

# **Wykład V**

## **Detektory fotonowe**

# Półprzewodnik w polu elektrycznym

$$F = -\frac{dE_p}{dx}$$

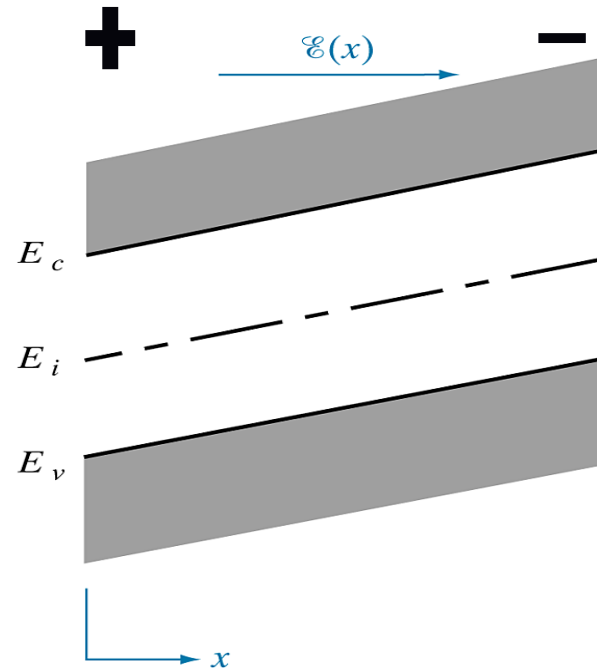
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$

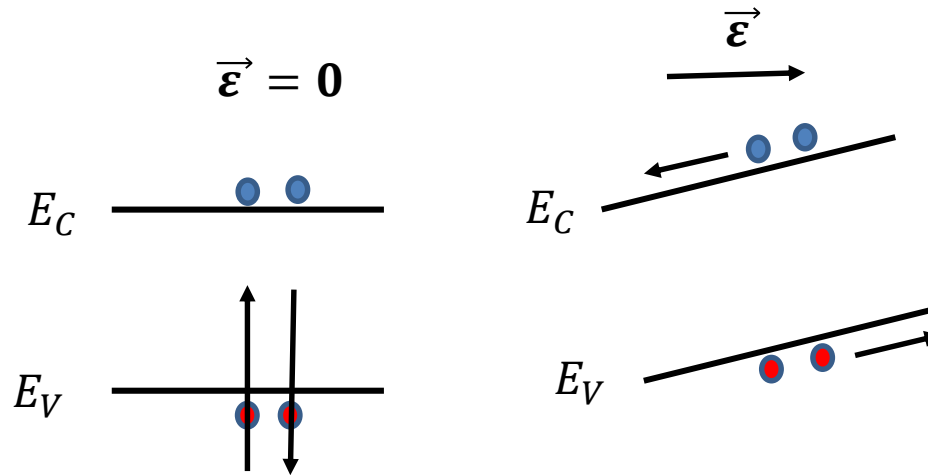
$$\varepsilon(x) = \text{const} = c \rightarrow$$

$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$



# Półprzewodnik w polu elektrycznym

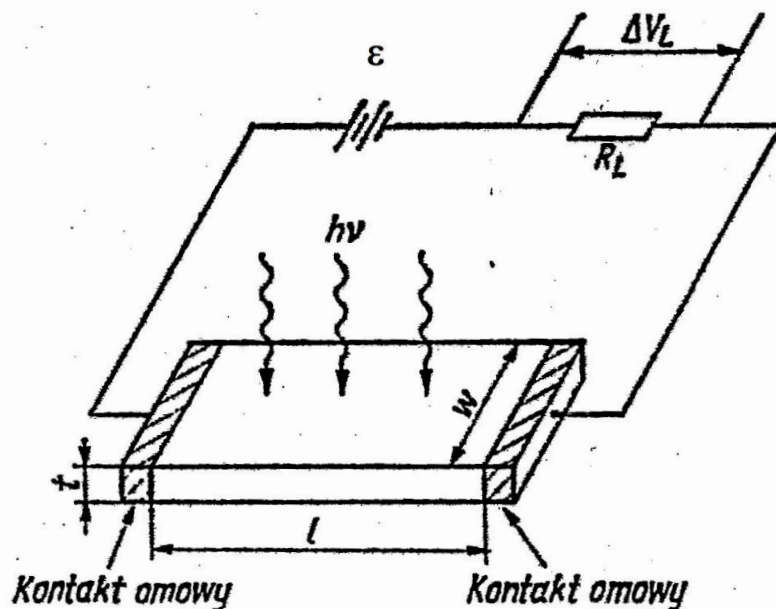


**Efekt fotoprzewodnictwa jest możliwy po spolaryzowaniu półprzewodnika. Wówczas pary elektron-dziura wygenerowane światłem zostaną rozseparowane. Elektrony zaczną się poruszać w stronę potencjału dodatniego a dziury w stronę potencjału ujemnego – zaczną płynąć prąd. W przeciwnym razie swobodne nośniki wygenerowane światłem zrekombinują, tzn. elektron wróci do pasma walencyjnego a nadmiar energii zostanie wypromieniowany w postaci ciepła. Proces rekombinacji następuje bardzo szybko, po czasie rzędu  $10^{-8}$ s.**

# Detektory fotoprzewodzące

Schemat zastępczy układu pracy detektora fotoprzewodzącego, który stanowi półprzewodnik z naparowanymi kontaktami omowymi.

Sygnal  $\Delta V_L$  jest mierzony na rezystancji  $R_L$ , która jest tak dobierana aby była równa rezystancji ciemnej detektora  $R_D$ .



**Szybkość generacji optycznej:**

$$g = \frac{\eta(P/h\nu)}{Wlt} = \frac{\text{ilość nosników generowanych światłem/s}}{\text{objętość}}$$

$$\delta n = \delta p = g_{op} \tau_n \quad \sigma = qn\mu$$

$$\Delta\sigma(t) = q[\delta n(t)\mu_n + \delta p(t)\mu_p] \quad \Delta\sigma(t) = qg_{op}[\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p]$$

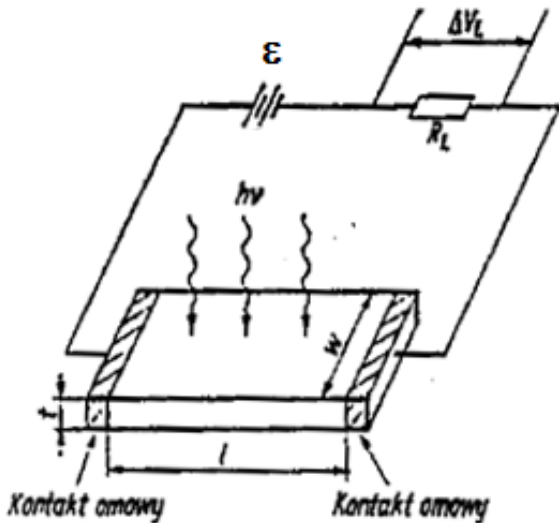
# Detektory fotoprzewodzące

Koncentracja nośników wygenerowanych światłem w półprzewodniku typu n:

$$\delta n(t) = g\tau_n$$

$$\Delta\sigma = q\delta n(t)\mu$$

$$j_{ph} = \Delta\sigma E = q\delta n(t)\mu E = q\delta n(t)v_d$$



Fotoprąd:

$$I_{ph} = j_{ph}Wt = q\delta n(t)v_dWt = q \frac{\eta P}{h\nu} \frac{v_d\tau_n}{l} =$$

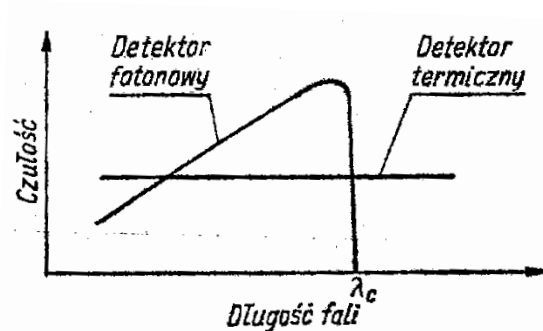
$$q \frac{\eta P}{hc} \lambda \frac{v_d\tau_n}{l} = q \frac{\eta P}{hc} \frac{\tau_n}{t_r} \lambda$$

$$V_L = \frac{R_L \varepsilon}{R_L + R_D}$$

$$\Delta V_L = R_D I_{ph} = R_D q \frac{\eta P}{hc} \frac{\tau_n}{t_r} \lambda$$

# Czułość napięciowa detektora fotoprzewodzącego

Jest to stosunek wartości skutecznej napięcia sygnału wyjściowego o częstotliwości podstawowej do wartości skutecznej mocy promieniowania padającego o częstotliwości podstawowej



$$S_V = \frac{\Delta V_L}{P}$$

$$\Delta V_L = R_D I_{ph} = R_D q \frac{\eta P \tau_n}{hc t_r} \lambda$$

$$S_V = \frac{\Delta V_L}{P} = R_D q \frac{\eta \tau_n}{hc t_r} \lambda \quad *$$

$$t_r = \frac{l}{v_d} = \frac{l}{\mu E} = \frac{l^2}{\mu V_D}$$

$$S_V = R_D q \frac{\eta \tau_n}{hc l^2} \mu V_D \lambda$$

Czułość jest liniową funkcją długości fali  $\lambda$  i przyłożonego napięcia stałego.

# Detektory fotoprzewodzące

Jeśli zdefiniuje się fotoprąd pierwotny:

$$I_0 = q \frac{\eta P}{hc} \lambda \quad I_{ph} = q \frac{\eta P}{hc} \frac{\tau_n}{t_r} \lambda = I_0 \frac{\tau_n}{t_r}$$

Wzmocnienie  $G$  fotoprądu w detektorze fotoprzewodzącym wyraża się wzorem:

$$G = \frac{\tau_n}{t_r} = \frac{v_d \tau_n}{l}$$

$G$  (ang. gain – zysk) dla detektorów fotoprzewodzących może być równy:  $1-10^6$

# Detektory fotoprzewodzące

Wydajność kwantowa, z przekształcenia wzoru \*

$$S_V = \frac{\Delta V_L}{P} = R_D q \frac{\eta}{hc} \frac{\tau_n}{t_r} \lambda \quad *$$

$$\eta = S_V \frac{hc}{\lambda R_D q} \frac{t_r}{\tau_n} \sim \frac{S_V}{\lambda}$$

Dla małego prądu stałego płynącego przez detektor PC wskutek jego polaryzacji, dominujący jest szum Johnsona – Nyquista i wówczas detekcyjność wyraża się wzorem:

$$D_\lambda^* = \frac{S_V(\lambda) \sqrt{A \Delta f}}{V_n(f)} = \frac{S_V(\lambda) \sqrt{A \Delta f}}{\sqrt{4kTR_D \Delta f}} = \frac{S_V(\lambda) \sqrt{A}}{\sqrt{4kTR_D}}$$

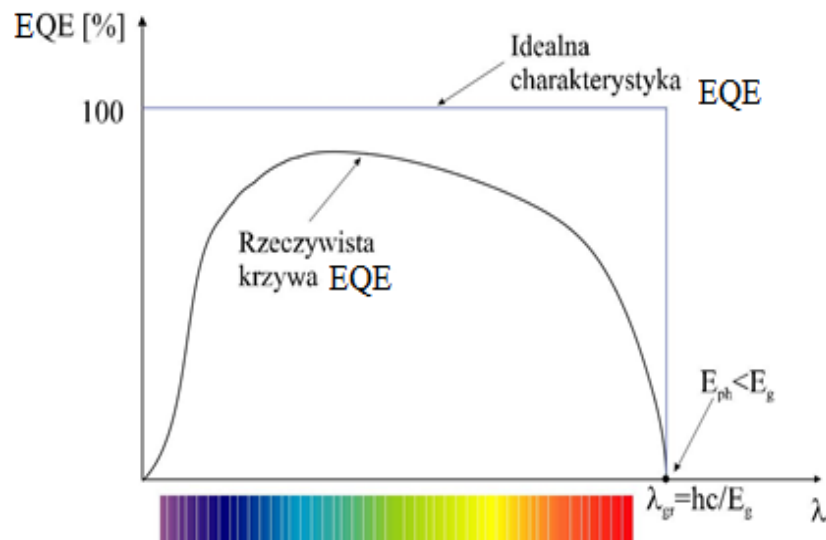
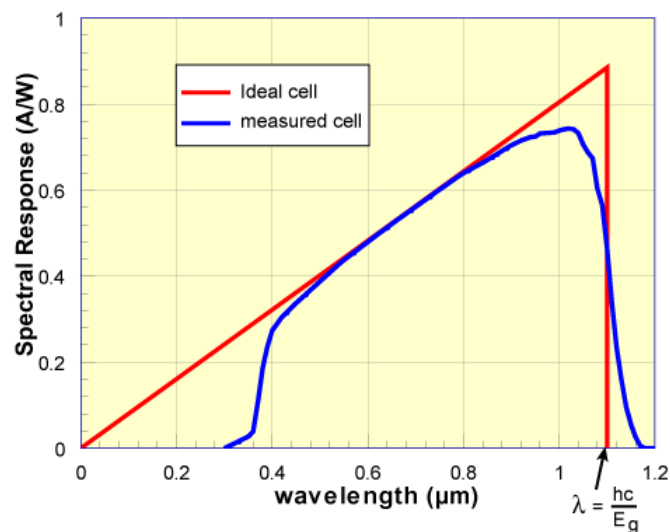


# Wydajność kwantowa

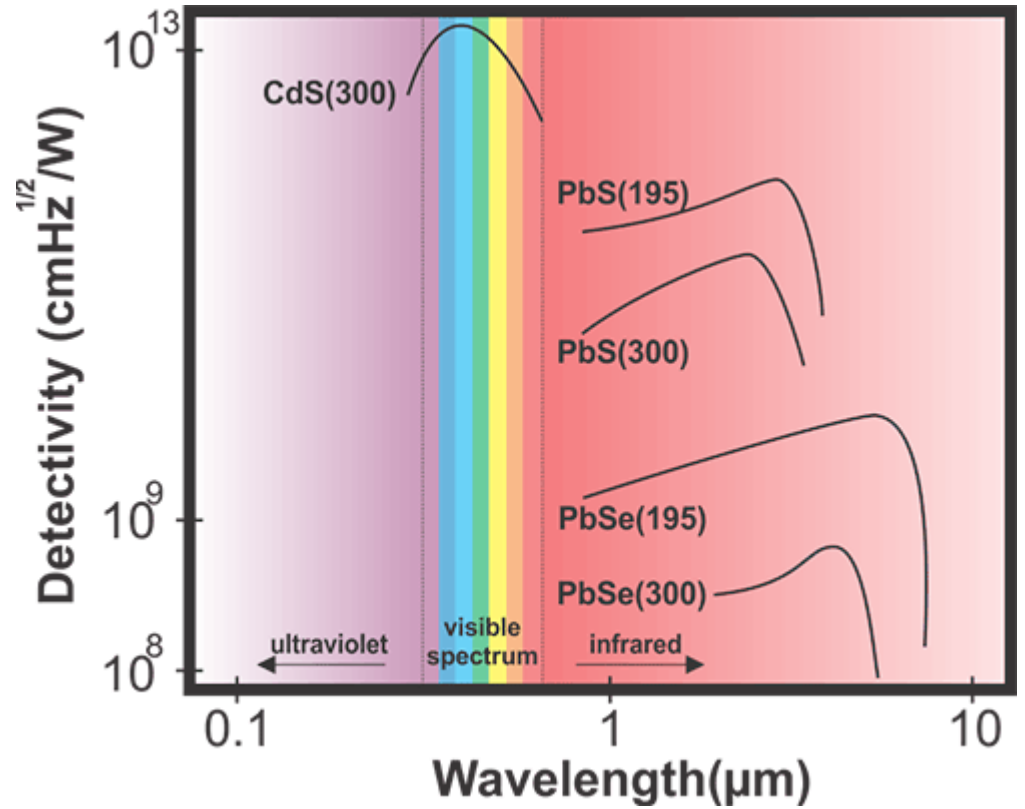
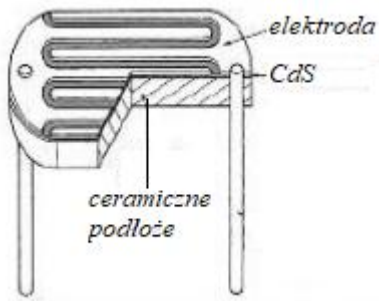
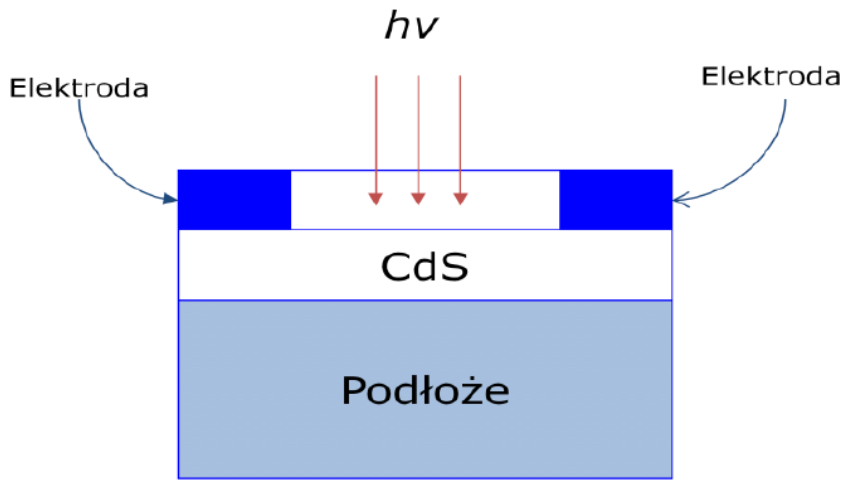
**Zewnętrzna wydajność kwantowa:**  
stosunek liczby elektronów do liczby fotonów

$$I_0 = q \frac{\eta P}{hc} \lambda$$

$$\eta = \frac{I_0/q}{\frac{P}{hc} / \lambda} = \frac{S_v}{q\lambda} hc$$



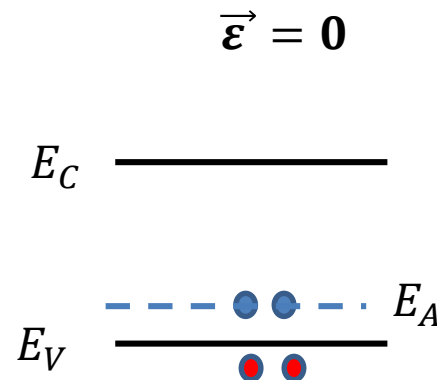
# Fotorezystor CdS



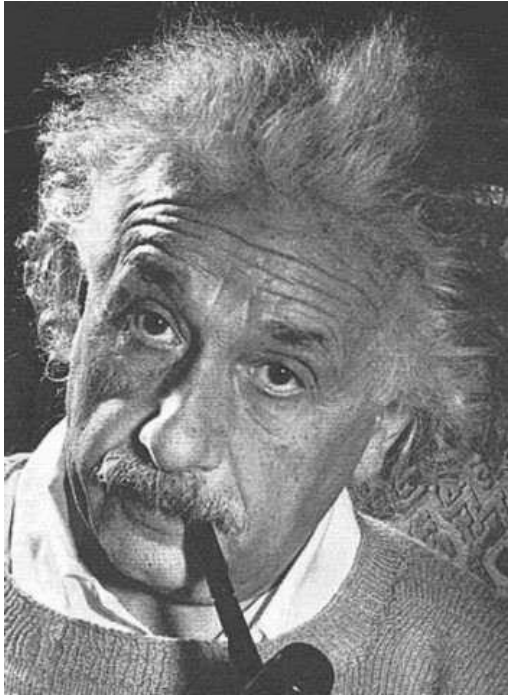
Dla PbS i PbSe  $\frac{dE_g}{dT} > 0$

# Fotorezystory

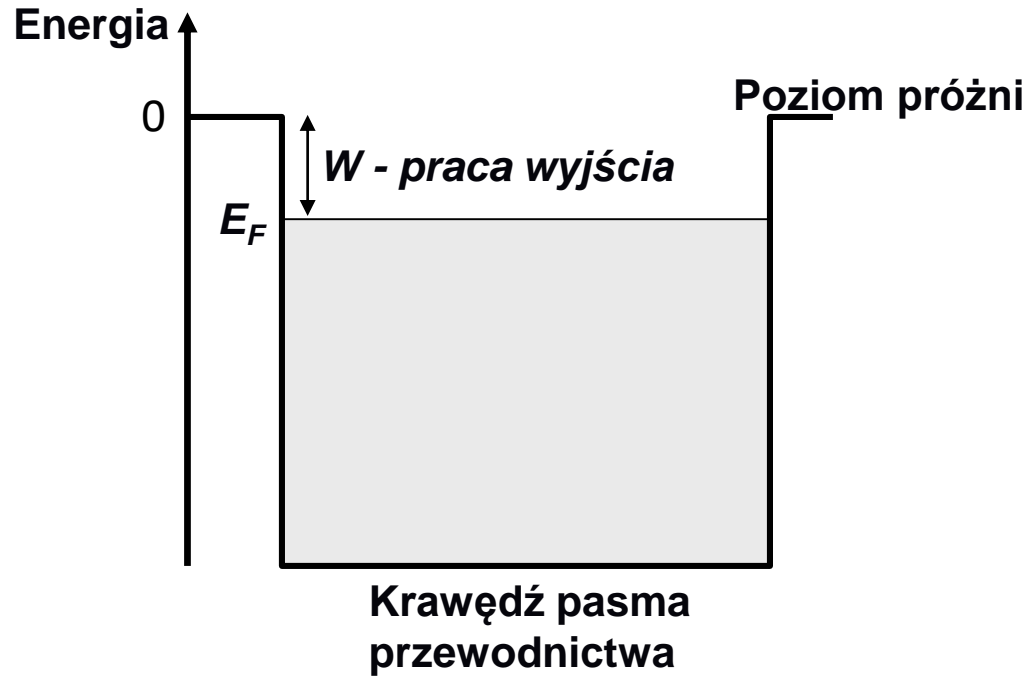
- **CdS** - tanie : mierniki światła w aparatach fotogr., czujniki światła ulicznych, czujniki w alarmach.
- **PbS** i **InSb** LDRs (light dependent resistor) są używane w tzw. średniej podczerwieni (mid-IR)
- **Ge:Cu** - daleka podczerwień (far-IR); spektroskopia w podczerwieni i astronomia w podczerwieni ( $E_A = 40meV$ )



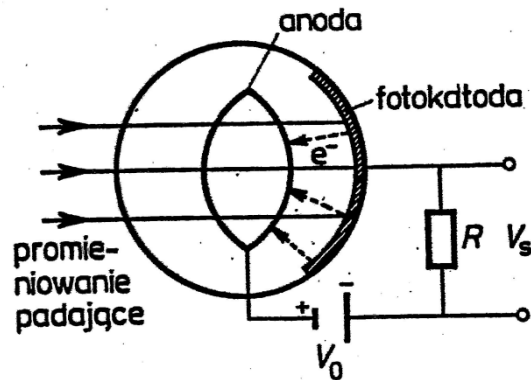
# Efekt fotoelektryczny zewnętrzny



Nobel 1921



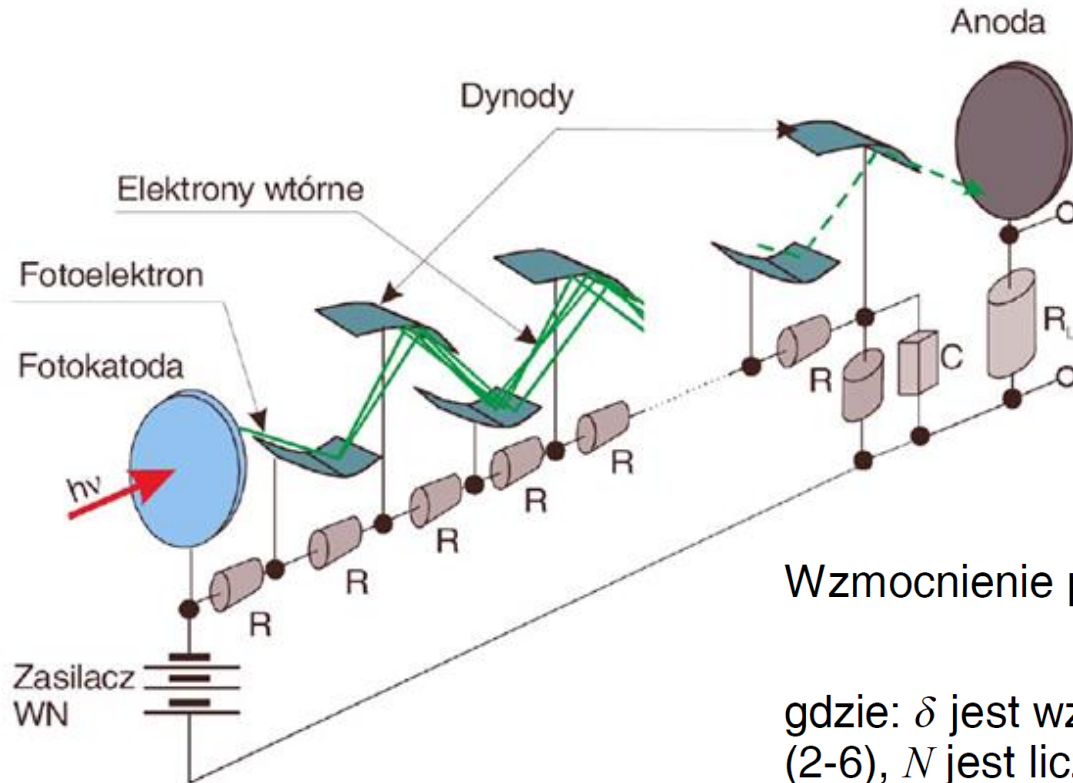
$$h\nu = W + E_{kmax}$$



Fotokomórka

# Detektory fotoemisyjne

## Fotopowielacze



Wzmocnienie prądowe

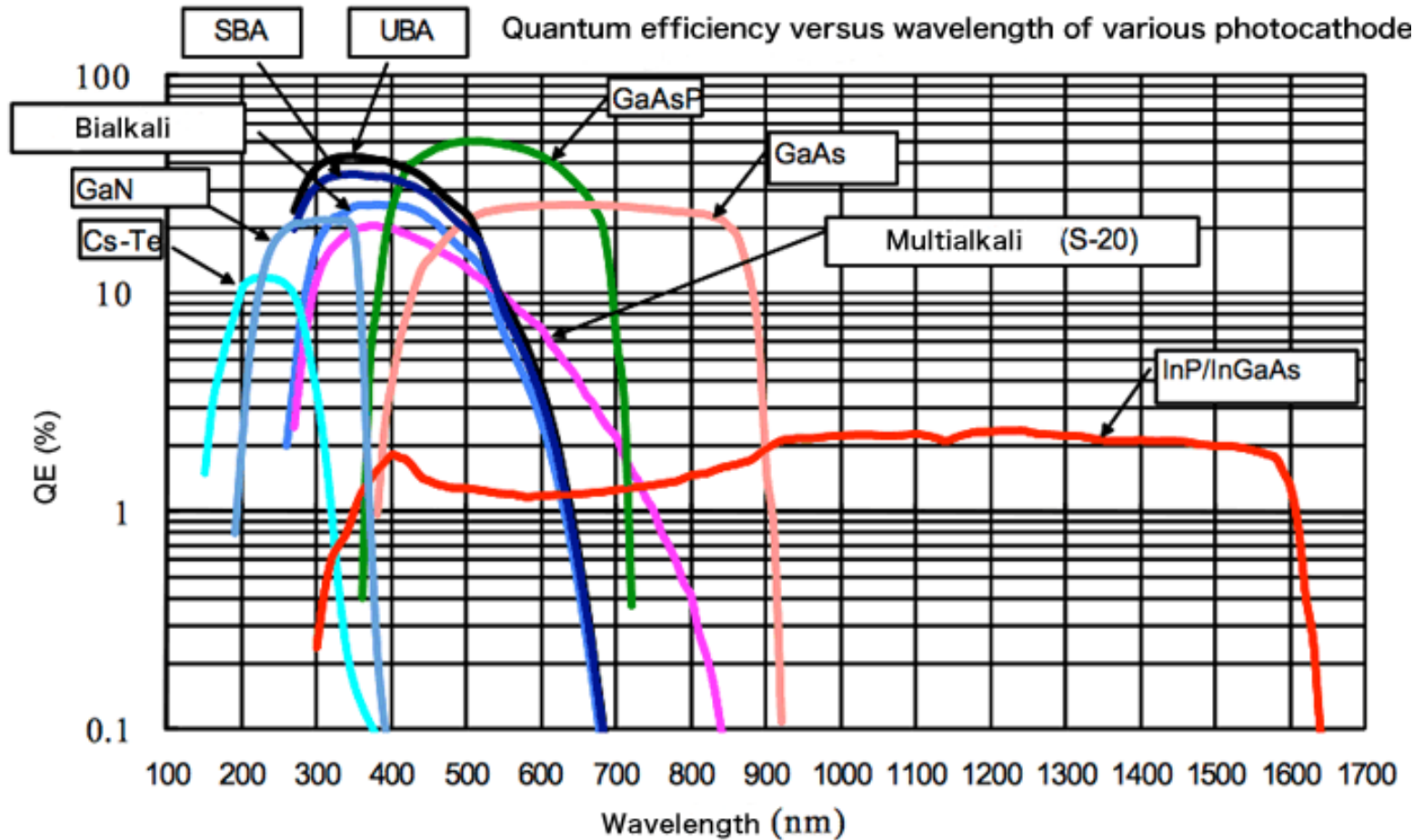
$$M = \delta^N,$$

gdzie:  $\delta$  jest wzmocnieniem każdej dynody (2-6),  $N$  jest liczbą dynod.

$$P_{\min} = \frac{2h\nu}{\eta} \sqrt{\frac{\bar{i}_d \Delta f}{e}}.$$

Dla typowych (ale dobrych) fotopowielaczy:  
 $10^{-15} - 10^{-16} \text{ W}$ .

# Fotokatody



**Multialkaliczne (Na-K-Sb-Cs), S-20**

# 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

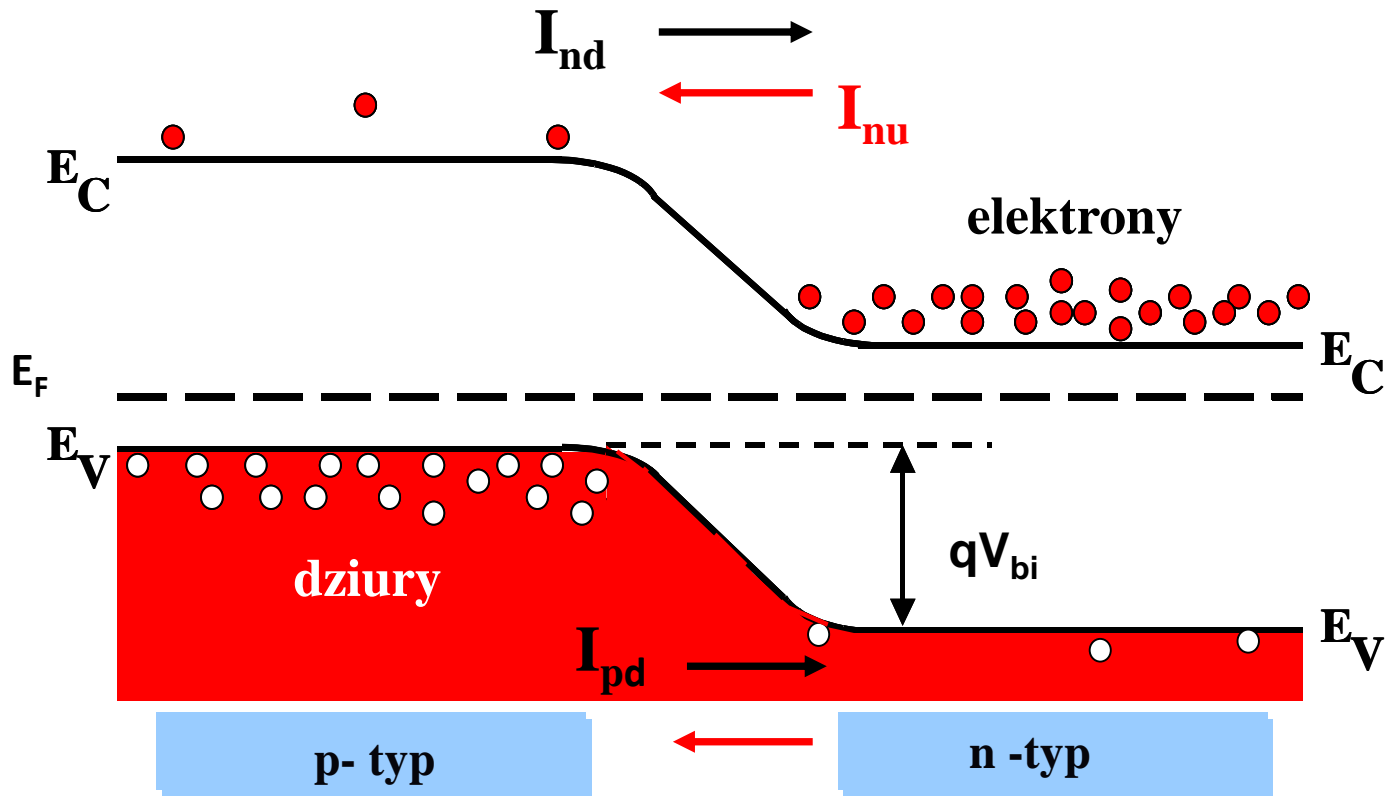
- Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku nadmiarowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego

$$E_f \geq E_g$$

- 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

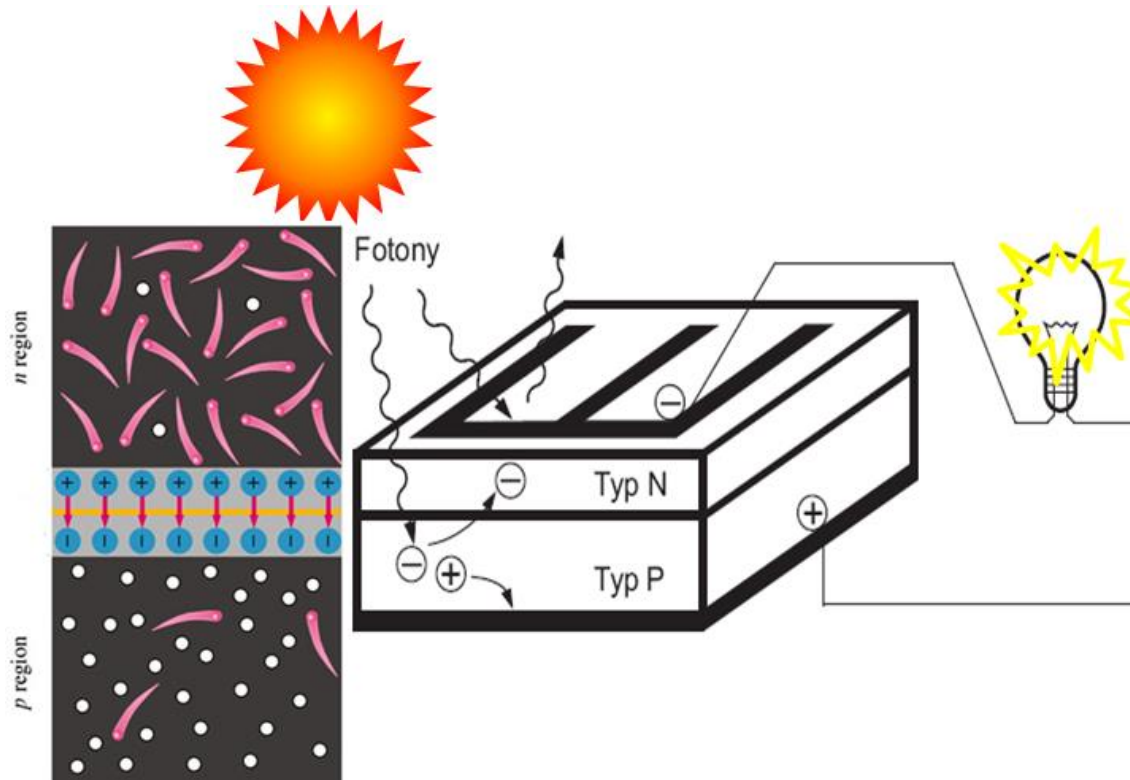


W stanie równowagi termodynamicznej przez złącze zawsze płynie pewien prąd nośników większościowych, (prąd dyfuzyjny) elektronów  $I_{nd}$  i dziur  $I_{pd}$  które są w stanie pokonać barierę potencjału na złączu. W stronę przeciwną płynie prąd generacji termicznej nośników mniejszościowych: (unoszenia)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

# Efekt fotowoltaiczny

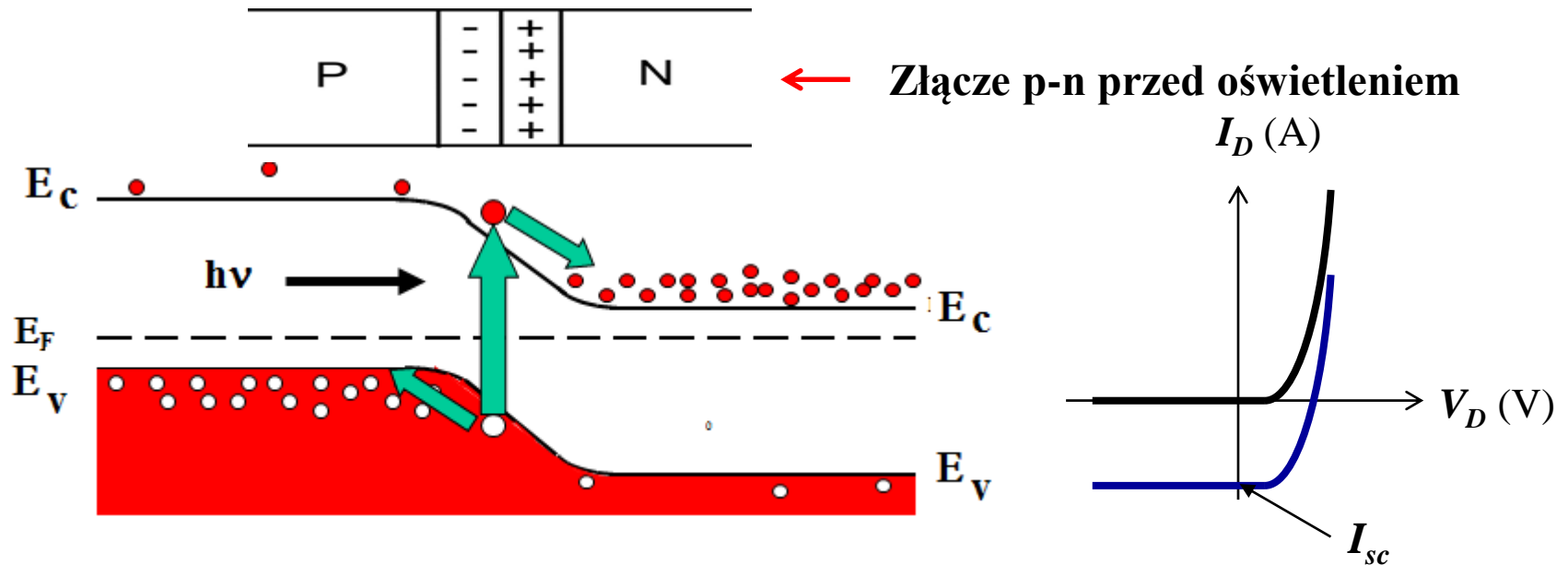
$$h\nu \geq E_g$$

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

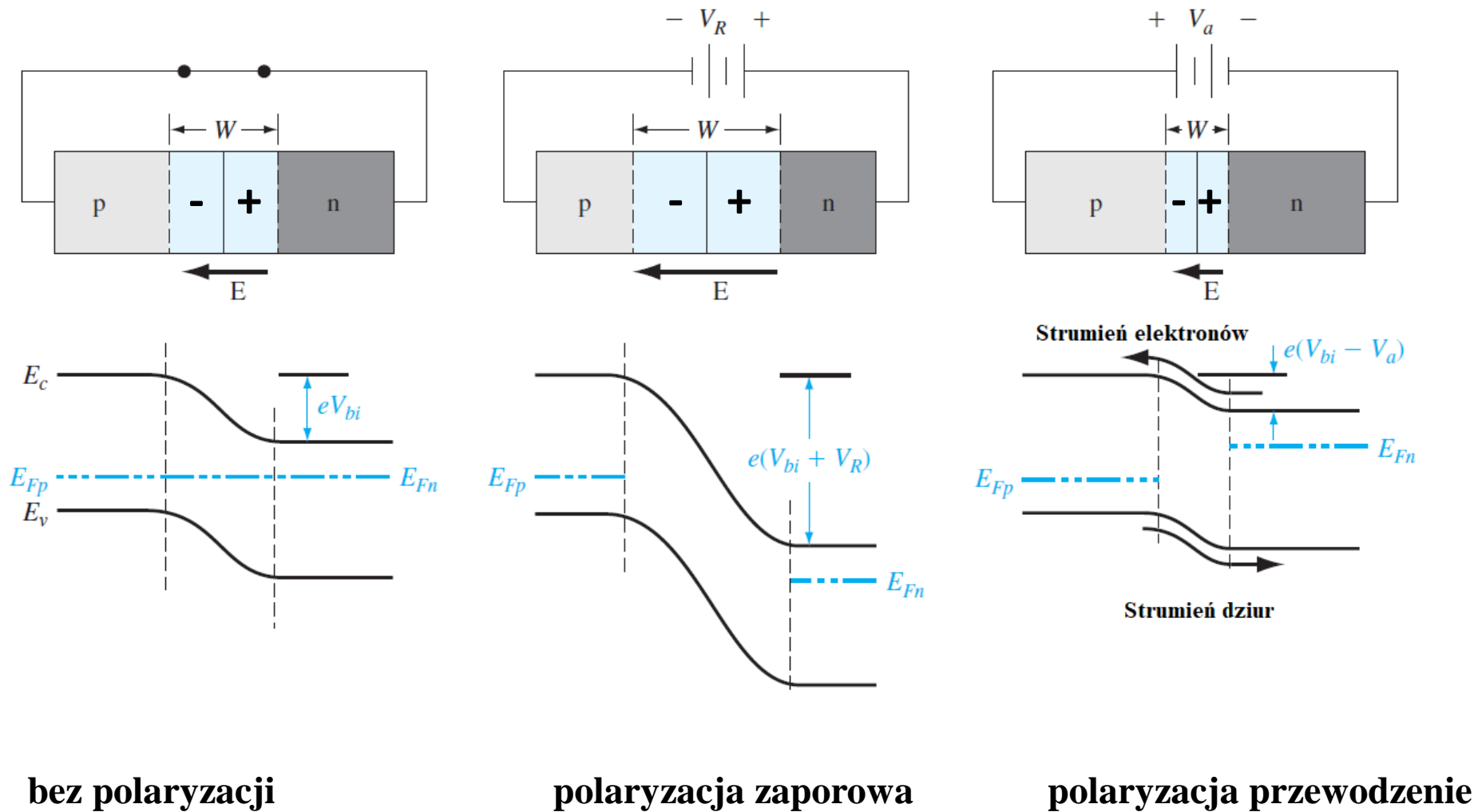


Bariera potencjału na złączu nie zmienia się. Gęstości prądów wstrzykiwania są takie same jak w złączu nieoświetlonym. Prądy te równoważą prądy generacji termicznej ale pozostają niezrównoważone prądy fotogeneracji. Stanowią je: strumień elektronów z obszaru p do n i dziur z n do p.

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

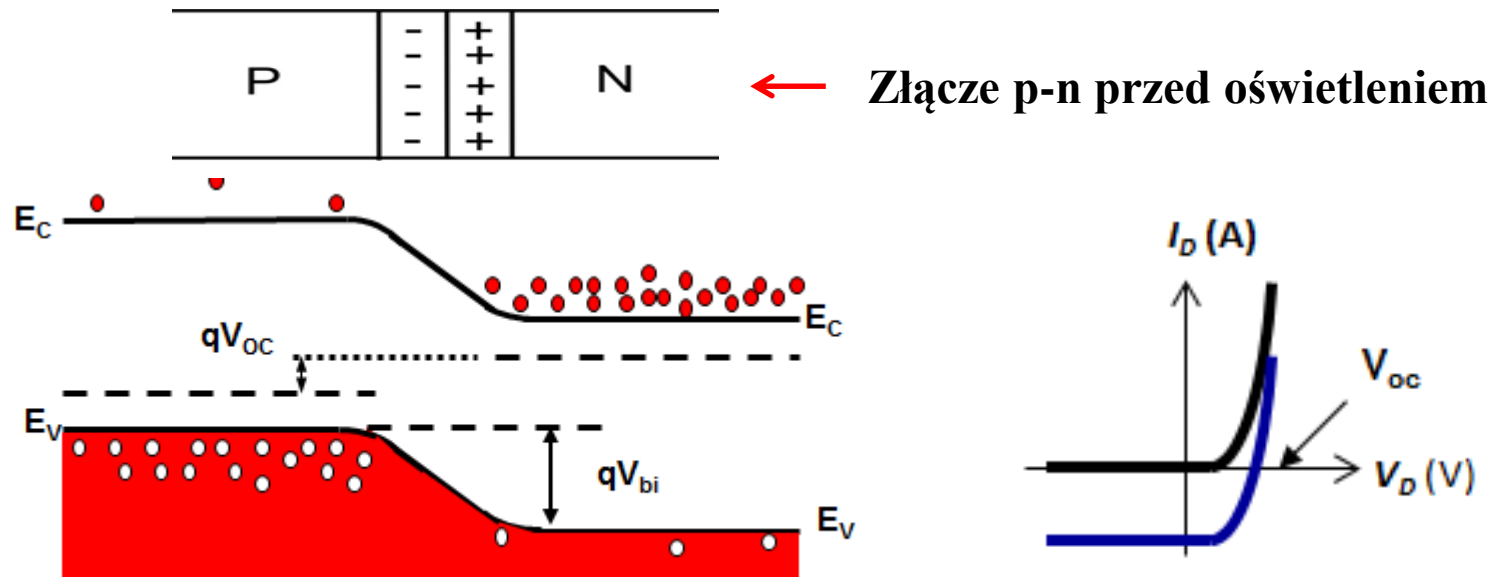
Prąd zwarcia jest proporcjonalny do strumienia padającego promieniowania.

# Polaryzacja złącza p-n



# 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  $I_{sc}$ :

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

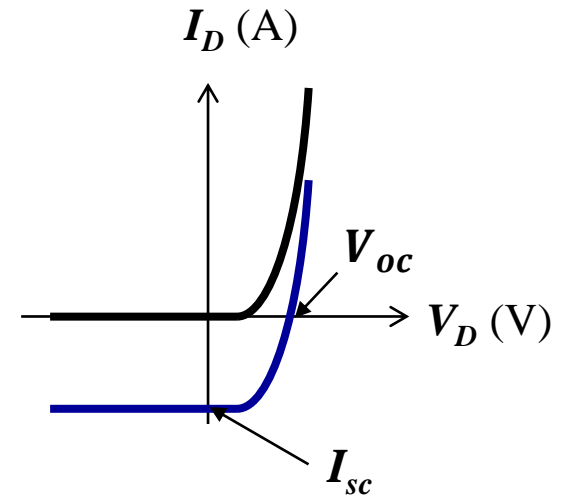
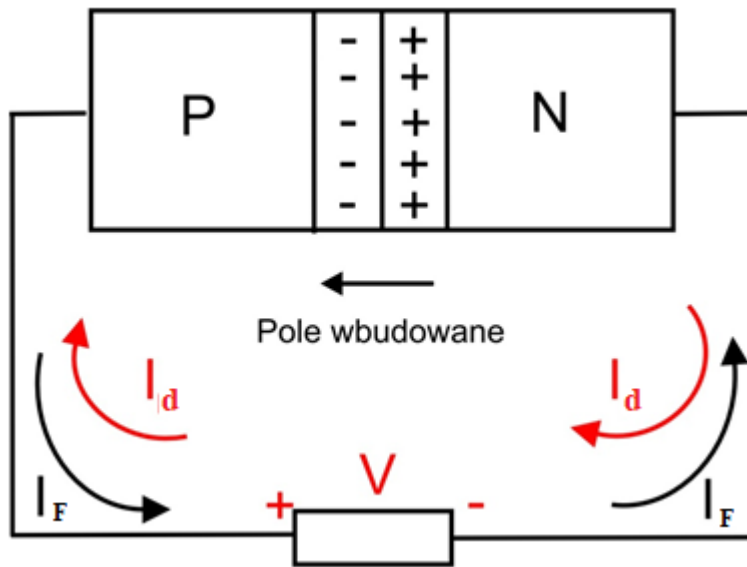
Po przekształceniu:

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

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:

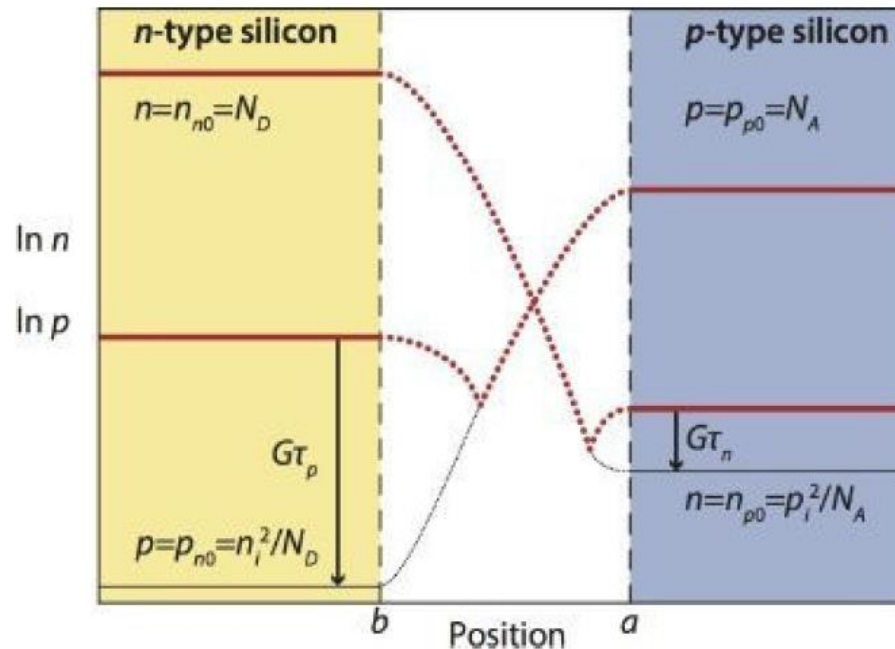
$$I = I_d - I_F$$

# Charakterystyka I-V

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

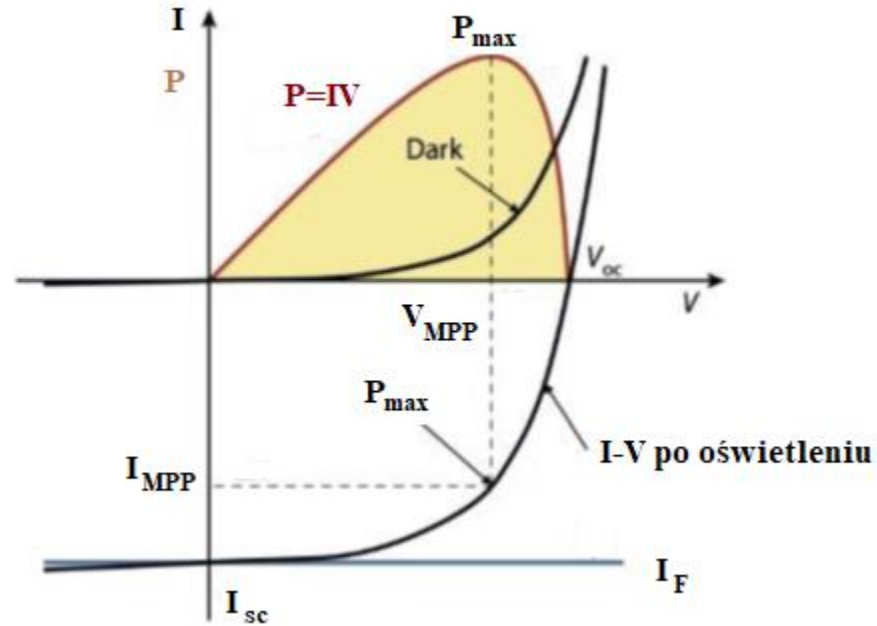
$L_n, L_p$  długość drogi dyfuzji nośników mniejszościowych (elektronów po stronie p i dziur po stronie n);

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





# Charakterystyka I-V



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

# Tryby pracy fotodiody

## Fotoprzewodnictwo

$$R_L i_D + V_D + V_0 = 0,$$

$$i_D = -\frac{1}{R_L} (V_0 + V_D).$$

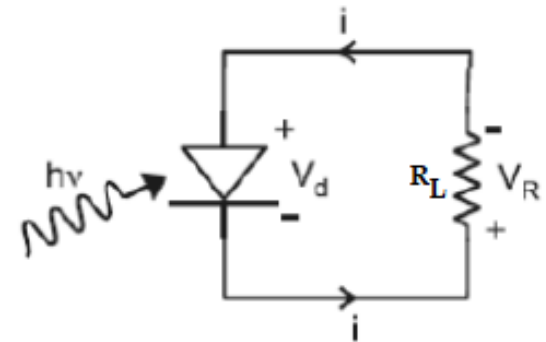
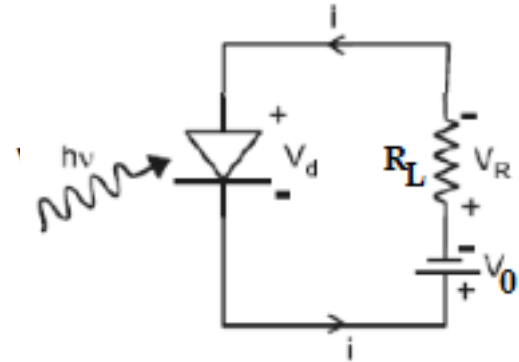
*Prosta obciążenia ma ujemny współczynnik kierunkowy.*

**Tryb fotowoltaiczny** – dioda działa jak *fotoogniwo*.

$$V_D + i_D R_L = 0,$$

proste obciążenia

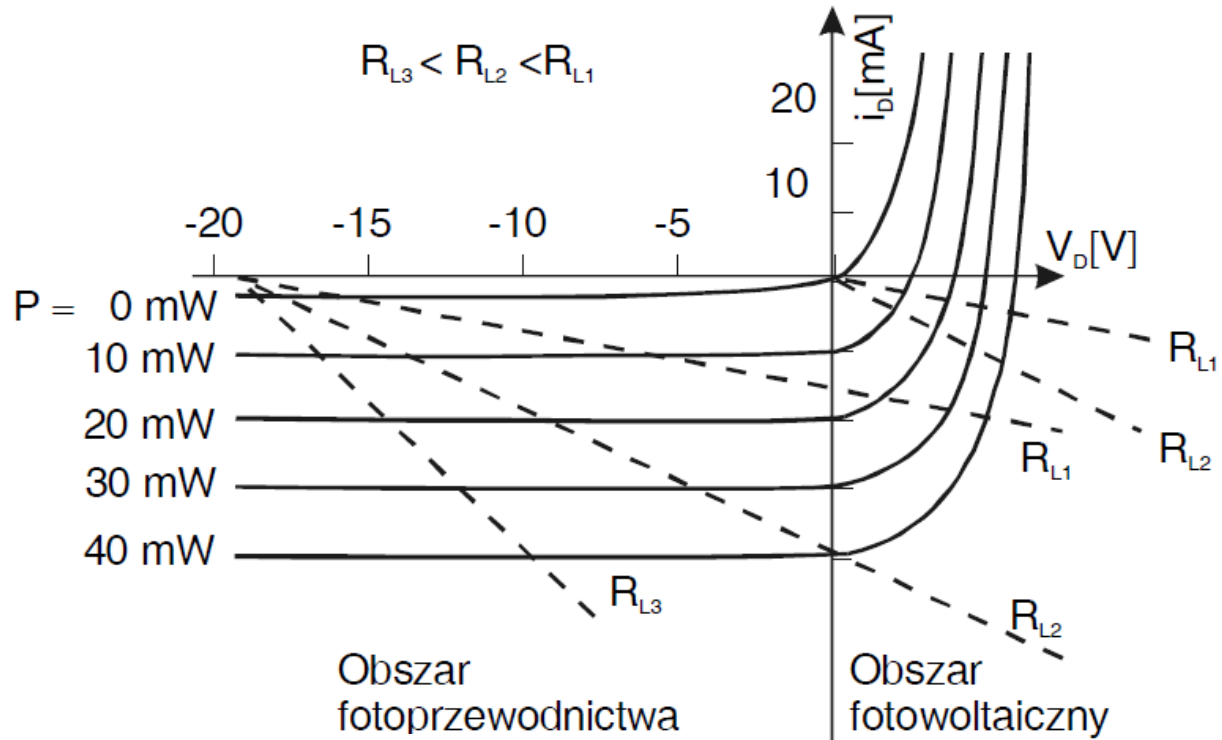
$$i_D = -\frac{V_D}{R_L}.$$



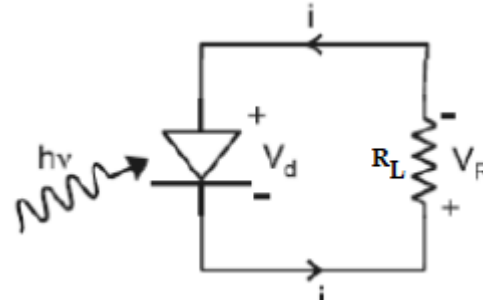
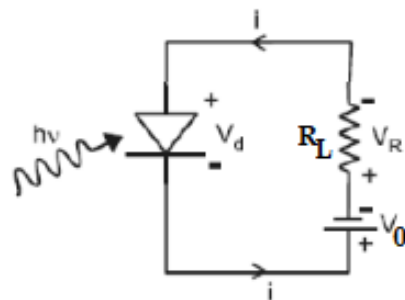
# Fotodioda – tryby pracy

Tryb *fotoprzewodnictwa* – spolaryzowane w kierunku zaporowym

Tryb *fotowoltaiczny* – złącze nie jest spolaryzowane



$$i_D = -\frac{1}{R_L}(V_0 + V_D)$$



$$i_D = -\frac{V_D}{R_L}$$

# Dioda i fotodioda p-i-n

- **Obszary p i n silnie domieszkowane (kontakty omowe)**
- **Szeroki obszar zubożony W, mała pojemność**

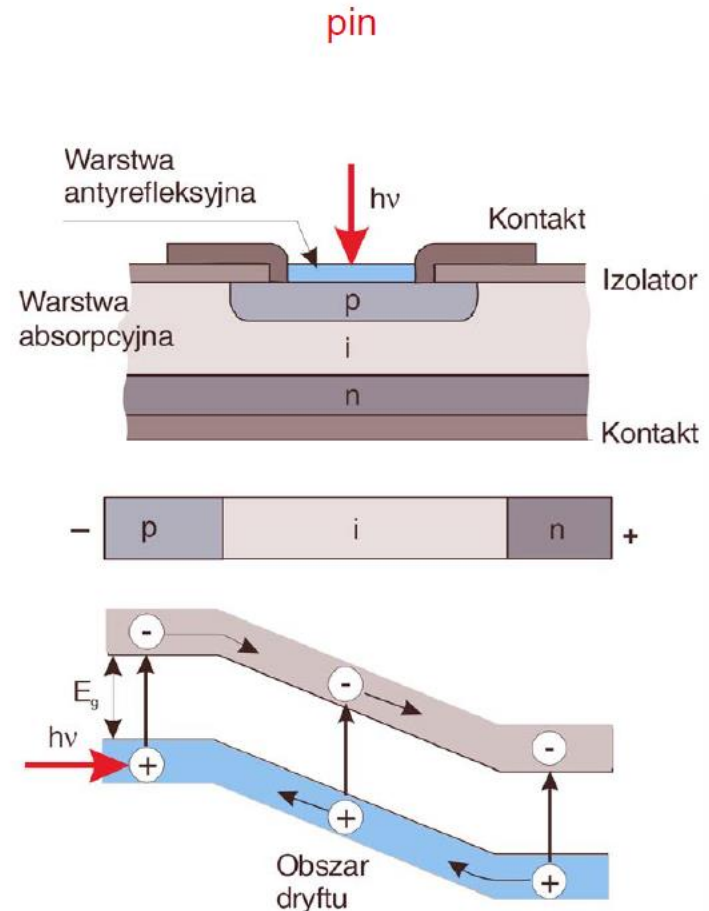
$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{W}$$

- **Krótką stałą czasową, b. szybka dioda**
- **Pracuje jako element przełączający**
- **Odporna na duże napięcia**

Czas narastania  $< 1ns$ , nawet do  $100ps$ .

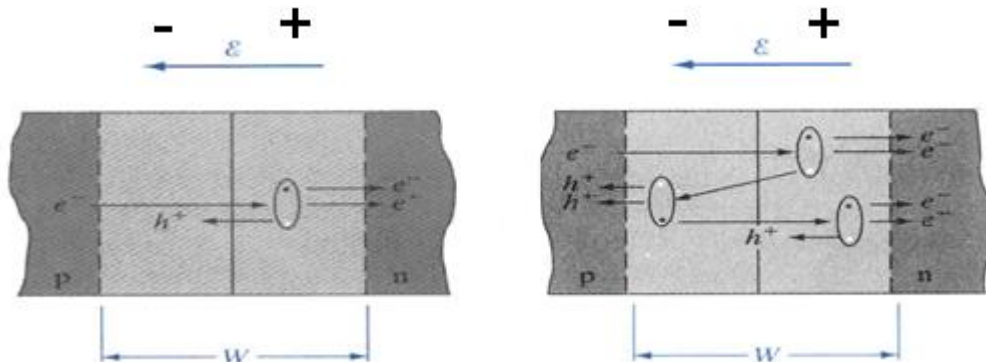
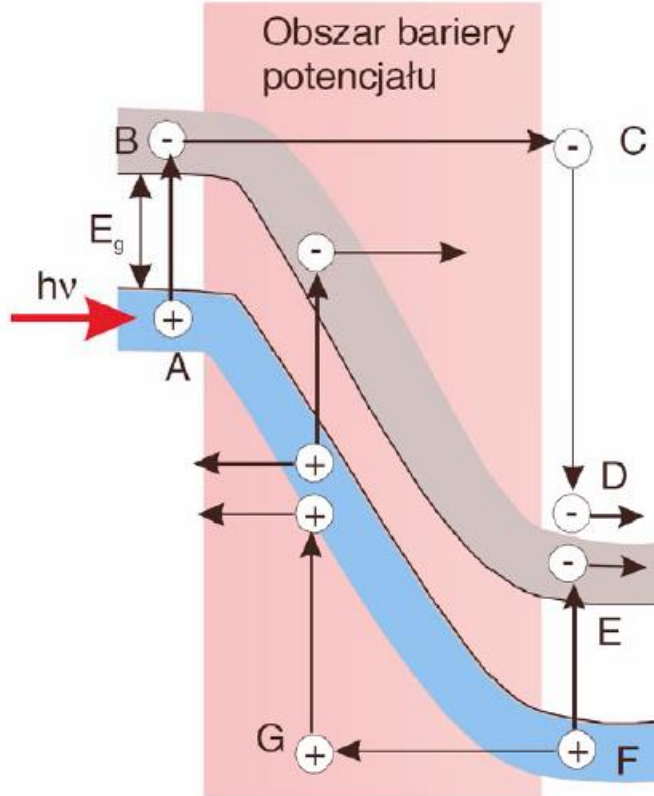
Sprawność konwersji około 80%.

Charakterystyki diod p-i-n podobne do p-n.



# Przebiecie lawinowe

Fotodioda lawinowa



Występuje dla złączy słabiej domieszkowanych

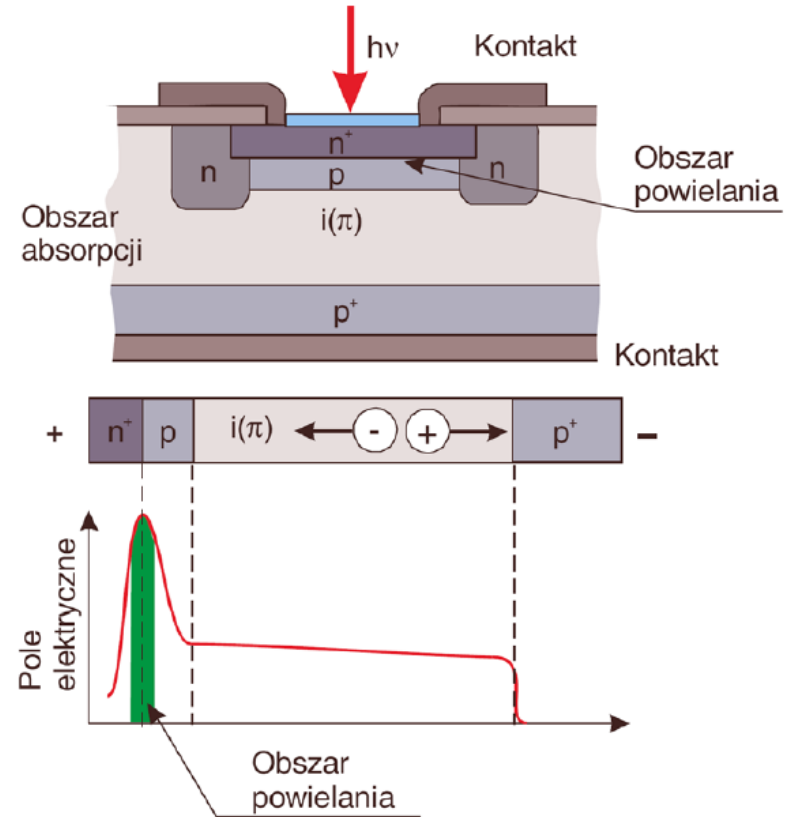
Pary elektron – dziura powstają w wyniku jonizacji zderzeniowej w silnym polu elektrycznym :

(a) Diagram pasmowy złącza spolaryzowanego w kierunku zaporowym; elektron zyskuje energię kinetyczną w silnym polu elektrycznym i wytwarza parę elektron – dziura w procesie jonizacji zderzeniowej;

(b) Pojedyncze zderzenie

(c) Powielanie jonizacji zderzeniowej.

# Dioda i fotodioda lawinowa



## Fotodioda lawinowa (Avalanche Photodiode)



## Licznik pojedynczych fotonów (Single Photon Counter)

B.Ziętek „Optoelektronika”

# Szum fotodiody

Fotodiody mogą być realizowane na złączu p-n, p-i-n, m-s, heterozłączu.  
Dla fotodiody  $G = 1$  i wydajność kwantowa wyraża się wzorem:

$$\eta = \frac{I_p}{q} \frac{hc}{P\lambda} \qquad S_i = \frac{I}{P} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$$

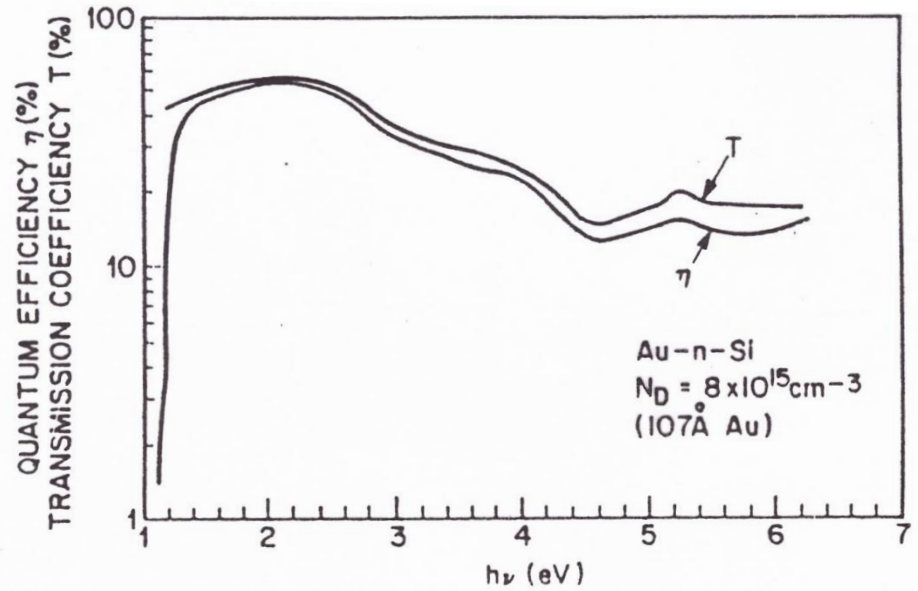
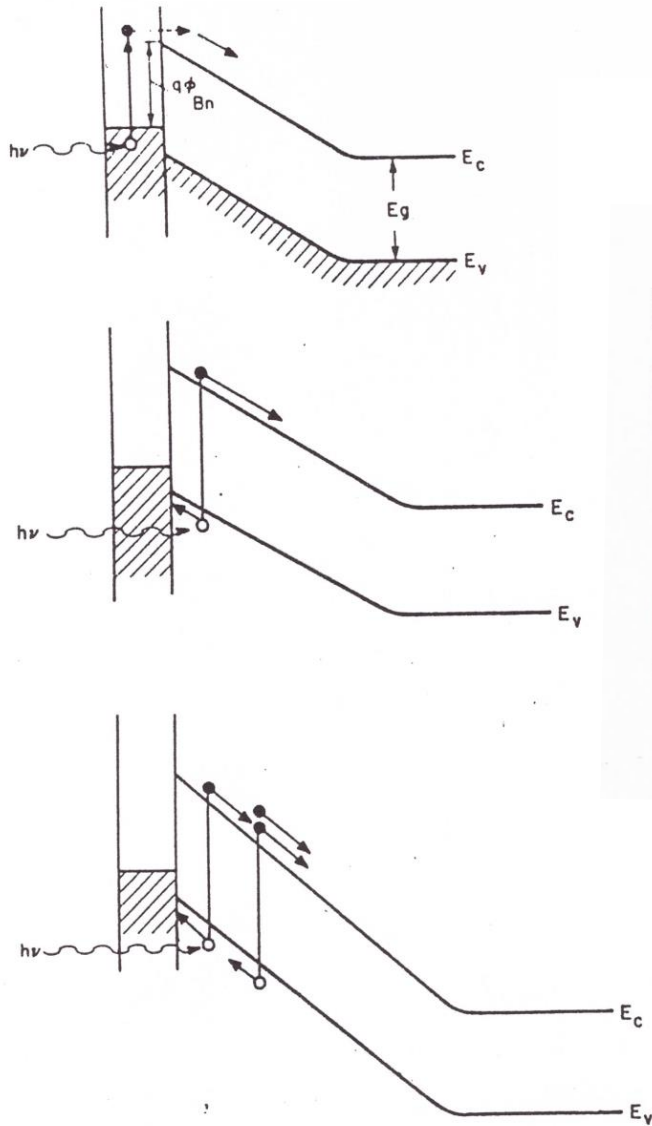
Przy pracy fotodiody bez polaryzacji zewnętrznej dominuje szum Johnsona – Nyquista. Ponieważ czułość napięciowa :

$$S_V = S_i R_D = \frac{\eta \lambda q R_D}{hc}$$

to detekcyjność wyraża się wzorem :

$$D^*_\lambda = \frac{\eta \lambda q}{2hc} \sqrt{\frac{R_D A}{kT}} = \frac{S_V \sqrt{A}}{2\sqrt{kTR_D}}$$

# Fotodioda na złączu m-s



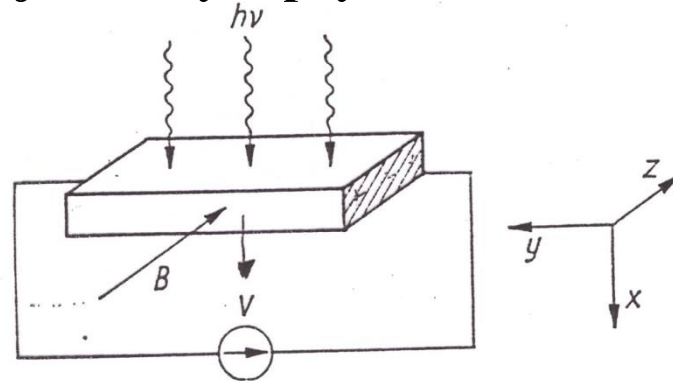


# Detektory fotonowe cd.

## Efekt fotomagnetoelektryczny (PEM).

- Półprzewodnik z niejednorodnością (np. z gradientem  $E_g$ ). Wygenerowane ładunki poruszają się w obecności tej niejednorodności.
- W obecności pola magnetycznego na poruszające się ładunki działa siła Lorentza i na końcach próbki pojawia się napięcie.

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$$



## Efekt Dembera

- Półprzewodnik. Dziury są mniej ruchliwe niż elektrony.
- Generacja światłem par elektron-dziura
- Elektrony docierają szybciej do nieoświetlonego końca próbki.
- Pojawia się napięcie między końcami próbki.

# Detektory fotonowe cd.

- Detektory „photon drag” (pociąganie przez fotony)

W półprzewodnikach b. silnie domieszkowanych dla długości fal  $\lambda \gg \frac{hc}{E_g}$  występuje absorpcja przez swobodne nośniki.

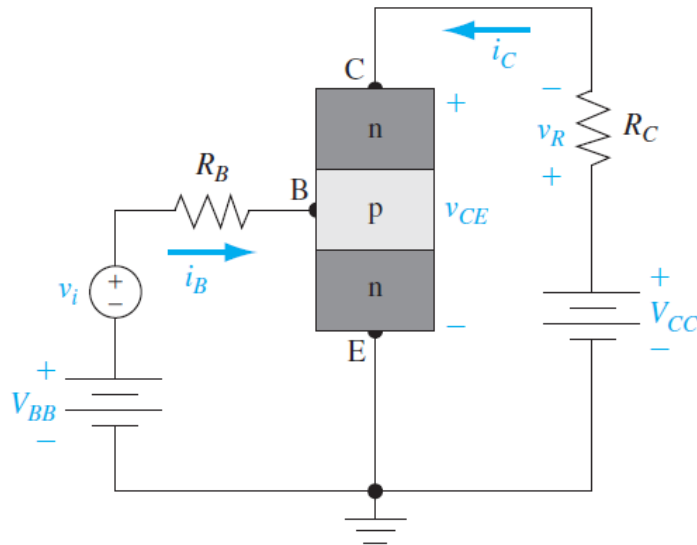
Fotony przekazują swój pęd nośnikom swobodnym i powodują ich ruch w kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji fali elektromagnetycznej.

- Detektor Putley’a.

Jest to detektor na tzw. gorących nośnikach. Po oświetleniu następuje wzrost przewodnictwa.

Zarówno w przypadku detektora Putley’a jak i detektora „photon drag” zakres spektralny czułości zawarty jest w obszarze submilimetrowym i dalekiej podczerwieni.

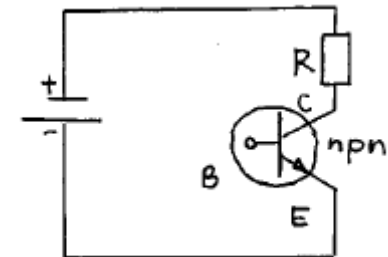
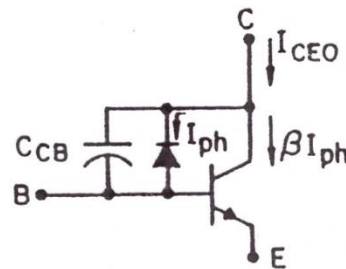
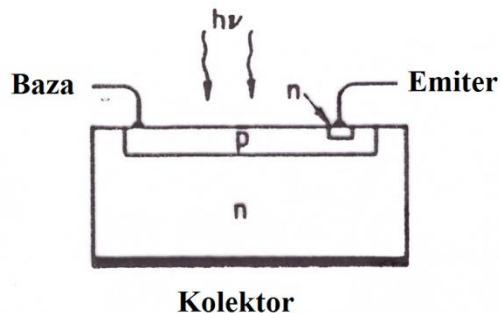
# Tranzystor



Urządzenie to najczęściej pracuje w układzie wspólnego emitera. Tranzystor n-p-n w układzie o wspólnym emiterze, pracuje w ten sposób, że złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia a baza-kolektor w kierunku zaporowym. Przez złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia (baza-emiter) płynie duży prąd nośników większościowych, elektronów z n do p i dziur z p do n. Prąd elektronowy w obszarze bazy (p) jest prądem nośników mniejszościowych, który z kolei jest dominującym prądem gdy złącze jest spolaryzowane w kierunku zaporowym. Pole elektryczne wzmacnia ten prąd. W ten sposób w tranzystorze uzyskuje się duże wzmocnienie prądowe: prąd kolektora jest zwykle dwa rzędy większy od prądu bazy.

# Fototranzystor

W fototranzystorze baza nie jest nigdzie połączona elektrycznie, czyli złącze baza-emiter jest rozwarte. Fotony generują w tej sytuacji fotonapięcie, które jest równoważne spolaryzowaniu złącza emiter-baza w kierunku przewodzenia. Dalej fototranzystor działa jak zwykły tranzystor. Dodatkowo dziury generowane w obszarze p (bazy) i te wciągane z obszaru kolektora zmniejszają napięcie na złączu baza-emiter, zwiększając prąd nośników większościowych. Zmiany w obszarze bazy spowodowane oświetleniem obserwuje się w obwodzie kolektora, zwykle mierząc spadek napięcia na oporniku połączonym z kolektorem. Na rys. poniżej przedstawiono schemat układu do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych i oświetleniowych fototranzystora. Dla fototranzystora n-p-n kolektor podłącza się do wyjścia „+” zasilacza a emiter do wyjścia „-”.



# Porównanie detektorów fotonowych

Fotodetektor	Wzmocnienie G	Czas odpowiedzi (s)	Temperatura pracy (K)
Detektor fotoprzewodzący	$1-10^6$	$10^{-3}-10^{-8}$	4.2-300
Złącze p-n	1	$10^{-11}$	300
Złącze p-i-n	1	$10^{-8}-10^{-10}$	300
Dioda metal-półprzewodnik	1	$10^{-11}$	300
Dioda lawinowa	$10^2-10^4$	$10^{-10}$	300
Tranzystor bipolarny	$10^2$	$10^{-8}$	300
Tranzystor polowy	$10^2$	$10^{-8}$	300

# Detektory fotonowe

