

# **Wykład IX**

## **Fotodioda i fotoogniwo**

# Bateria słoneczna i fotodioda

Ogniwo słoneczne i fotodioda działają w oparciu o efekt fotowoltaiczny:

- światło jest absorbowane dla

$$h\nu \geq E_g$$

- tworzą się pary elektron-dziura, które są separowane przez pole w złączu i transportowane przez złącze

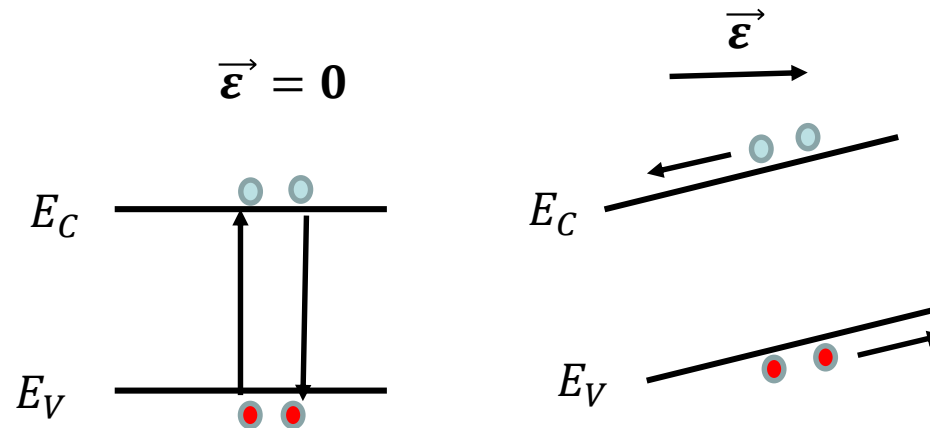


# Warunki wystąpienia efektu fotowoltaicznego

- Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku nadmiarowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego

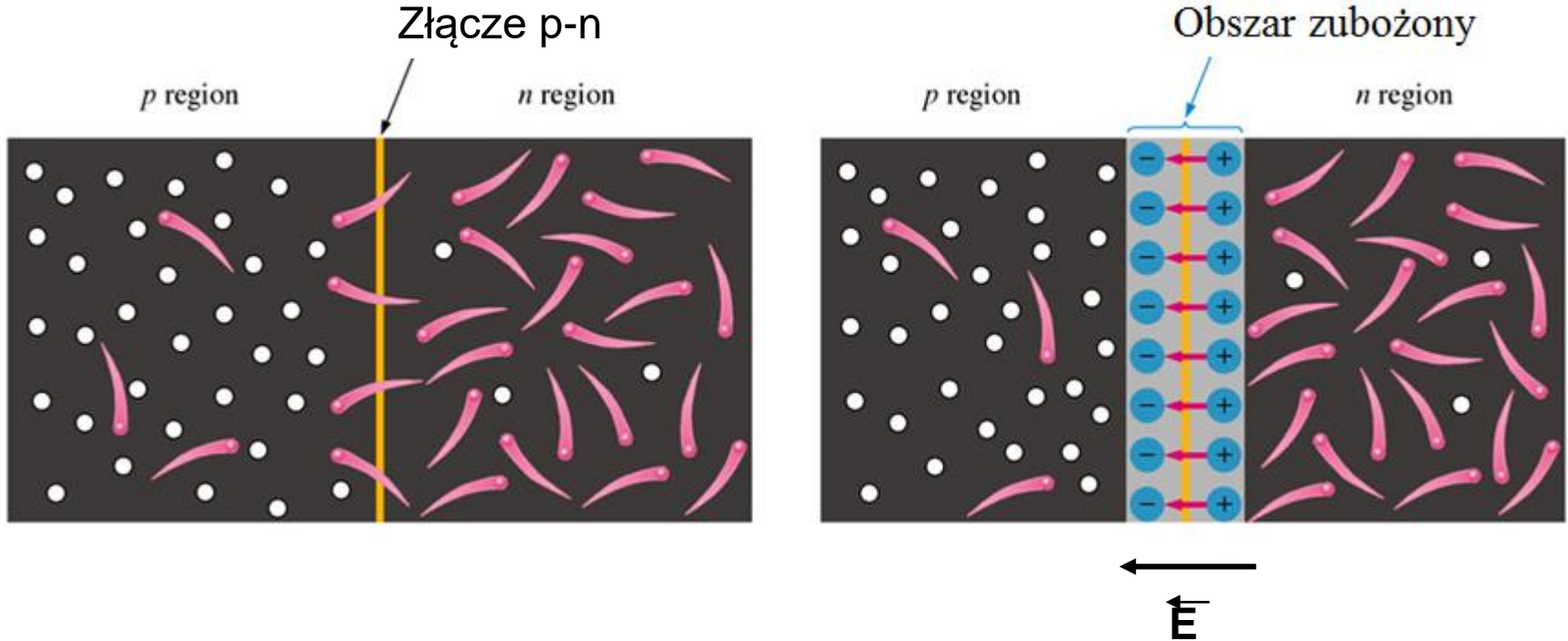
$$E_f \geq E_g$$

- Nośniki nadmiarowe o różnych znakach muszą być rozdzielone przez pewną elektrostatyczną niejednorodność;



- Generowany swobodny nośnik musi zachować swoją ruchliwość dostatecznie długo, tak aby zdążył dotrzeć do niejednorodności powodującej rozdzielenie ładunku.

# Złącze p-n

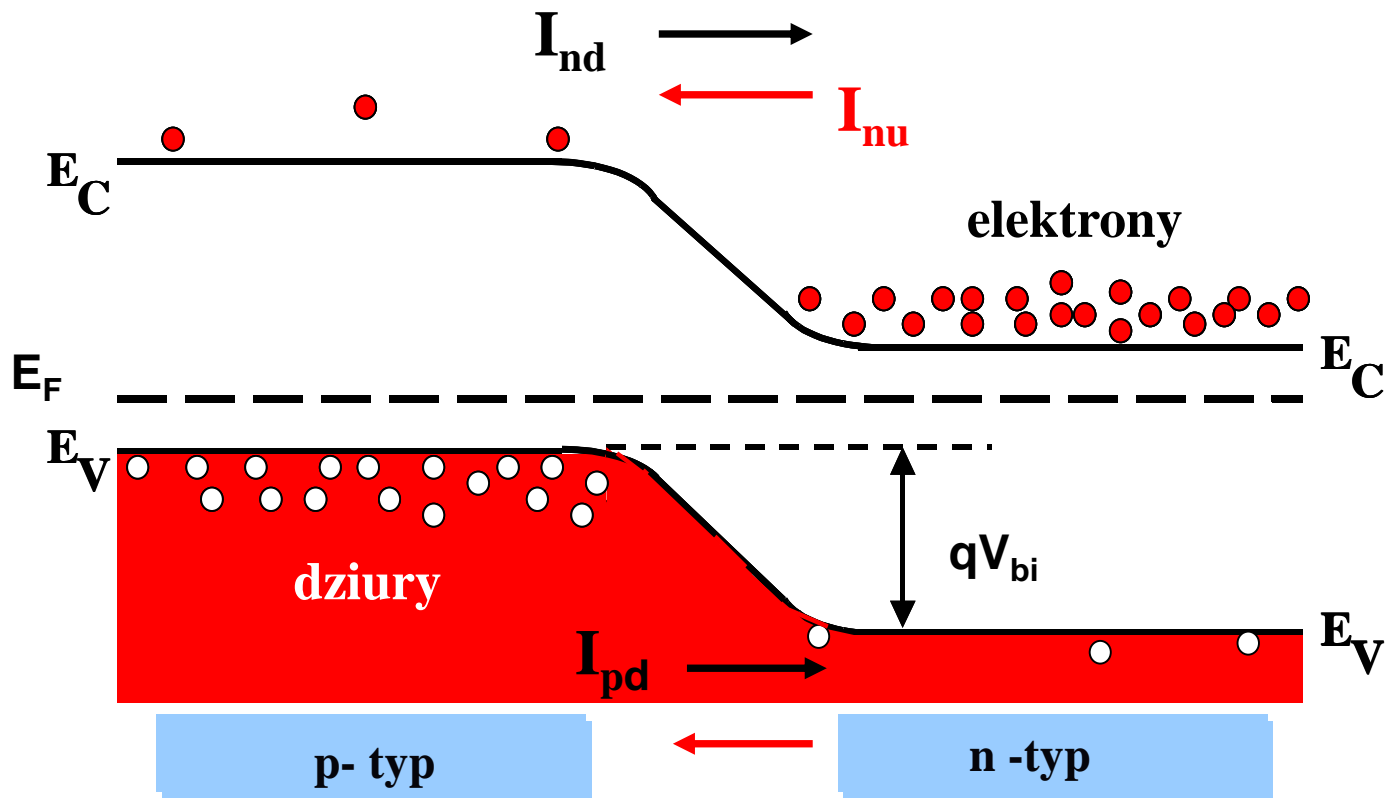


**Tworzy się złącze p-n**

**Złącze po utworzeniu**

**Pole elektryczne na styku dwóch półprzewodników powoduje, że prąd łatwo płynie w jednym kierunku a przepływ w drugim kierunku jest utrudniony.**

# Złącze p-n

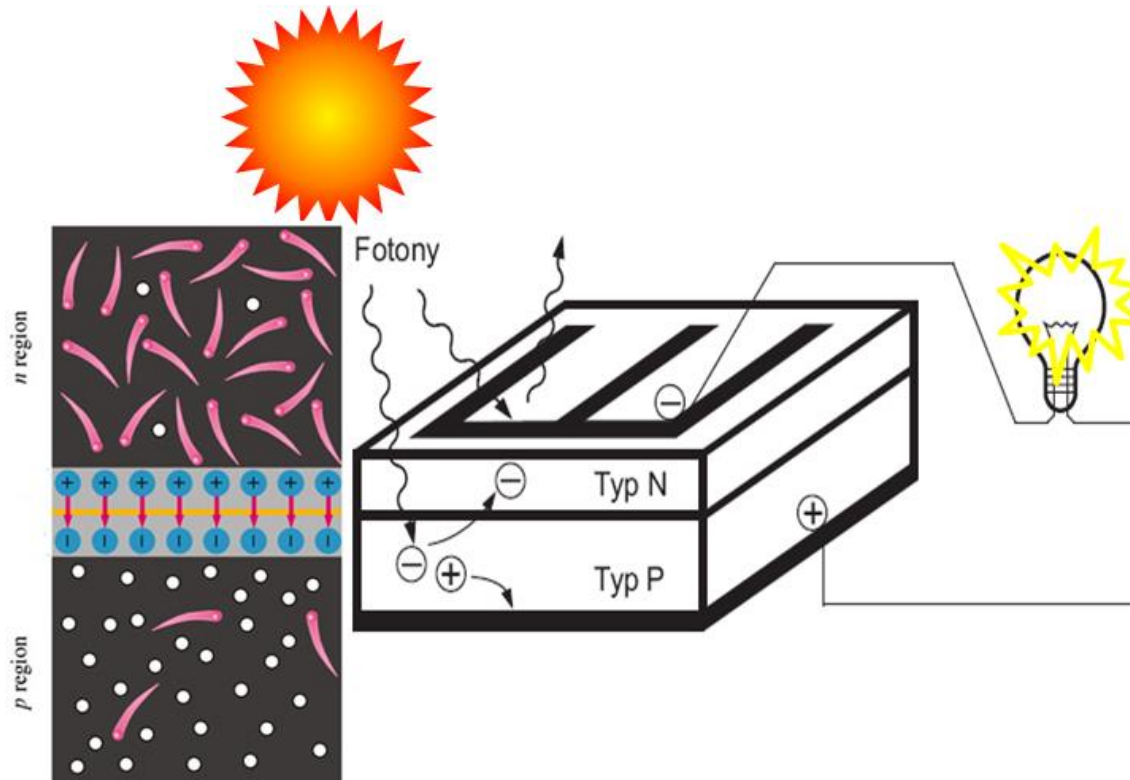


W stanie równowagi termodynamicznej przez złącze zawsze płynie pewien prąd nośników większościowych, (prąd dyfuzyjny) elektronów  $I_{nd}$  i dziur  $I_{pd}$  które są w stanie pokonać barierę potencjału na złączu. W stronę przeciwną płynie prąd generacji termicznej nośników mniejszościowych: (unoszenia) elektronów  $I_{nu}$  i dziur  $I_{pu}$ . W stanie równowagi obydwie prądy równoważą się i wypadkowy prąd jest równy zero.

# Efekt fotowoltaiczny

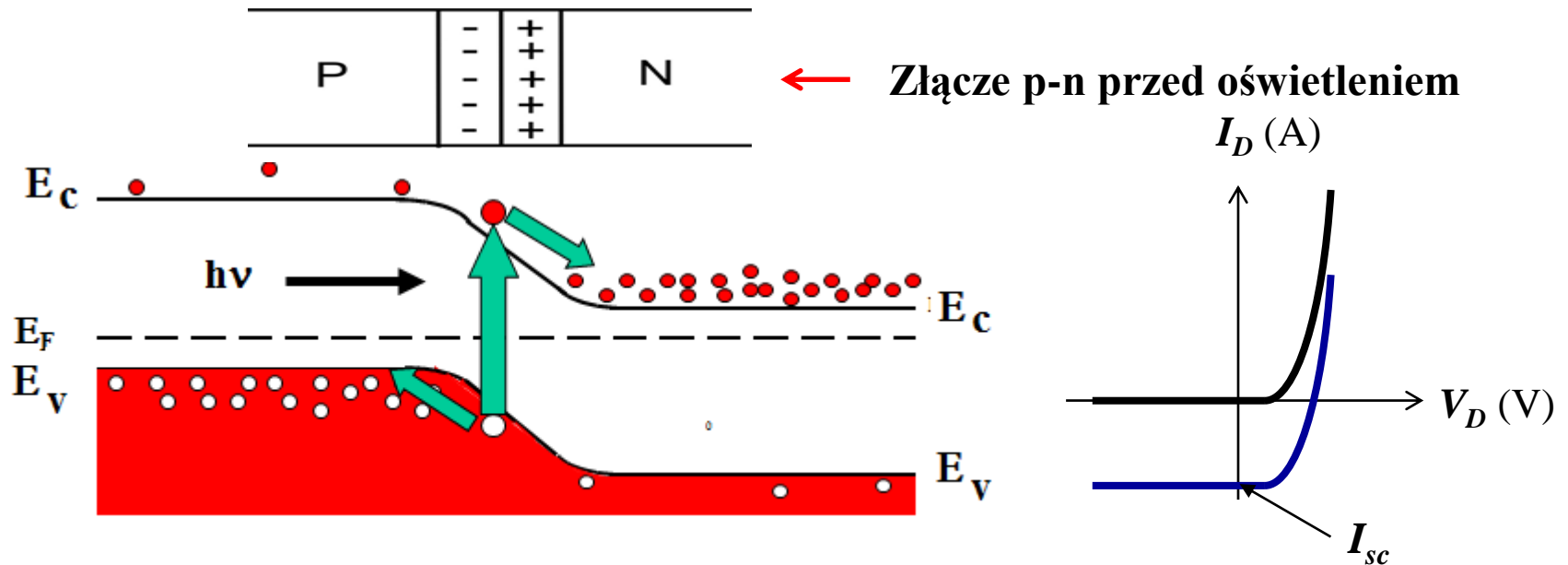
$$h\nu \geq E_g$$

Światło jest absorbowane, tworzą się pary elektron-dziura, które są separowane przez pole w złączu i transportowane przez złącze – gdy złącze jest zwarte - płynie prąd zwarcia,  $I_{sc}$ .



# Efekt fotowoltaiczny

- Złącze jest zwarte



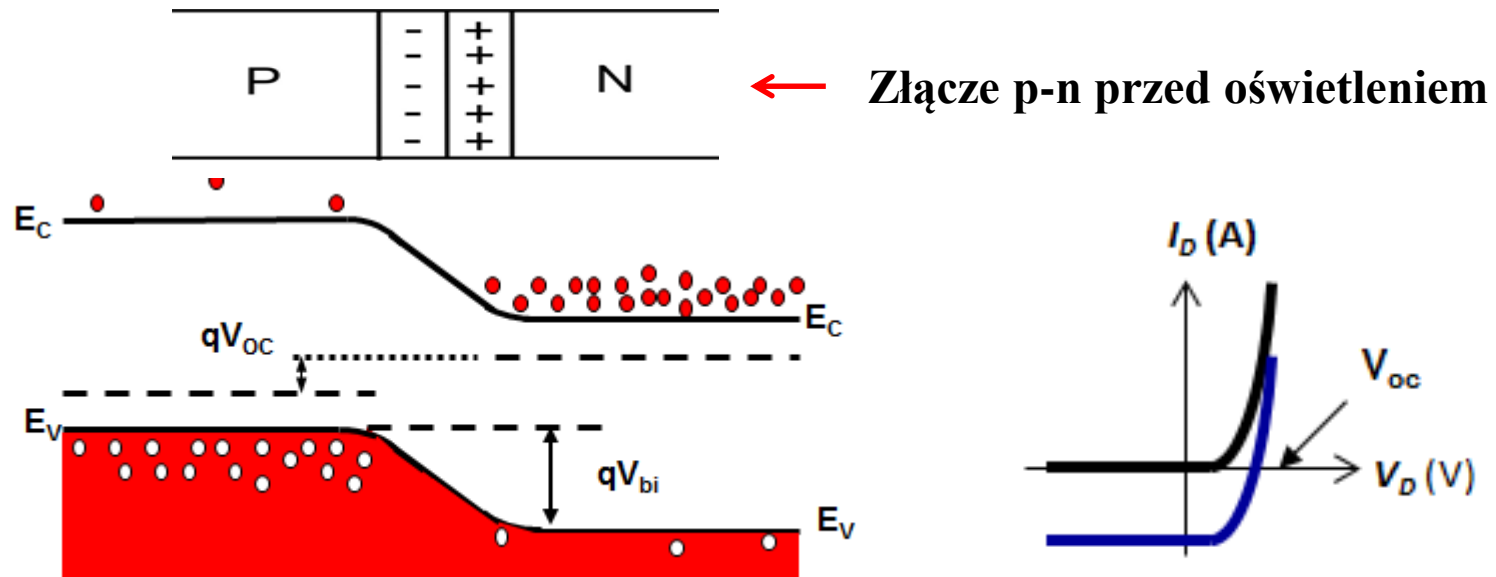
Bariera potencjału na złączu nie zmienia się. Gęstości prądów wstrzykiwania są takie same jak w złączu nieoświetlonym. Prądy te równoważą prądy generacji termicznej ale pozostają niezrównoważone prądy fotogeneracji. Stanowią je: strumień elektronów z obszaru p do n i dziur z n do p.

$$I_{sc} = qN_{ph}(E_g) = qP/h\nu \sim P$$

Prąd zwarcia jest proporcjonalny do strumienia padającego promieniowania.

# Efekt fotowoltaiczny

- Złącze jest rozwarte



- Wygenerowane światłem elektrony płyną do obszaru n a dziury do obszaru p. W wyniku tego obszar typu n ładuje się ujemnie a typu p – dodatnio. Taka polaryzacja obszarów złącza jest równoważna polaryzacji w kierunku przewodzenia. Wartość tego napięcia polaryzacji nazywa się fotonapięciem rozwarcia  $V_{oc}$ .
- Obniżenie bariery potencjału w złączu p-n powoduje, że rośnie prąd ciemny. W stanie równowagi, ten prąd jest równoważony prądami fotogeneracji.

$$I_{sc} - I_d = 0$$



# Efekt fotowoltaiczny

Prąd ciemny płynący przez złącze p-n spolaryzowane napięciem  $V_{oc}$ , wyraża się równaniem Shockley'a:

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ten prąd równoważony w rozwartym oświetlonym złączu p-n maksymalny prąd fotogeneracji, czyli  $I_{sc}$ :

$$I_{sc} = I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right]$$

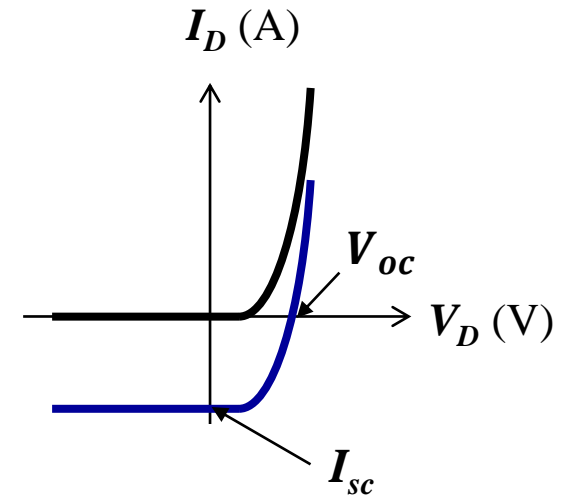
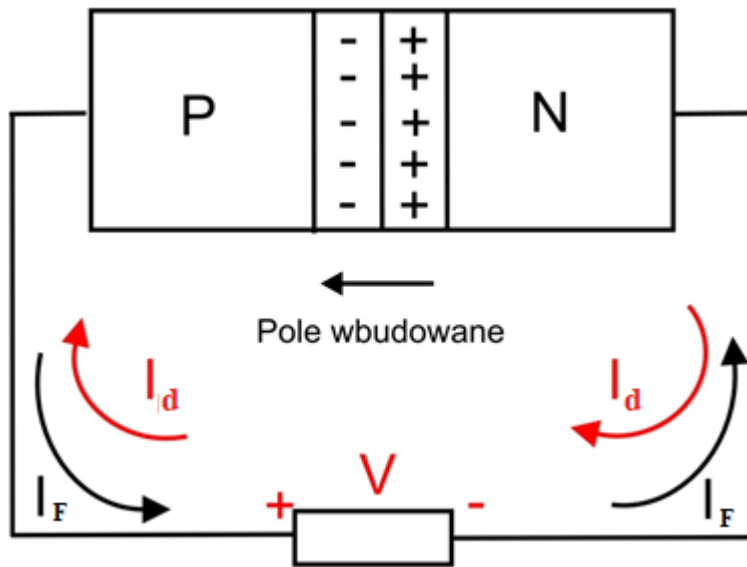
Po przekształceniu:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0}$$

Ponieważ  $I_{sc} \sim P$ , to

$$V_{oc} \sim \ln P$$

# Charakterystyka I-V



- Światło generuje parę elektron-dziura.
- Pole elektryczne porusza nośniki: elektrony w stronę n a dziury w stronę p  
Zatem przez opornik płynie fotoprąd - prąd wsteczny  $I_F$
- Ten prąd powoduje pojawienie się spadku napięcia  $V$  na oporze  $R$ .
- Napięcie  $V$  polaryzuje złącze w kierunku przewodzenia: pojawia się więc prąd  $I_d$

Całkowity prąd:

$$I = I_d - I_F$$

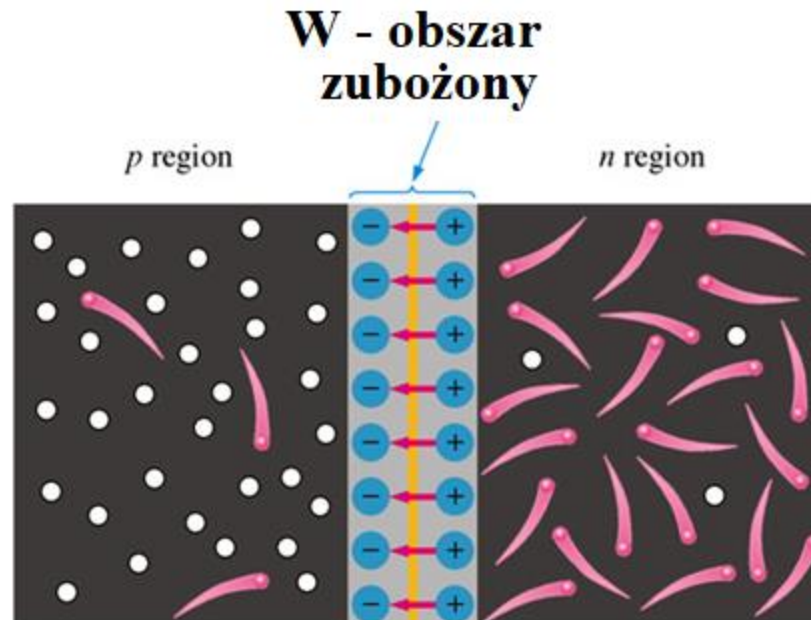
# Fotoprąd w złączu p-n

$$I_F = qg(L_n + L_p + W)A$$

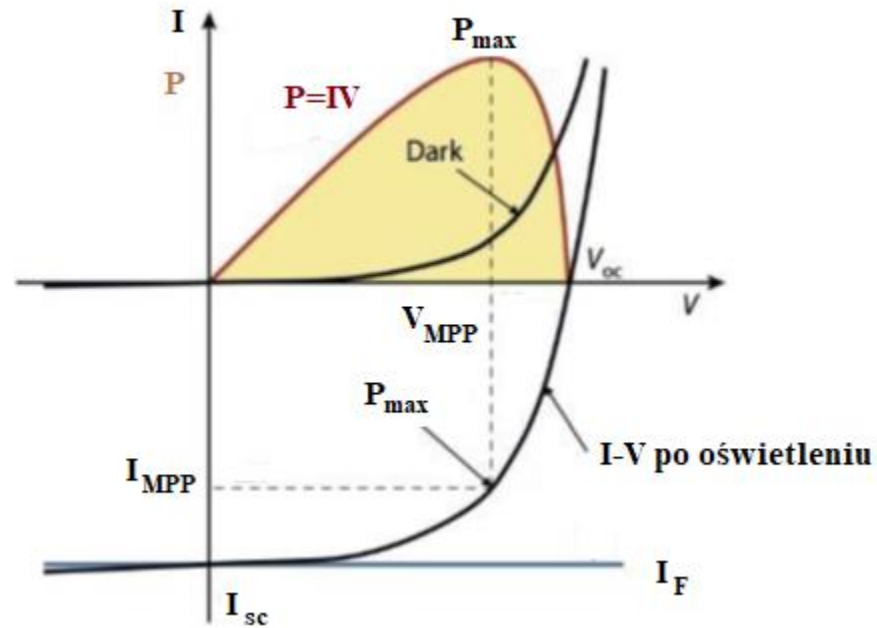
$g$  - szybkość generacji optycznej

$L_n, L_p$  długość drogi dyfuzji nośników mniejszościowych (elektronów po stronie p i dziur po stronie n);

$W$  – szerokość obszaru zubożonego w złączu p-n.



# Charakterystyka I-V



$$I = I_d - I_F = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - qg(L_n + L_p + W)A$$

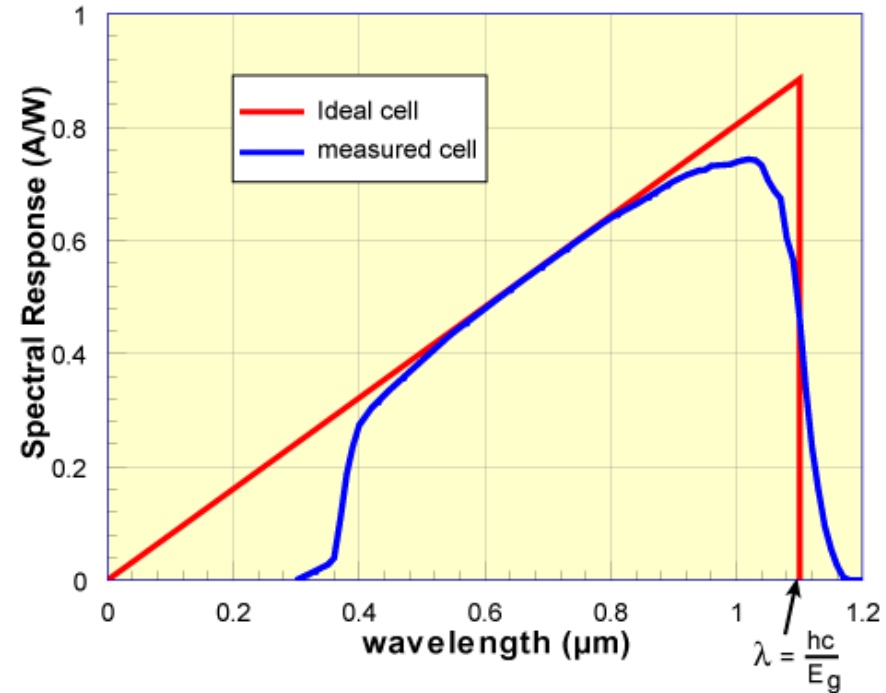
# Czułość widmowa

$$S_R(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P_\lambda \Delta\lambda} \quad \left[ \frac{A}{W} \right]$$

$$S_R(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P_\lambda \Delta\lambda} = \frac{I_{ph}(\lambda)}{\Psi_{ph,\lambda} hc \Delta\lambda} \cdot \lambda \quad \left[ \frac{A}{W} \right]$$

gdzie  $\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{hc \lambda} \quad [s^{-1}m^{-1}]$

to liczba fotonów o energii  $hc/\lambda$  emitowanych przez źródło o mocy  $P_\lambda$  [W/m] w jednostce czasu (ang. *spectral photon flow*)



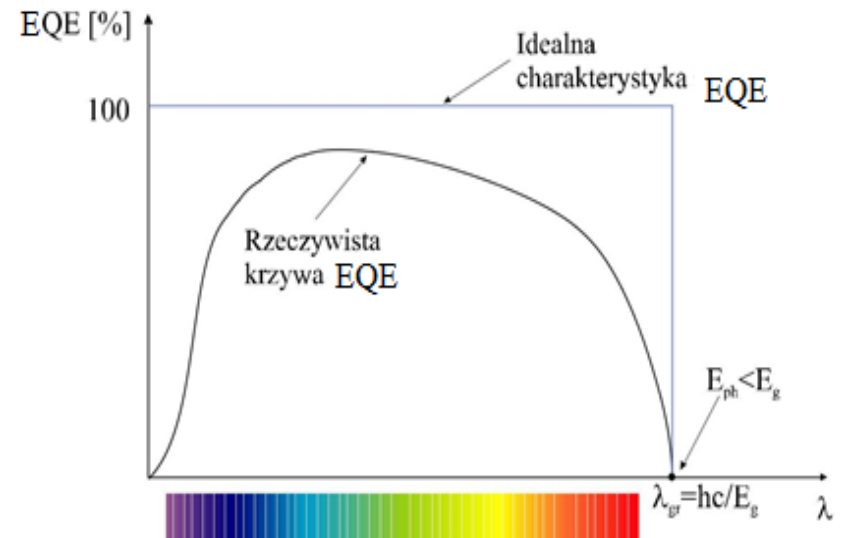
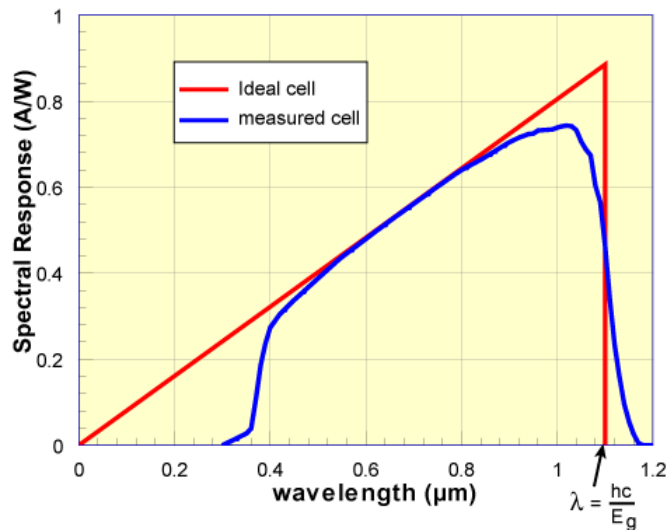
# Wydajność kwantowa

Zewnętrzna wydajność kwantowa:  
stosunek liczby elektronów do liczby fotonów

$$S_R(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{\Psi_{ph,\lambda} h c \Delta \lambda} \cdot \lambda$$

$$I_{ph}(\lambda) = EQE(\lambda) q \Psi_{ph,\lambda} \Delta \lambda$$

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q \Psi_{ph,\lambda} \Delta \lambda} = \frac{S_R(\lambda) h c}{q \lambda} \quad [\%]$$



# Fotodioda vs bateria słoneczna

## FOTODIODA

- Urządzenie, które jest stosowane jako czujnik promieniowania elektromagnetycznego:

$$S_{\lambda} = \frac{I_F}{P_{\lambda} \Delta \lambda} \quad \left[ \frac{A}{W} \right]$$

- Zwykle pracuje przy polaryzacji zaporowej

## BATERIA SŁONECZNA

- Urządzenie, które zamienia energię słoneczną w energię elektryczną.
- Jest podobne do baterii, bo dostarcza mocy prądu stałego.
- Różni się od baterii, bo napięcie które wytwarza zależy od oporności obciążenia.

