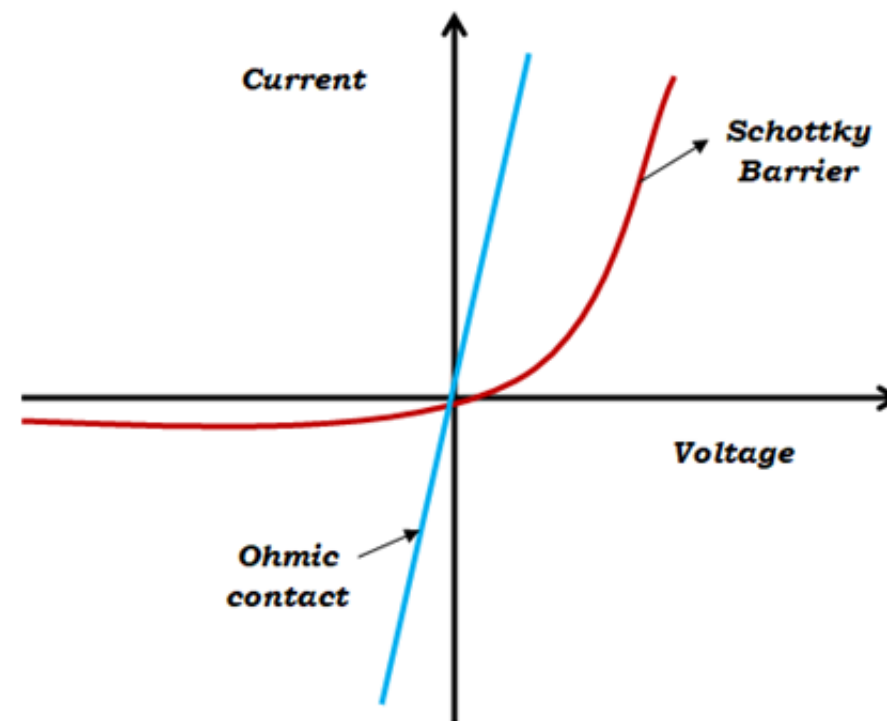
φ_p – różnica potencjałów pomiędzy położeniem poziomu Fermiego w półprzewodniku a krawędzią pasma walencyjnego

$q\phi_{Bp}$ – bariera potencjału od str. metalu

Diagramy pasmowe kontaktów prostujących i omowych - porównanie



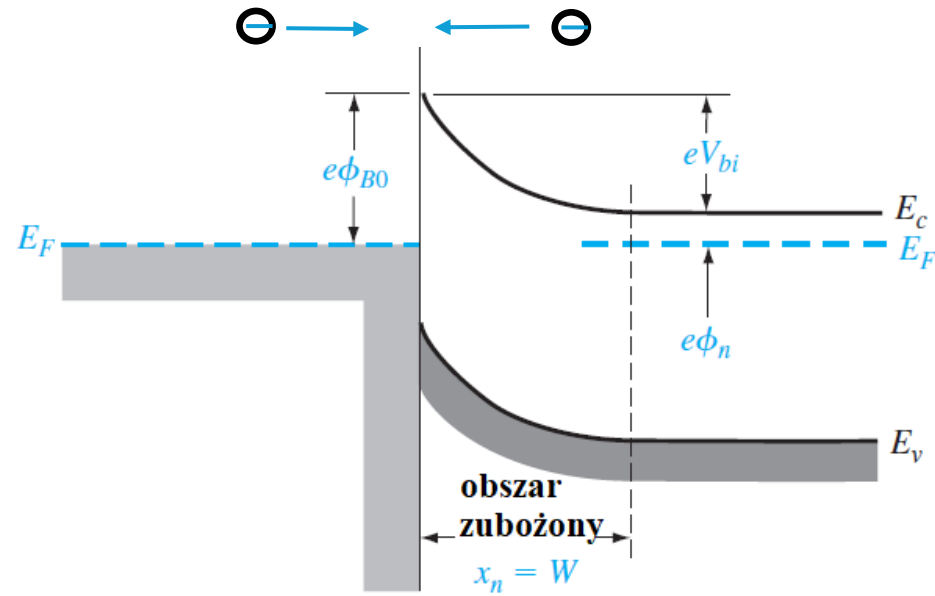
Cecha	Kontakt Schottky'ego	Kontakt omowy
Bariera	jest	brak
Zagięcie pasm	duże	małe
Prąd	jednokierunkowy	w obie strony
Zachowanie	dioda	rezystor



Polaryzacja diody Schottky'ego

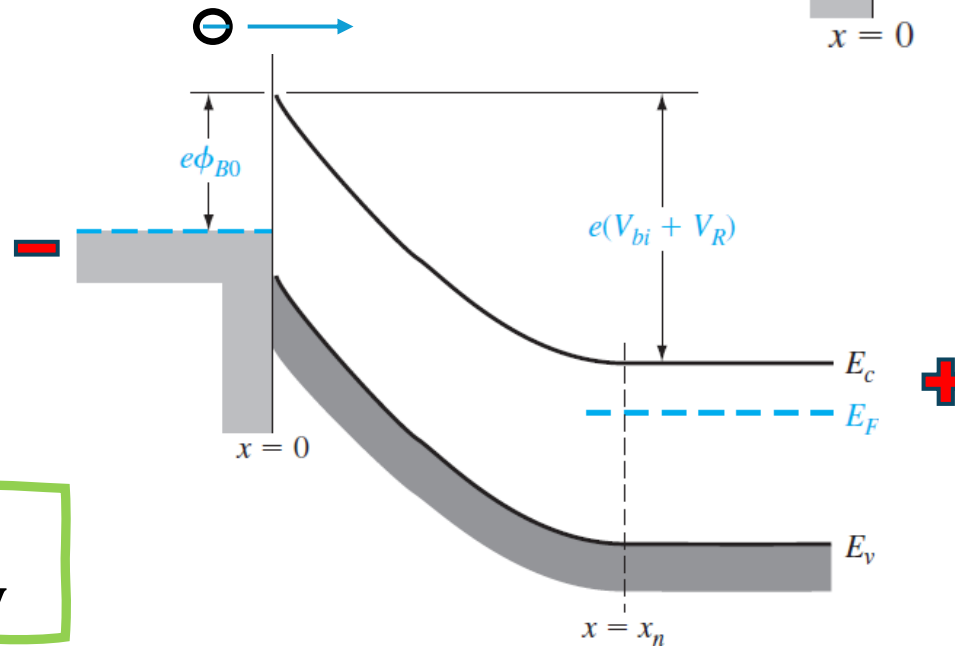
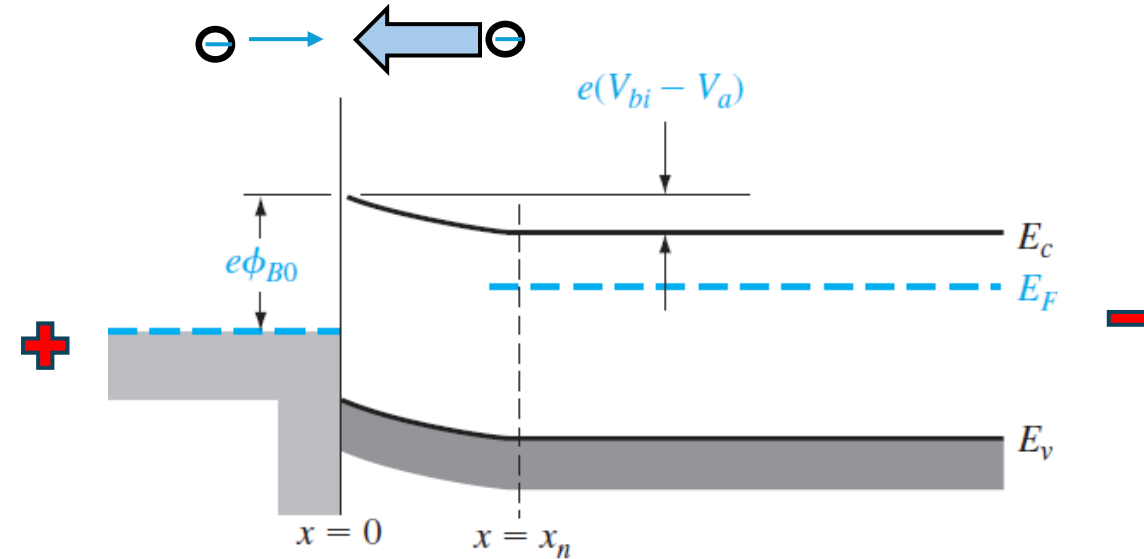
$$V = 0$$

$$I_{m-s} = I_{s-m}$$



$$V > 0$$

$$I_{m-s} \ll I_{s-m}$$



$$V < 0$$

$$I_{s-m} \ll I_{m-s}$$

Uwaga: strzałki oznaczają kierunek strumienia elektronów

Charakterystyka prądowo-napięciowa (I-V) diody Schottky'ego

Koncentracja elektronów w pasmie przewodnictwa półprzewodnika:

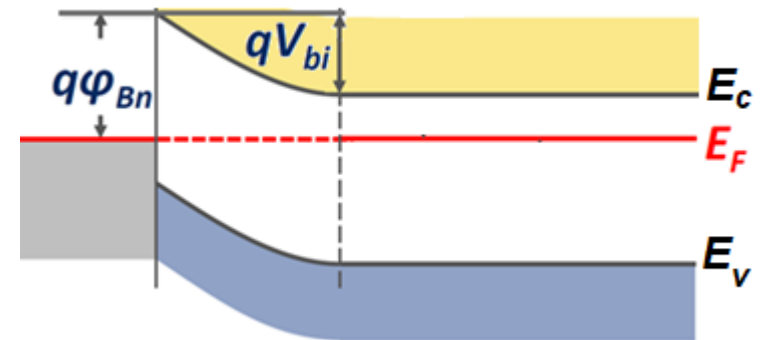
$$n = N_C \exp \left[-\frac{(E_C - E_F)}{kT} \right]$$

Koncentracja elektronów, które pokonają barierę potencjału:

$$n = N_C \exp \left[-\frac{(E_C - E_F + qV_{bi})}{kT} \right] = N_C \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right)$$

Dla złącza w stanie równowagi termodynamicznej:

$$I_{s-m} = I_{m-s} = C N_C \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right), \text{ gdzie } C - \text{to stała}$$



Charakterystyka I-V diody Schottky'ego – c.d.

Po spolaryzowaniu złącza w kierunku przewodzenia:

$$n = N_C \exp \left[-\frac{q(\varphi_{Bn} - V_a)}{kT} \right]$$

Całkowity prąd płynący w kierunku przewodzenia:

$$I = I_{s-m} - I_{m-s} = C N_C \exp \left[-\frac{q(\varphi_{Bn} - V_a)}{kT} \right] - C N_C \exp \left(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT} \right)$$

Czyli można zapisać, że:

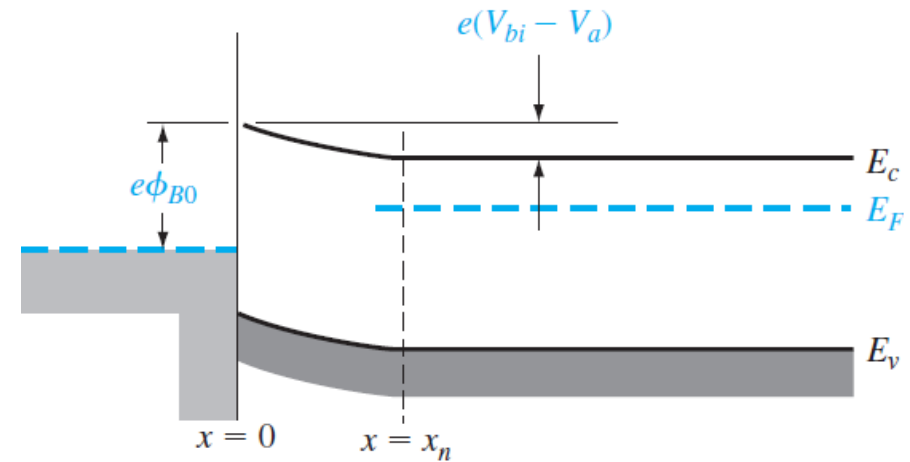
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right]$$

gdzie I_0 - to prąd nasycenia (prąd wsteczny!)

$$I_0 = C N_C \exp \left(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT} \right) = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT} \right)$$

A^* - stała Richardsona (stała materiałowa)

$$A^* \equiv \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3}$$



Charakterystyka I-V diody Schottky'ego – c.d.

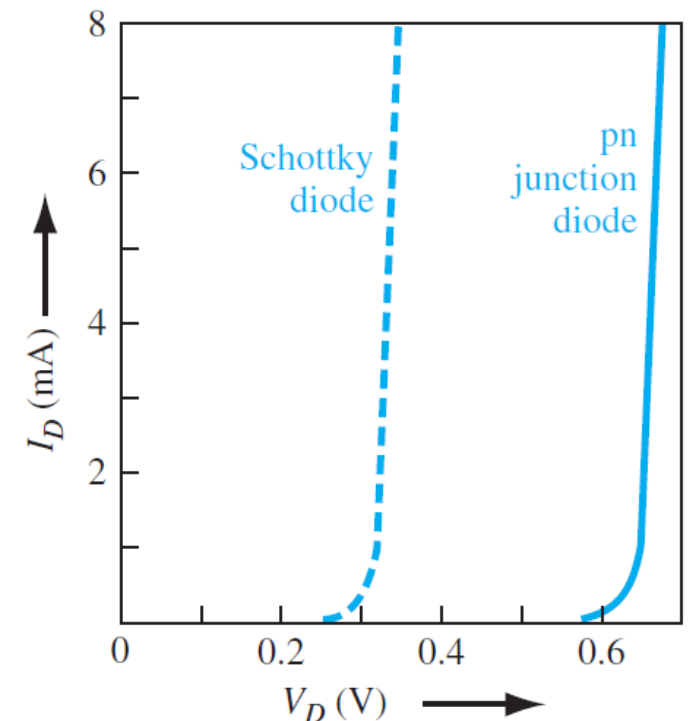
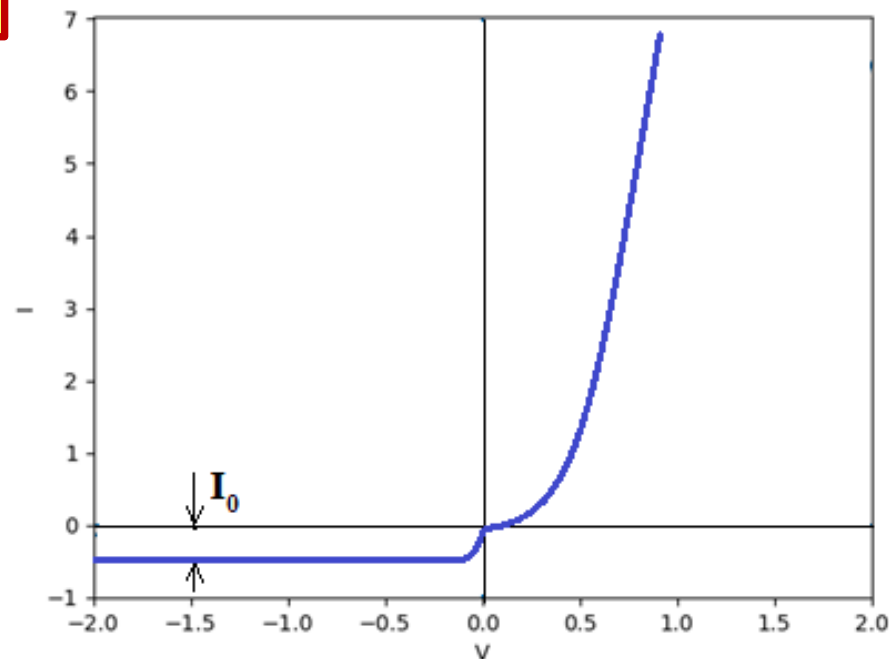
Ponieważ prąd płynący w kierunku zaporowym:

$$I_{s-m} \ll I_{m-s}$$

oraz $I_{m-s} = C N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) = I_0$

To całkowity prąd płynący w kierunku zaporowym:

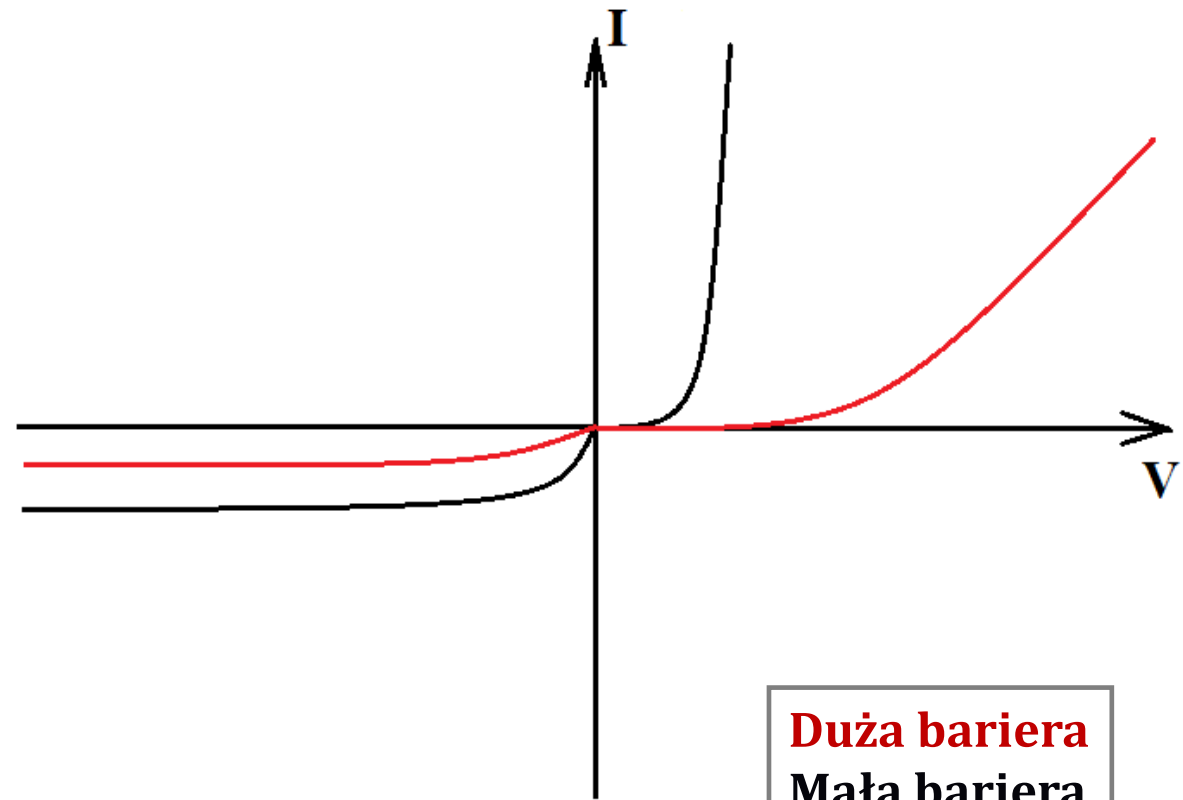
$$I = I_{s-m} - I_{m-s} = -I_0$$



Wpływ bariery potencjału na natężenie prądu

Popatrzmy na wzór:
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right] = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right]$$

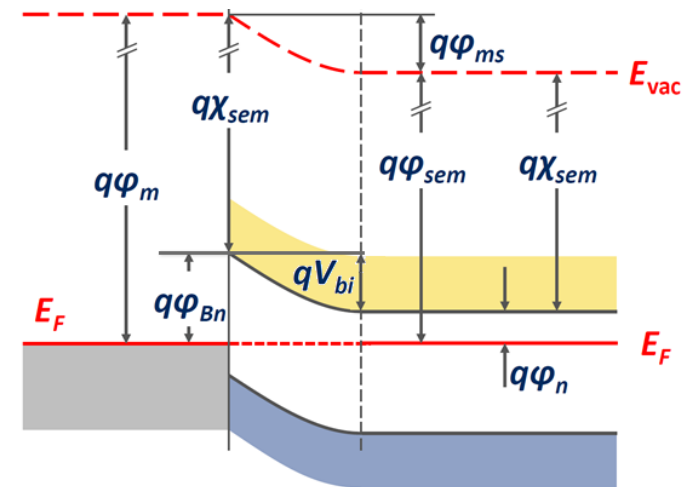
- ❑ **Niska wysokość bariery** powoduje, że krzywa I-V rośnie szybciej → osiąga wyższy prąd w kierunku przewodzenia przy niższych napięciach polaryzacji w kierunku przewodzenia
- ❑ **Wysoka wysokość bariery** powoduje, że krzywa I-V leży niżej na wykresie, co wskazuje na niższy prąd w całym zakresie napięć w kierunku przewodzenia → Im **większa bariera** potencjału tym **mniej prąd** (wykładniczo!) → fizycznie: trudniej nośnikom „przeskoczyć” barierę
- ❑ Dioda o **niskiej barierze** wymaga **niższego napięcia przewodzenia** (np. 150–450 mV), aby uzyskać ten sam prąd co dioda o wysokiej barierze, która często wymaga np. 600–700 mV do uzyskania efektu prostowania
- ❑ **Większa bariera** → mniejszy prąd wsteczny (I_0)



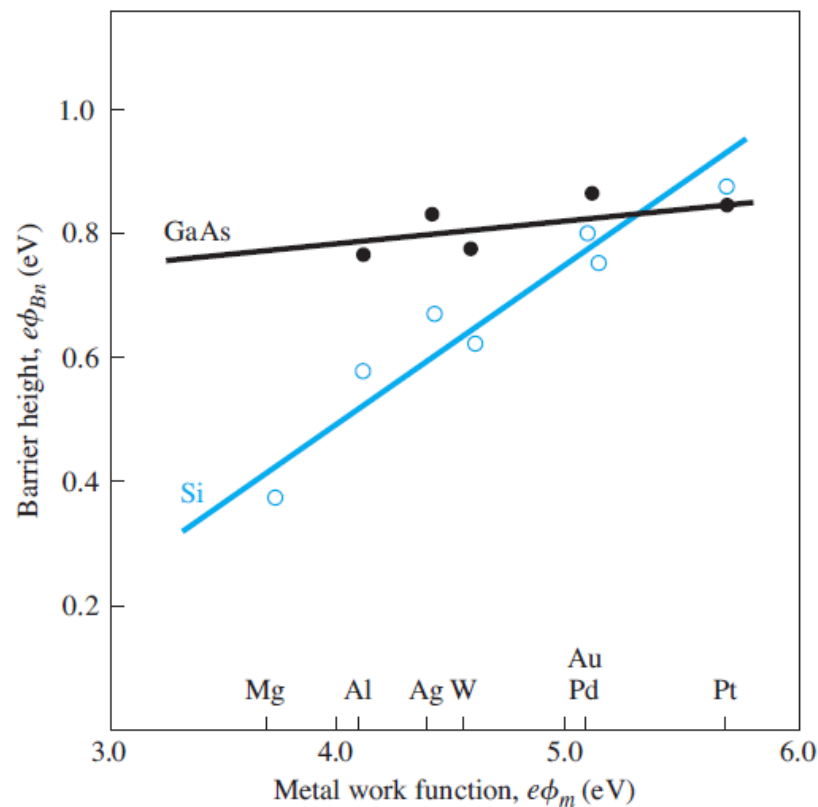
Model rzeczywistego złącza metal-półprzewodnik

Według **teorii Schottky'ego-Motta** (tj. **idealnego złącza metal-półprzewodnik**) – wysokość bariery Schottky'ego ($q\phi_{Bn}$) na styku metal-półprzewodnik wyraża się wzorem:

$$(*) \quad q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi_{sem})$$

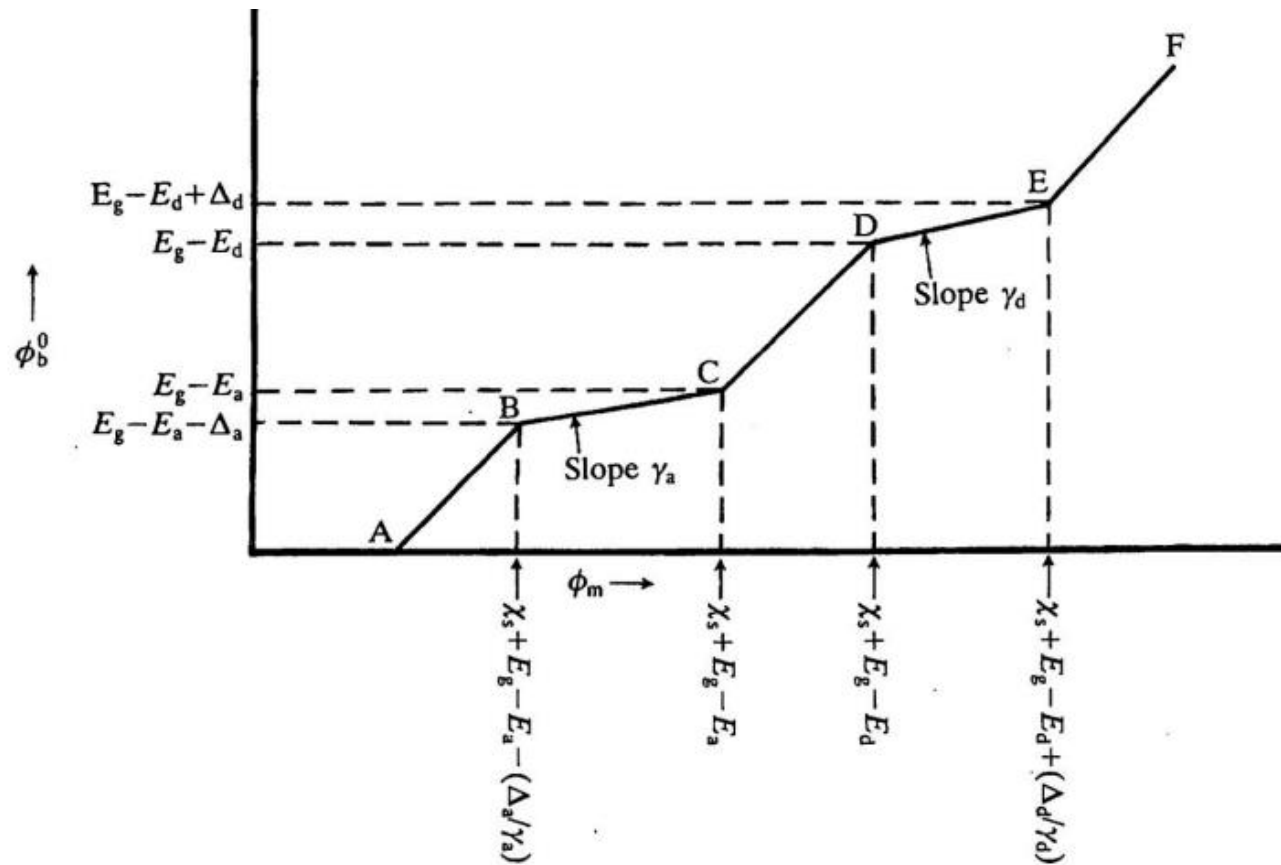
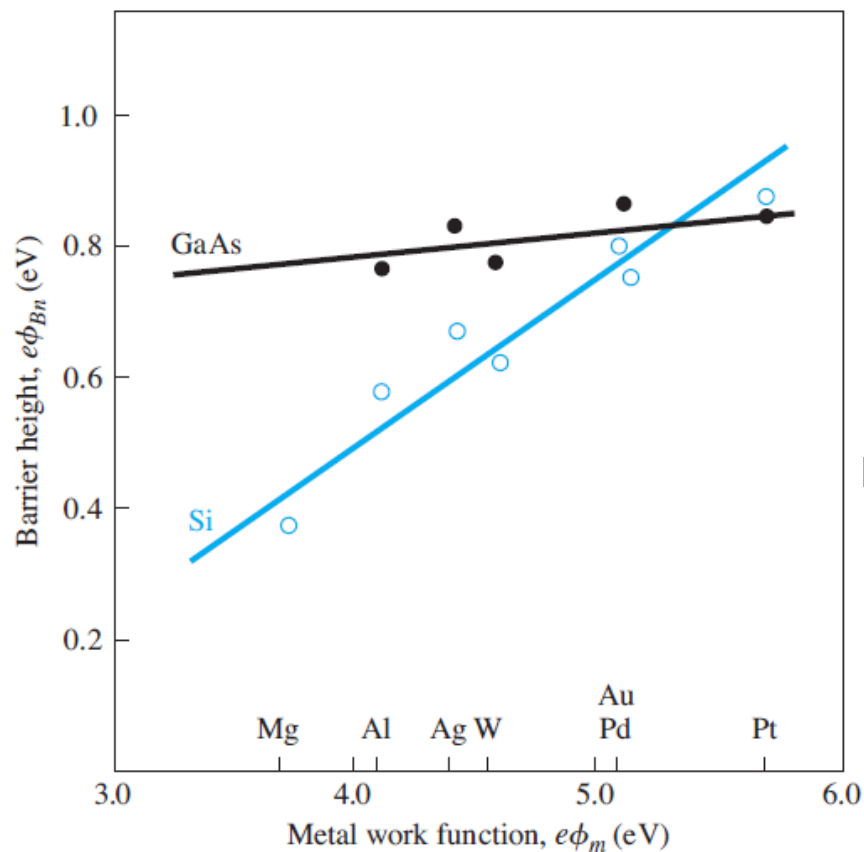


W rzeczywistym modelu złącza Schottky'ego wysokość bariery na styku metal-półprzewodnik określana jest zarówno przez pracę wyjścia elektronów z metalu, jak i przez gęstość tzw. stanów powierzchniowych półprzewodnika. Udowodniono to w prostym eksperymencie (patrz rys. obok), w którym zmierzone wysokości barier w diodach Schottky'ego na bazie GaAs i Si w funkcji pracy wyjścia metalu wykazały zależność monotoniczną, jednak krzywe te nie pasowały do prostej relacji określonej równaniem (*).



Stany powierzchniowe sprawiają, że w rzeczywistych złączach poziom Fermiego jest „przyczepiony / przypięty” do powierzchni (ang. *Fermi level pinning*) → zatem bariera nie zmienia się tak idealnie, jak przewiduje teoria Schottky'ego-Motta.

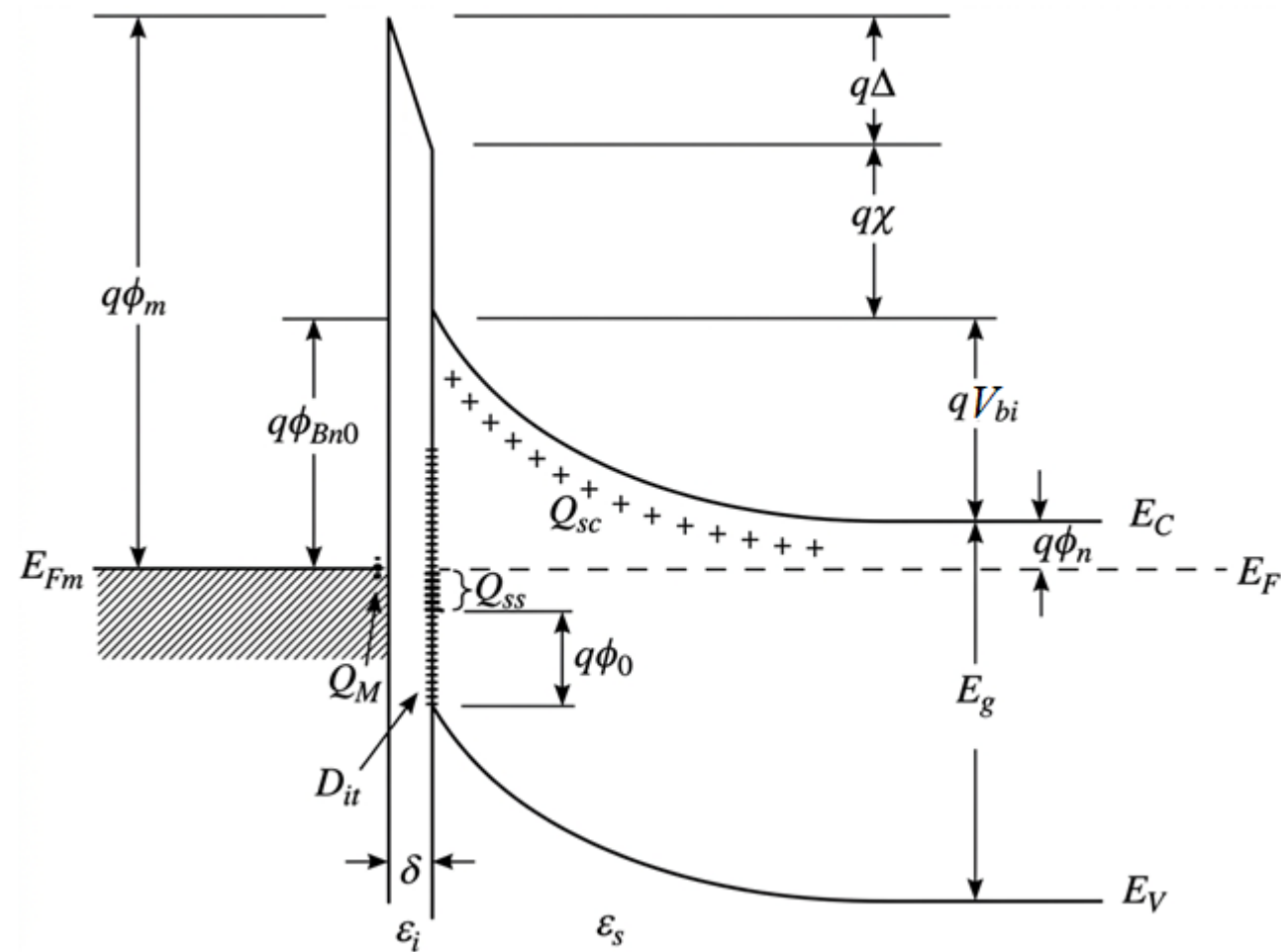
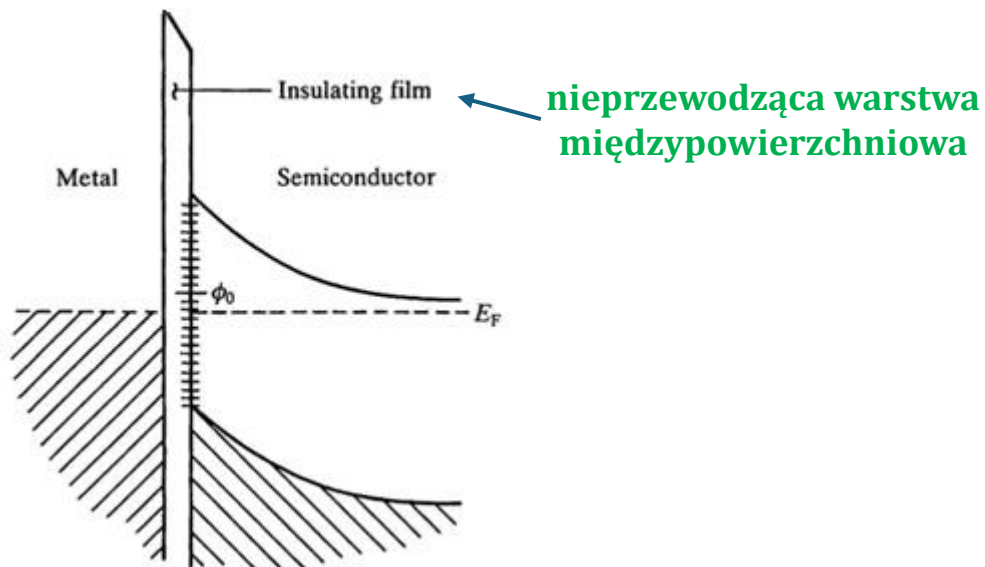
Model rzeczywistego złącza metal-półprzewodnik



Wykres zależności wysokości bariery Schottky'ego od pracy wyjścia metalu, uwzględniający wpływ donorowych i akceptorowych stanów powierzchniowych w zależności od ich stopnia zapełnienia ładunkiem.

Diagram pasmowy rzeczywistego złącza metal-półprzewodnik

- ✓ Stany powierzchniowe → poziomy energetyczne na styku metal-półprzewodnik (związane z zerwanymi wiązaniami sieci krystalicznej lub zanieczyszczeniami powierzchni półprzewodnika).
- ✓ Tworzą dodatkowe centra pułapkujące elektrony lub dziury → mogą mieć charakter donorowy lub akceptorowy.
- ✓ Wymiana nośników pomiędzy warstwami metalu i półprzewodnika, w rzeczywistym złączu Schottky'ego odbywa się za pośrednictwem stanów powierzchniowych.



ϕ_0 – potencjał powierzchniowy (poziom neutralności ładunkowej - miejsce, w którym stany powierzchniowe pozostają pełne, czyli neutralne); Q_{ss} – ładunek w stanach powierzchniowych; Q_{sc} – ładunek przestrzenny w obszarze półprzewodnika; Q_M – ładunek powierzchniowy na metalu; D_{it} – **gęstość stanów powierzchniowych**; Δ – różnica potencjałów na międzypowierzchni; δ – grubość warstwy międzypowierzchniowej; ϵ_i – przenikalność dielektryczna warstwy międzypowierzchniowej; ϵ_s – przenikalność dielektryczna półprzewodnika.

Stany powierzchniowe na złączu metal-półprzewodnik

Związek między barierą Schottky'ego, gęstością stanów powierzchniowych a innymi parametrami półprzewodnika typu n (o znanej koncentracji donorów, N_d) jest następujący (**model Bardeena**):

$$(E_g - q\phi_0 - q\phi_{Bn}) = \frac{1}{qD_{it}} \sqrt{2q\epsilon_s N_d (\phi_{Bn} - \phi_n)} - \frac{\epsilon_i}{qD_{it}\delta} [\phi_m - (\chi + \phi_{Bn})] \quad (**)$$

Rozważmy **dwa** przypadki:

1) Poprawka Bardeena: Załóżmy, że $D_{it} \rightarrow \infty$ (bardzo duża gęstość stanów powierzchniowych). W takim przypadku prawa str. równania (**) dąży do zera. Otrzymujemy wówczas, że:

$$q\phi_{Bn} = (E_g - q\phi_0)$$

W efekcie:

- Przy **bardzo dużej gęstości stanów powierzchniowych** półprzewodnika, bariera Schottky'ego ($q\phi_{Bn}$) **nie zależy** od pracy wyjścia metalu ($q\phi_m$) oraz powinowactwa elektronowego półprzewodnika ($q\chi$)
- **Bariera Schottky'ego zależy głównie od właściwości samej powierzchni półprzewodnika** (potencjału powierzchniowego ϕ_0) → **Poziom Fermiego na samej powierzchni zostaje „przypięty” („przyczepiony”)** w konkretnym punkcie przerwy energetycznej, zazwyczaj blisko powierzchni złącza – *ang. **Fermi level pinning***.
- **Ekranowanie:** gdy stany powierzchniowe mają bardzo dużą gęstość, działają jak "tarcza". Nawet jeśli przyłożymy metal o bardzo dużej pracy wyjścia, ładunek zgromadzony w stanach powierzchniowych **zrównoważy jego wpływ** na wysokość bariery potencjału.

Stany powierzchniowe na złączu metal-półprzewodnik

2) Model Schottky'ego Motta: Załóżmy, że $D_{it} \rightarrow 0$ (co oznacza bardzo małą gęstość stanów powierzchniowych). W takim przypadku równanie (**) redukuje się do postaci:

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi_{sem})$$

W efekcie: Otrzymujemy, że **bariera Schottky'ego** opisana jest taką samą zależnością jak **w modelu idealnego złącza metal-półprzewodnik**, w którym obecność stanów powierzchniowych jest pominięta.



Ważne wnioski:

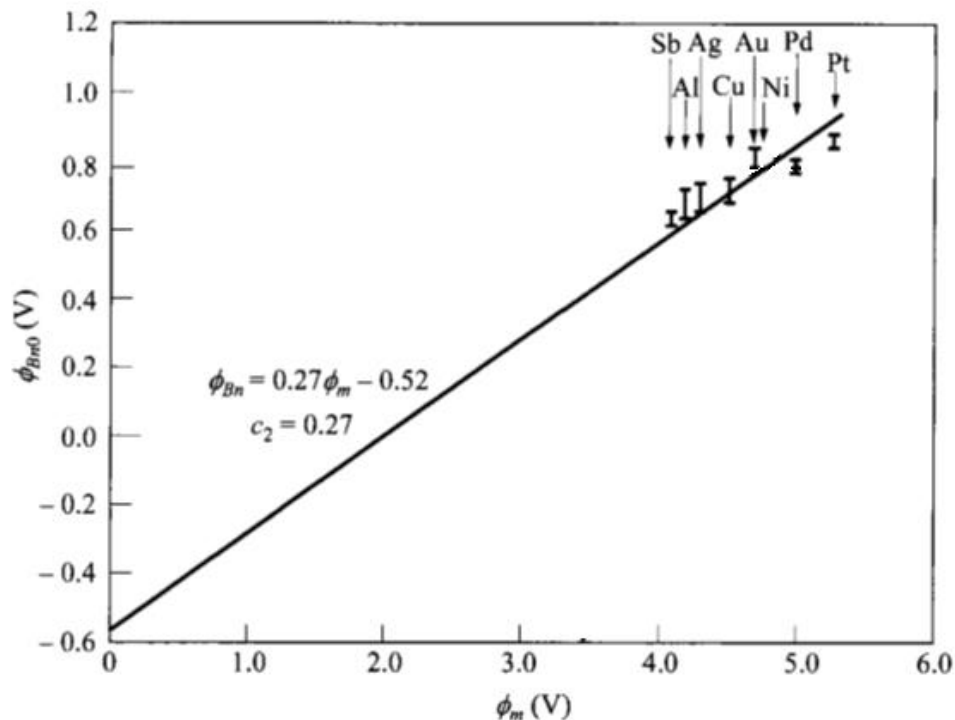
1. Wysokość bariery jest również funkcją stanów powierzchniowych w półprzewodniku
→ ulega modyfikacji względem idealnej wartości teoretycznej (Schottky-Mott)
2. Ponieważ gęstości stanów powierzchniowych nie da się przewidzieć z dużą dokładnością, wysokość bariery musi być parametrem wyznaczanym eksperymentalnie
3. Gęstość stanów powierzchniowych zależy od sposobu przygotowania powierzchni, defektów sieciowych i zanieczyszczeń.

Parametry rzeczywistego złącza metal-półprzewodnik

Zaniedbując człon pierwiastkowy w równaniu (**), upraszcza się ono do zależności $\phi_{Bn} = f(\phi_m)$ dla złącza Schottky'ego → jest to **uproszczony model Bardeena**

$$\phi_{Bn} = c_2(\phi_m - \chi) + (1 - c_2) \left(\frac{E_g}{q} - \phi_0 \right) \equiv c_2 \phi_m + c_3$$

Co oznaczają parametry c_2 i c_3 ?? → Są to parametry eksperymentalne, wyznaczone na podstawie określonej zależności $\phi_{Bn} = f(\phi_m)$ dla konkretnego złącza Schottky'ego, które tworzy dany półprzewodnik z różnymi metalami (o różnych pracach wyjścia).



Na wykresie po lewej stronie analizowano złącze Schottky'ego z półprzewodnikiem krzemowym typu n. Uzyskano następującą zależność:

$$\phi_{Bn} = 0.27 \cdot q \phi_m - 0.52$$

W tym konkretnym przypadku: $c_2 = 0.27$ oraz $c_3 = -0.52$.

Zatem, korzystając z tych parametrów, można pokazać, że: $\phi_0 = 0.33 \text{ V}$ a $D_{it} = 4 \cdot 10^{13} \text{ stanów/eVcm}^2$.

Parametry rzeczywistego złącza metal-półprzewodnik – c.d.

Znając wartości c_2 i c_3 można wyznaczyć **najważniejsze parametry międzypowierzchni** (tj. interfejsu między metalem a półprzewodnikiem). Są nimi:

$$D_{it} = \frac{(1 - c_2)\varepsilon_i}{c_2\delta q^2}$$

Gęstość stanów powierzchniowych

$$\phi_0 = \frac{E_g}{q} - \frac{c_2\chi + c_3}{1 - c_2}$$

Potencjał powierzchniowy

Semi-conductor	c_2	c_3 (V)	χ (V)	D_{it} (10^{13} /eV·cm ²)	$q\phi_0$ (eV)	$q\phi_0/E_g$
Si	0.27±0.05	-0.52±0.22	4.05	2.7±0.7	0.30±0.36	0.27
GaAs	0.07±0.05	0.51±0.24	4.07	12.5±10.0	0.53±0.33	0.38
GaP	0.27±0.03	0.02±0.13	4.0	2.7±0.4	0.66±0.2	0.294
CdS	0.38±0.16	-1.17±0.77	4.8	1.6±1.1	1.5±1.5	0.6