

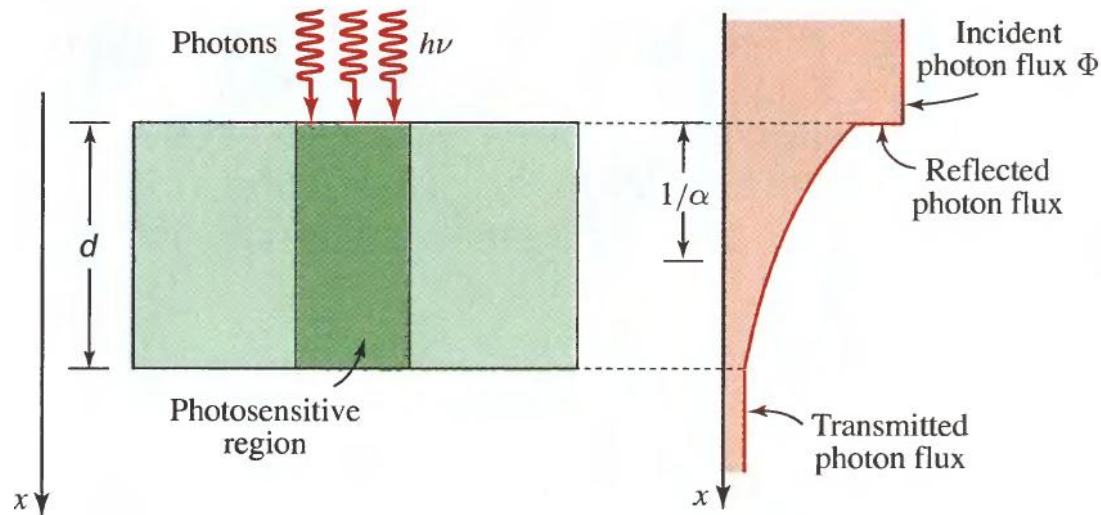
Wykład X

Detektory fotonowe

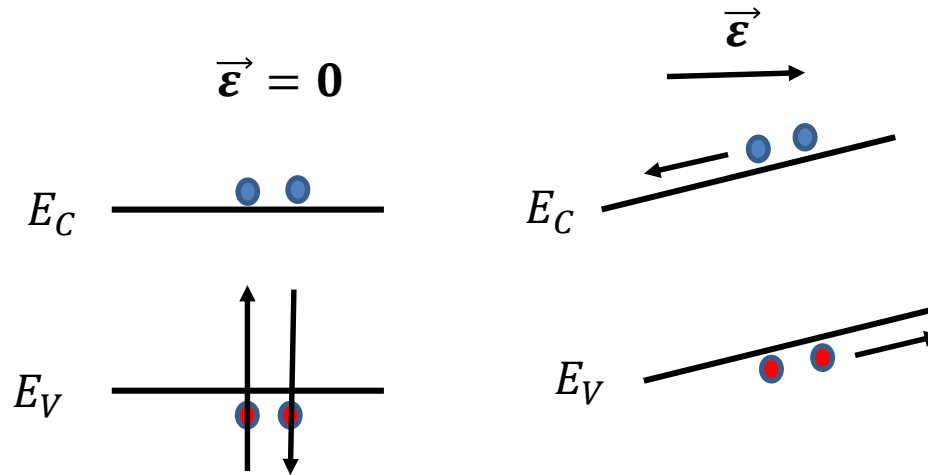
Wydajność kwantowa

$$\eta = (1 - \mathcal{R}) \zeta [1 - \exp(-\alpha d)]$$

- Człon $(1-R)$ – straty na odbicie
- Człon ζ - pary elektron – dziura, które dotrą do elektrod i dadzą wkład do fotoprądu
- Fotony, które zostaną zaabsorbowane



Półprzewodnik w polu elektrycznym

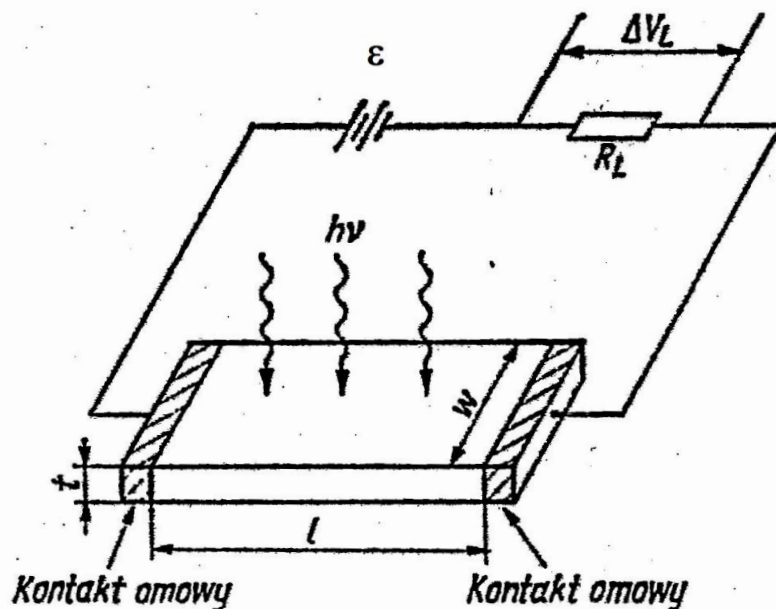


Efekt fotoprzewodnictwa jest możliwy po spolaryzowaniu półprzewodnika. Wówczas pary elektron-dziura wygenerowane światłem zostaną rozseparowane. Elektrony zaczną się poruszać w stronę potencjału dodatniego a dziury w stronę potencjału ujemnego – zaczną płynąć prąd. W przeciwnym razie swobodne nośniki 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.

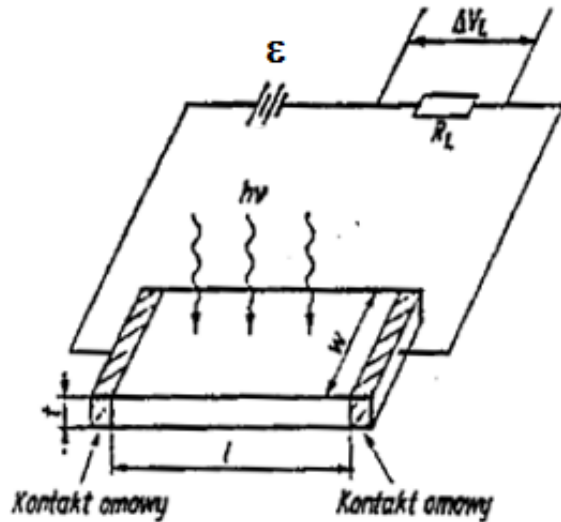
Sygnal ΔV_L jest mierzony na rezystancji R_L , która jest tak dobierana aby była równa rezystancji ciemnej detektora R_D .



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

Czułość napięciowa detektora fotoprzewodzącego

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



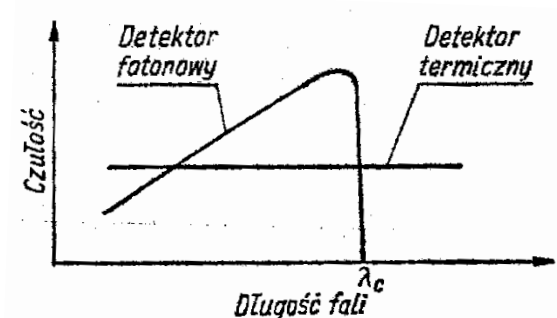
$$R_V = \frac{\Delta V_L}{P_\lambda \Delta \lambda} = \frac{\Delta V_L}{P}$$

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

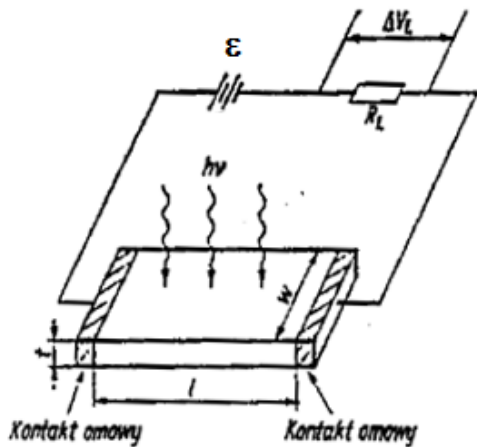
$$R_V = \frac{\Delta V_L}{P} = R_D q \frac{\eta \tau_n}{hc t_r} \lambda$$



R_D - rezystancja detektora nieoświetlonego (ciemna),
 η - wydajność kwantowa, τ_n - czas życia elektronów,
 t_r - czas przejścia elektronu między elektrodami półprzewodnika (detektora fotoprzewodzącego o długości l)



Detektor fotoprzewodzący (PC)



$$R_V = \frac{\Delta V_L}{P} = R_D q \frac{\eta}{hc} \frac{\tau_n}{t_r} \lambda \quad \left[\frac{V}{W} \right]$$

t_r - czas przejścia elektronu między elektrodami półprzewodnika (detektora fotoprzewodzącego o długości l):

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

v_d - prędkość elektronów, μ – ruchliwość elektronów, E – natężenie pola elektrycznego w półprzewodniku (w wyniku polaryzacji źródłem o sem ϵ) i odpowiadające mu napięcie stałe V_D na półprzewodniku.

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

Czułość detektora PC jest liniową funkcją długości fali λ i przyłożonego napięcia stałego.

Detektory fotoprzewodzące

Jeśli zdefiniuje się fotoprąd pierwotny: $I_0 = q \frac{\eta P}{hc} \lambda$

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

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: $1-10^6$

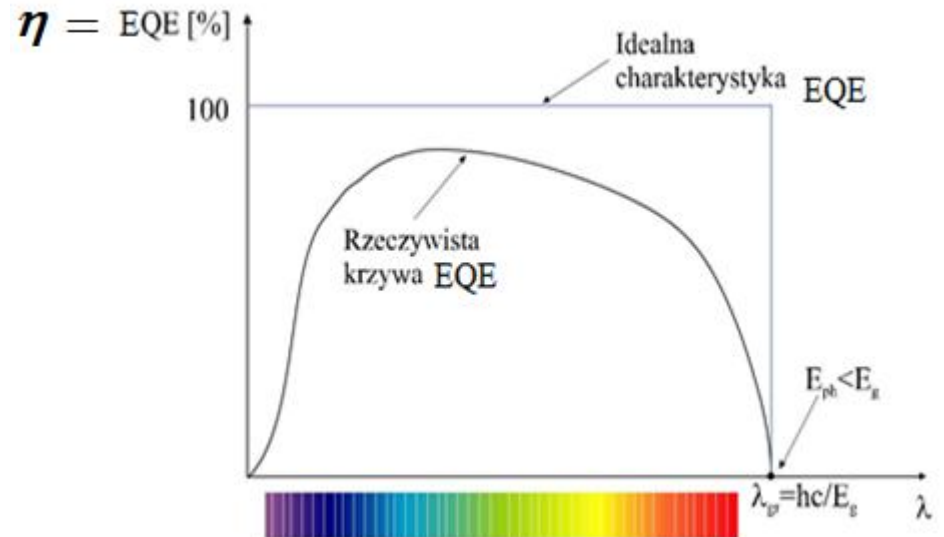
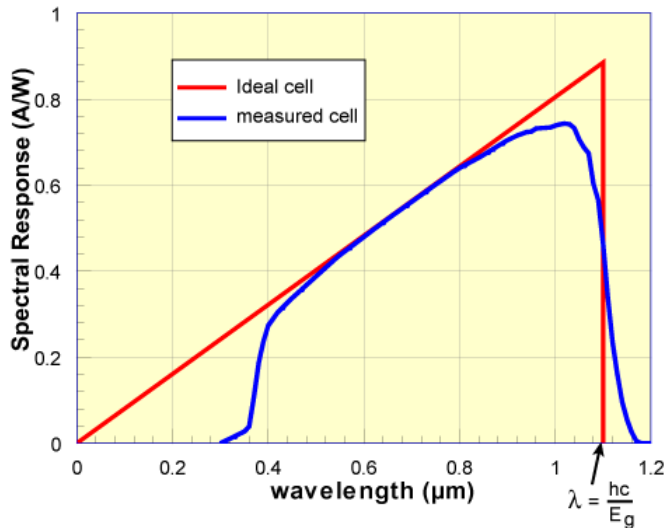
Zewnętrzna wydajność kwantowa

Zewnętrzna wydajność kwantowa η (ang. External Quantum Efficiency):
stosunek liczby elektronów do liczby fotonów.

Dla $G = 1$:

$$I_{ph} = q \frac{\eta P}{hc} \lambda$$

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{\frac{P}{hc}/\lambda} = \frac{R_i}{q\lambda} hc$$

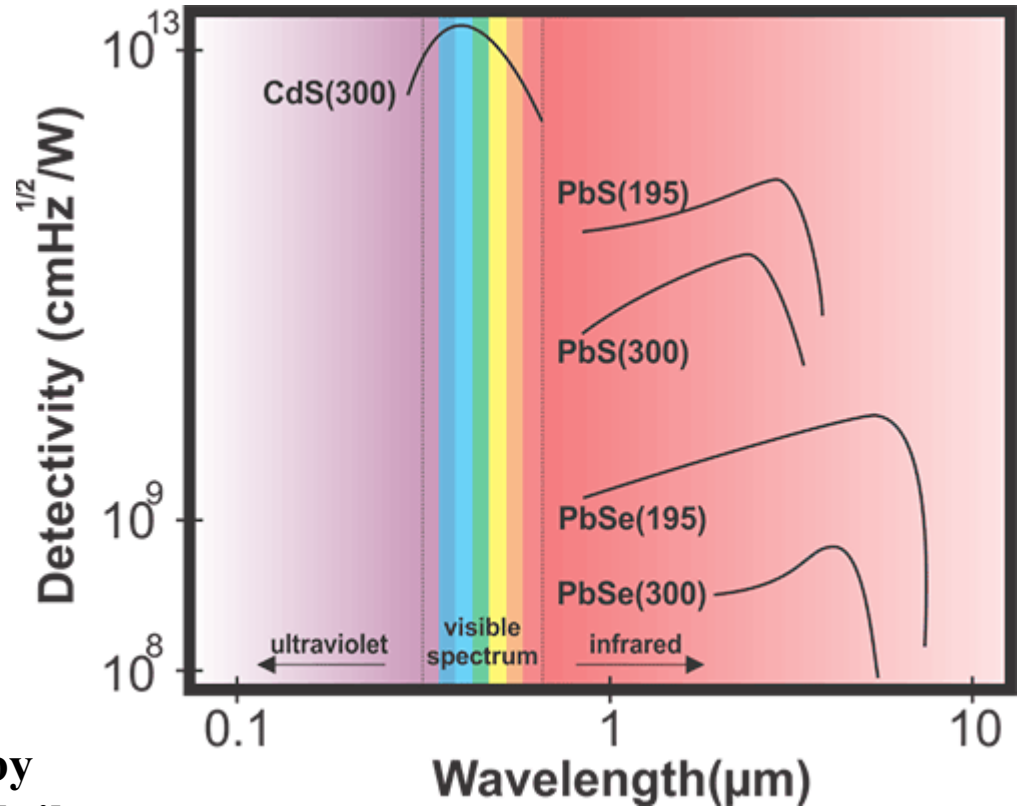
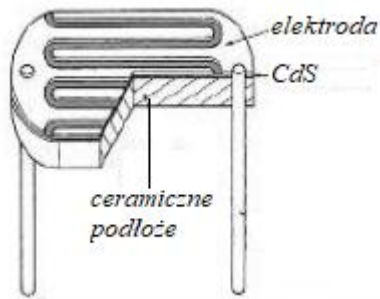
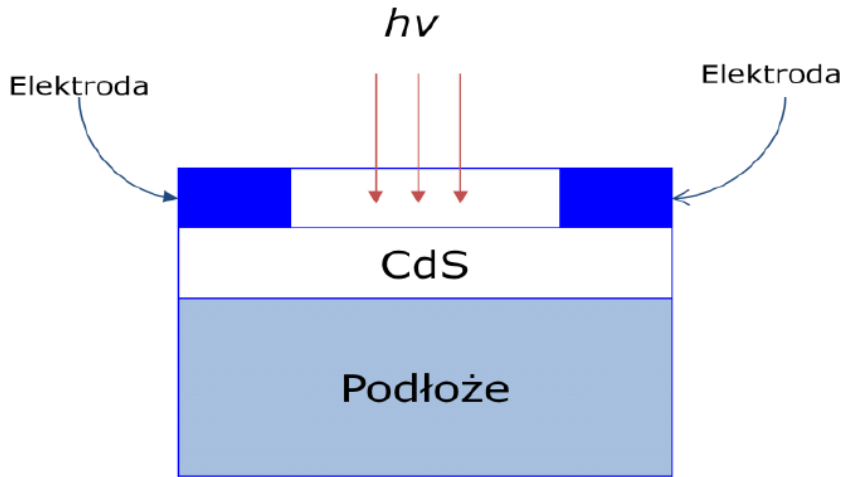


Detektory fotoprzewodzące

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

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

Fotorezystor CdS

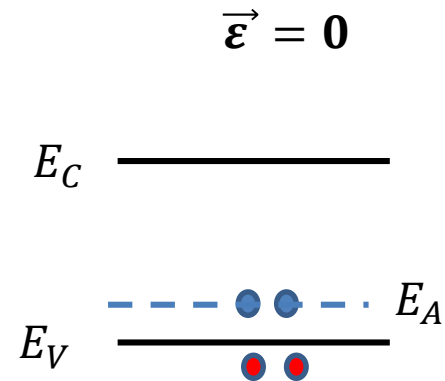


Elektrody są tak zaprojektowane, aby zmniejszyć przesłonięcie półprzewodnika i zminimalizować czas dotarcia do nich przez fotonosniki.

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

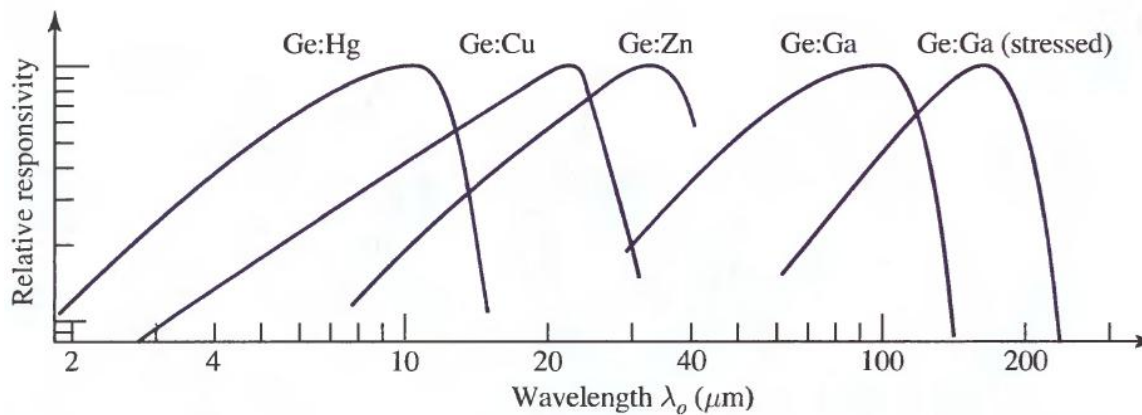
Fotorezystory

- **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 ($E_A = 40\text{meV}$)

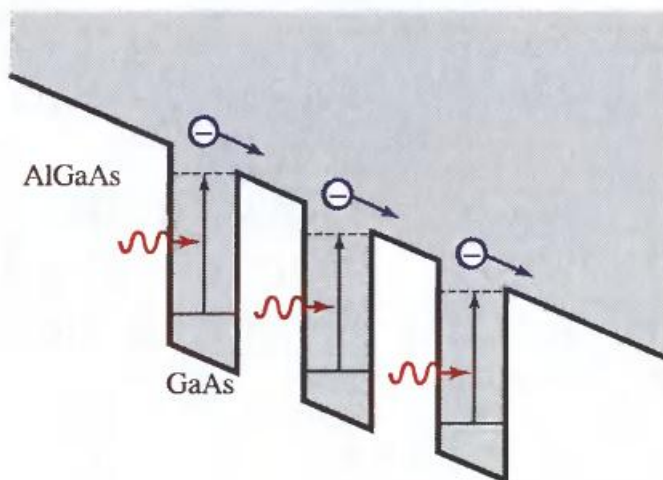


Detektory fotoprzewodzące na podczerwień

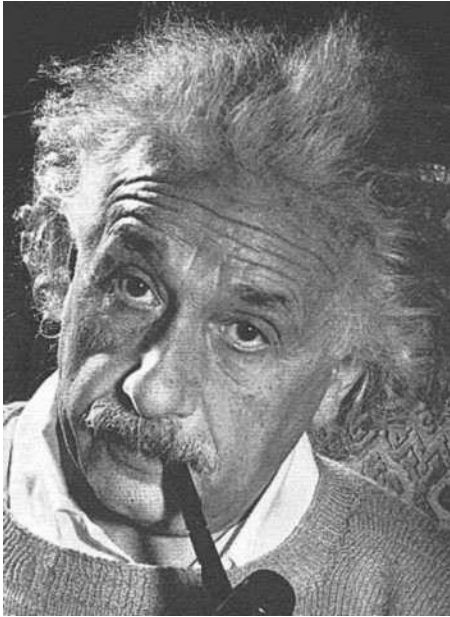
- Półprzewodniki domieszkowane



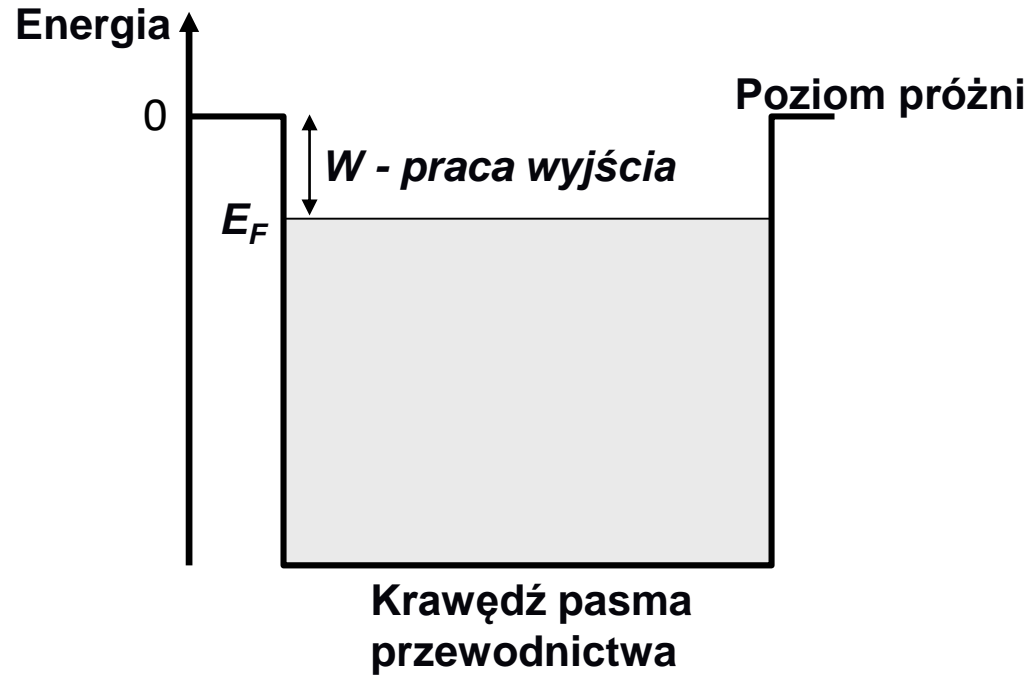
- Heterostruktury



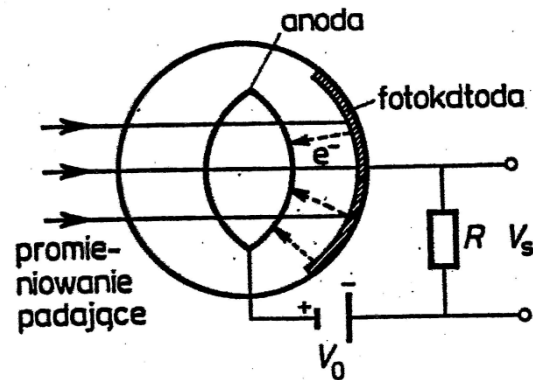
Efekt fotoelektryczny zewnętrzny



Nobel 1921

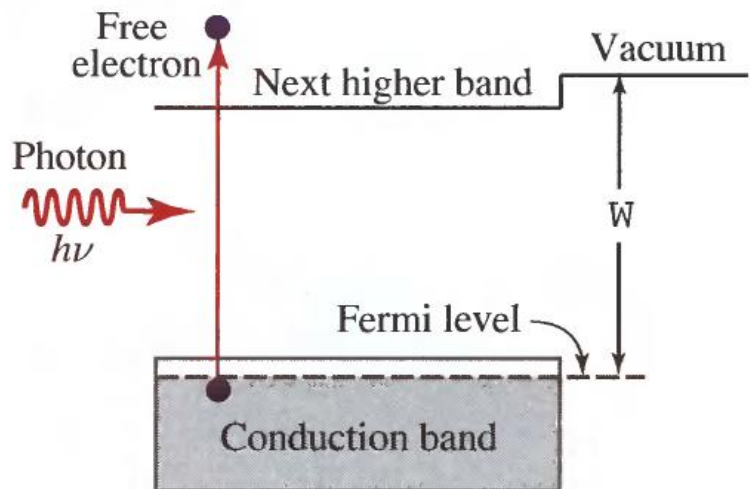


$$h\nu = W + E_{kmax}$$

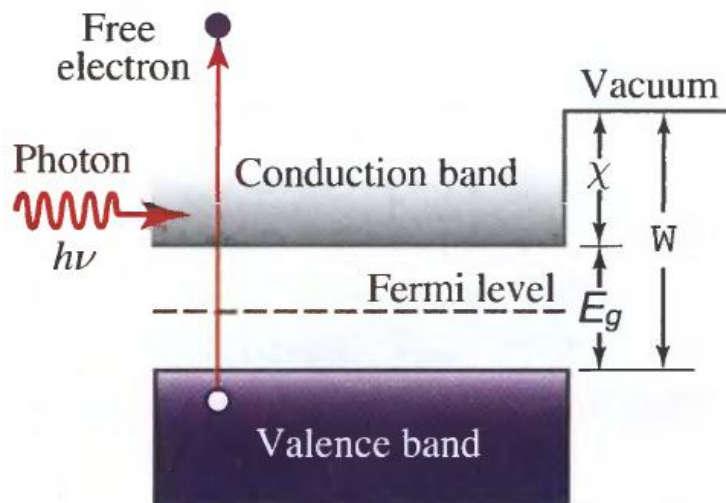


Fotokomórka

Fotoemisja z metali i z półprzewodników



$$E_{\max} = h\nu - W$$

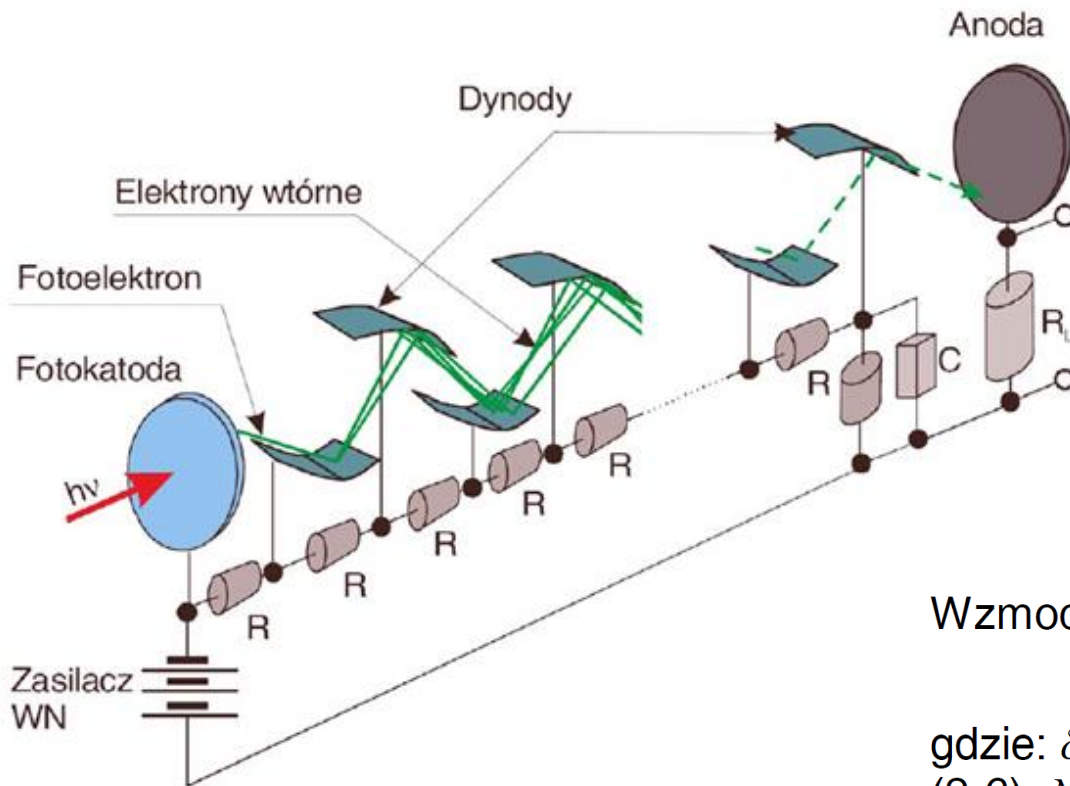


$$E_{\max} = h\nu - W = h\nu - (E_g + \chi)$$

Istnieją półprzewodniki o ujemnym powinowactwie (Negative Electron Affinity) – pasmo przewodnictwa jest powyżej poziomu próżni i fotoemisja zachodzi gdy energia fotonu jest co najmniej równa E_g .

Detektory fotoemisyjne

Fotopowielacze



Wzmocnienie prądowe

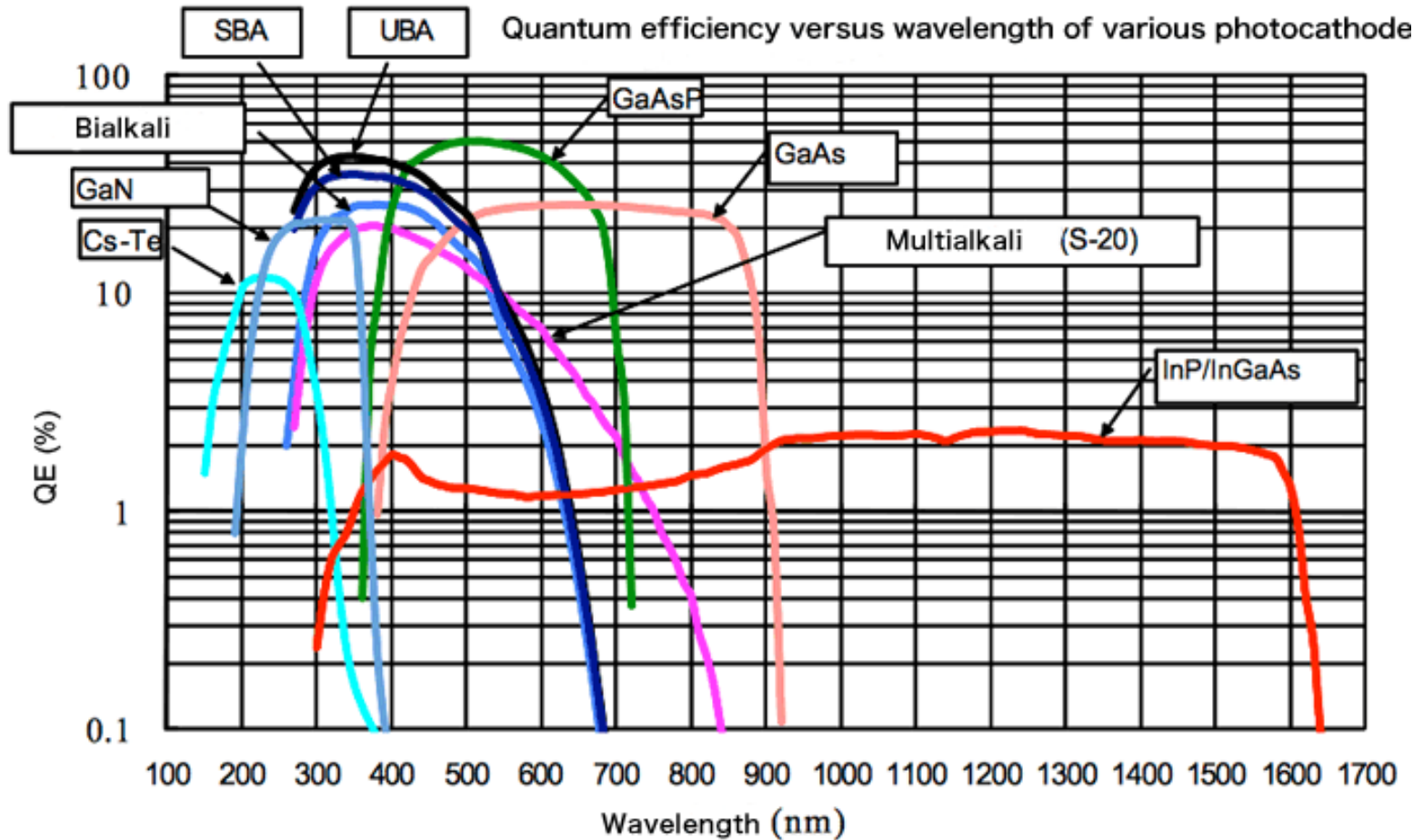
$$M = \delta^N,$$

gdzie: δ 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

Bialkaliczne (Na-K-Sb, Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)

Fotopowielacz z fotokatodą SBA (superbialcalic)

The Photomultiplier

R 7081-100 from Hamamatsu



$\varnothing=10$ inch

SBA photocathode, QE \approx 35% @ 400nm

Gain $\sim 10^7$, dark current ~ 8 kHz

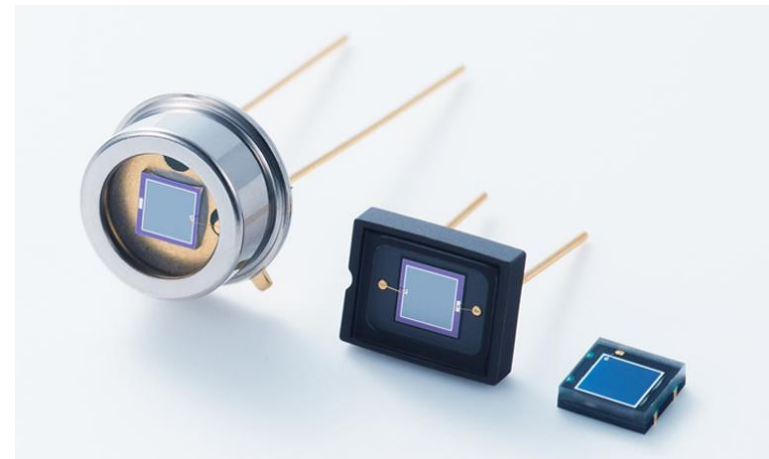
Bateria słoneczna i fotodioda

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

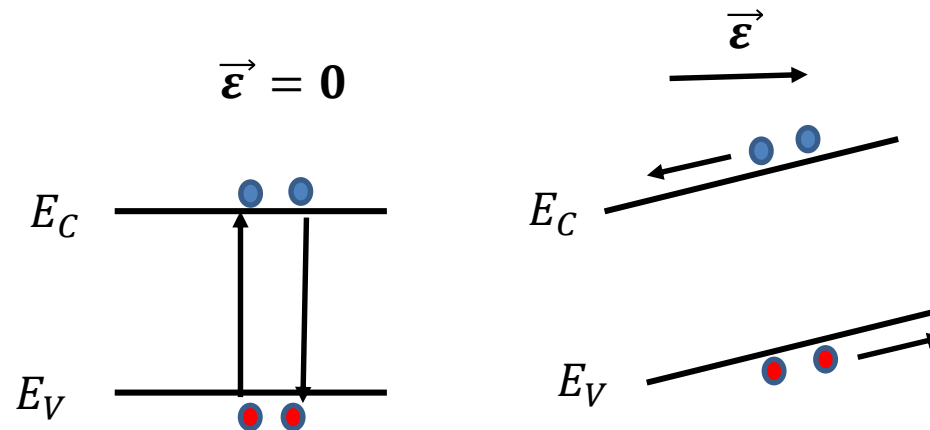


Warunki wystąpienia efektu fotowoltaicznego

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

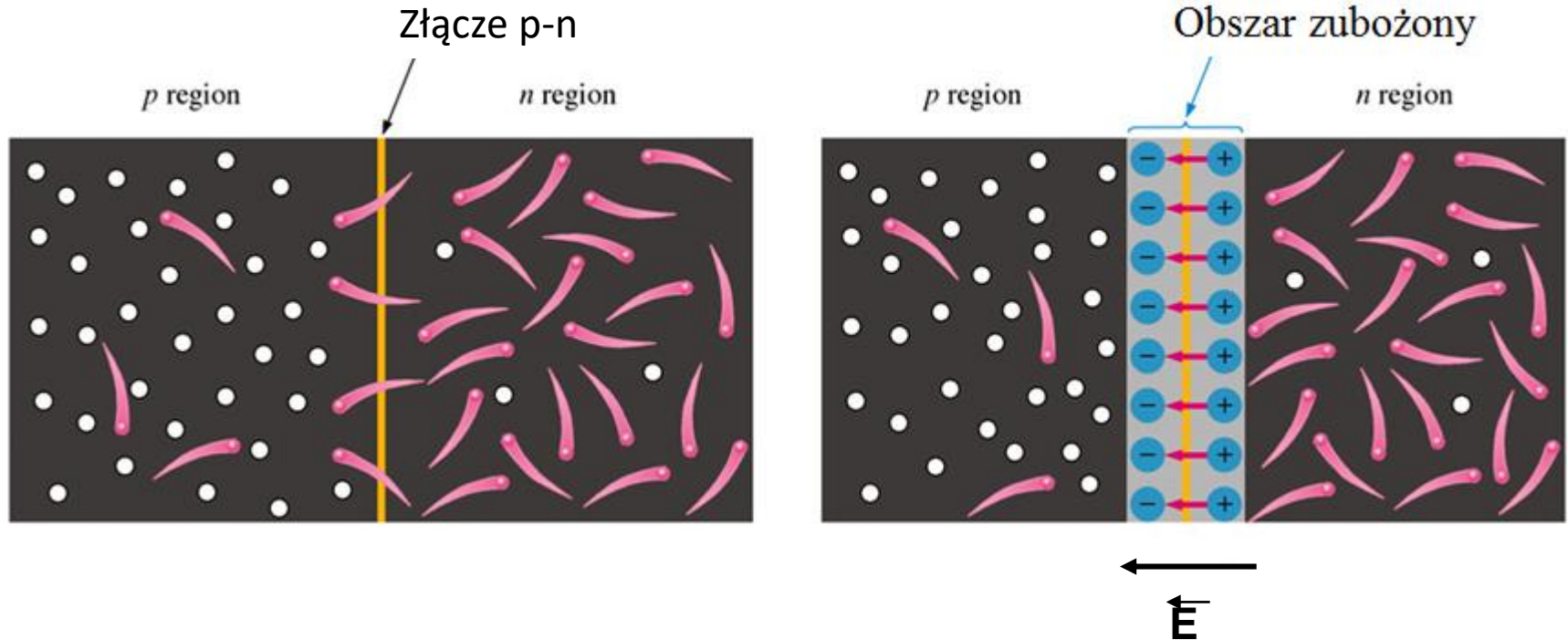
$$E_f \geq E_g$$

- 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

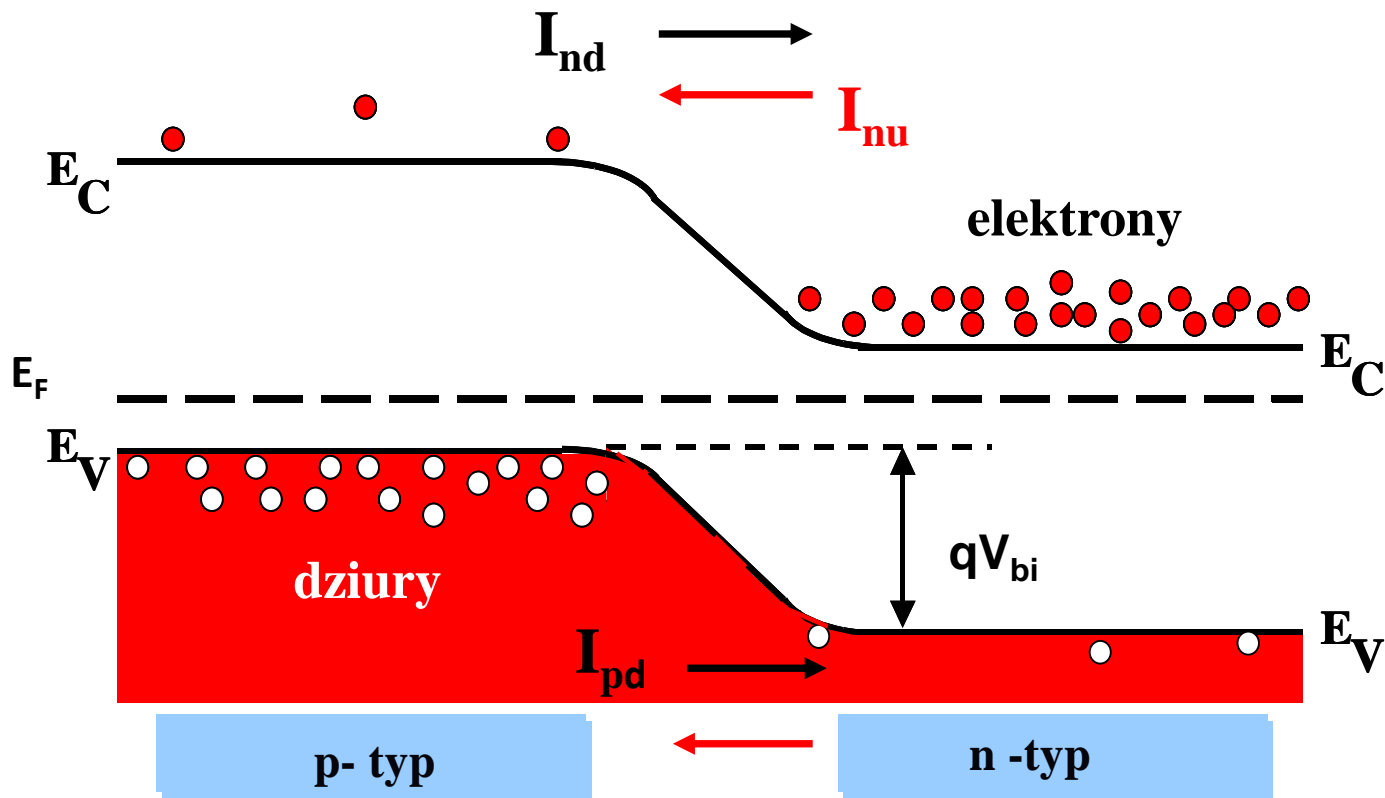


Tworzy się złącze p-n

Złącze po utworzeniu

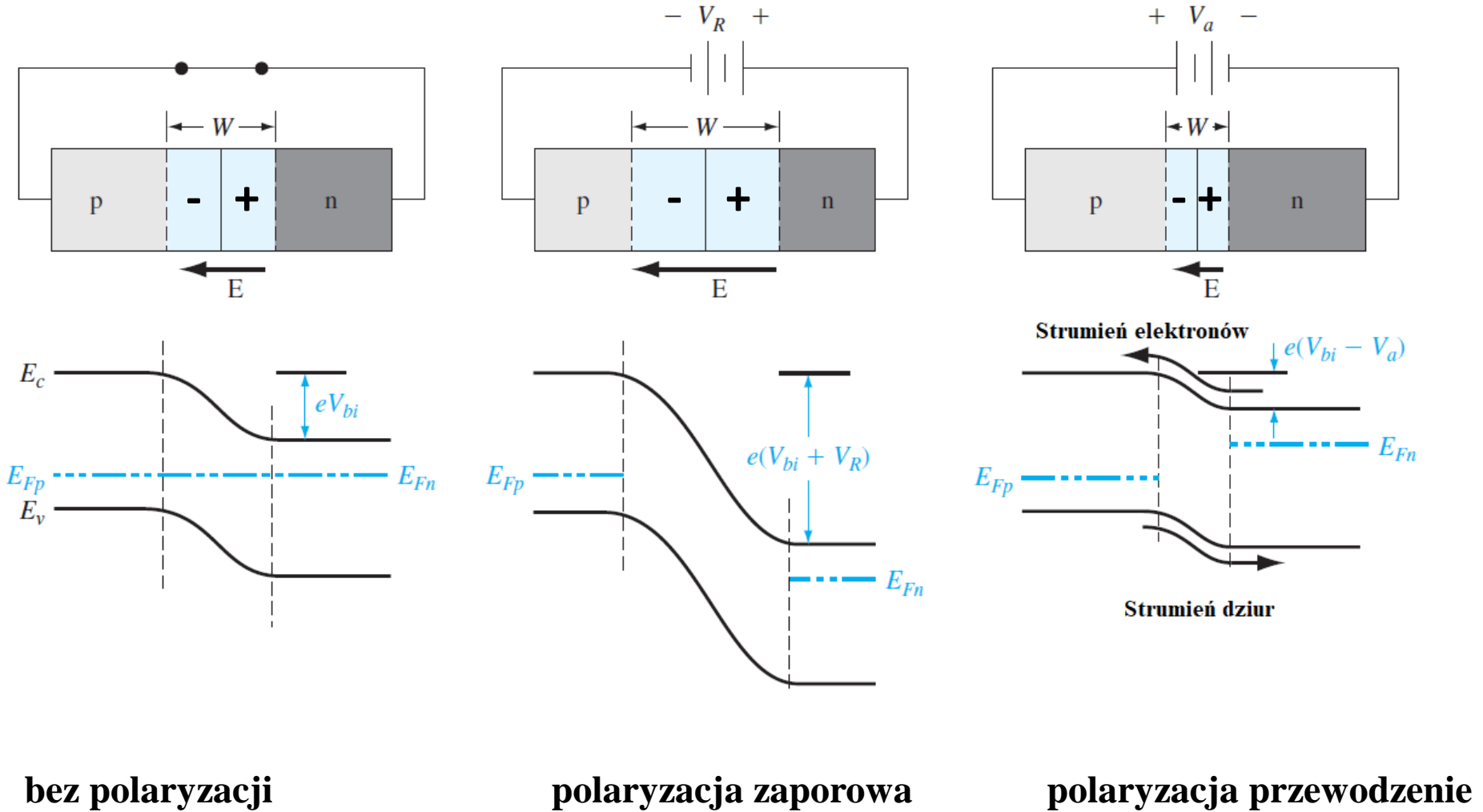
Pole elektryczne na styku dwóch półprzewodników powoduje, że prąd łatwo płynie w jednym kierunku a przepływ w drugim kierunku jest utrudniony.

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.

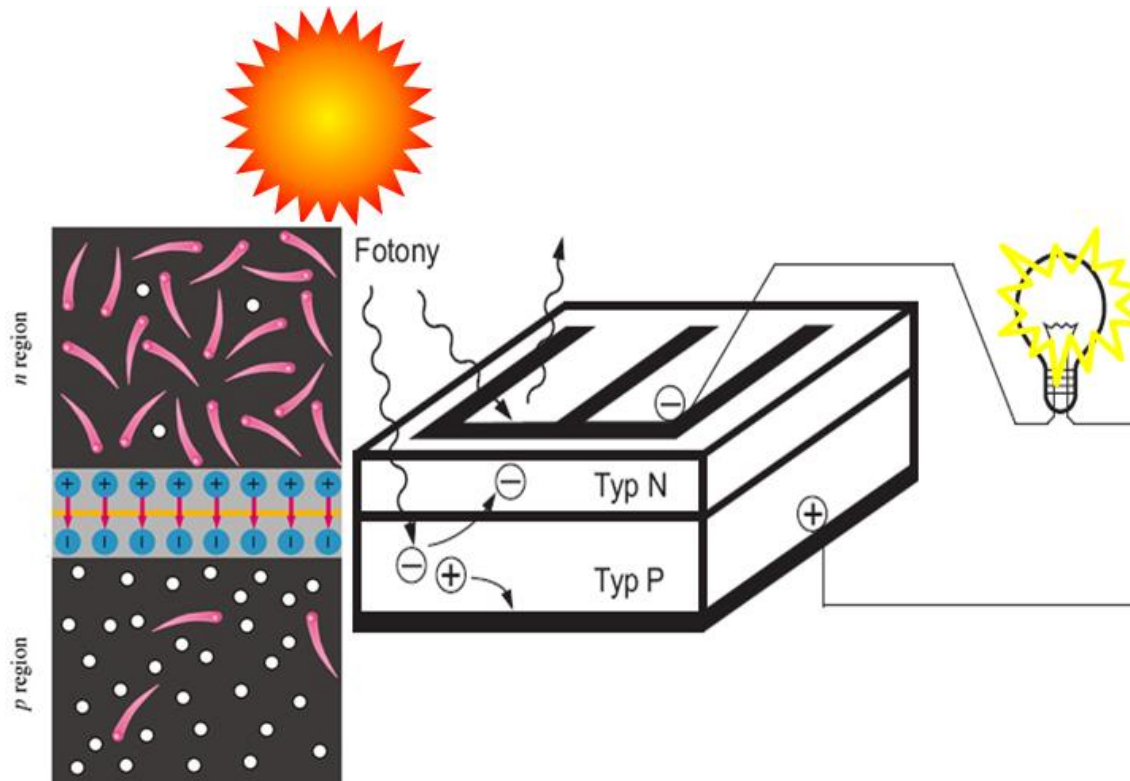
Polaryzacja złącza p-n



Efekt fotowoltaiczny

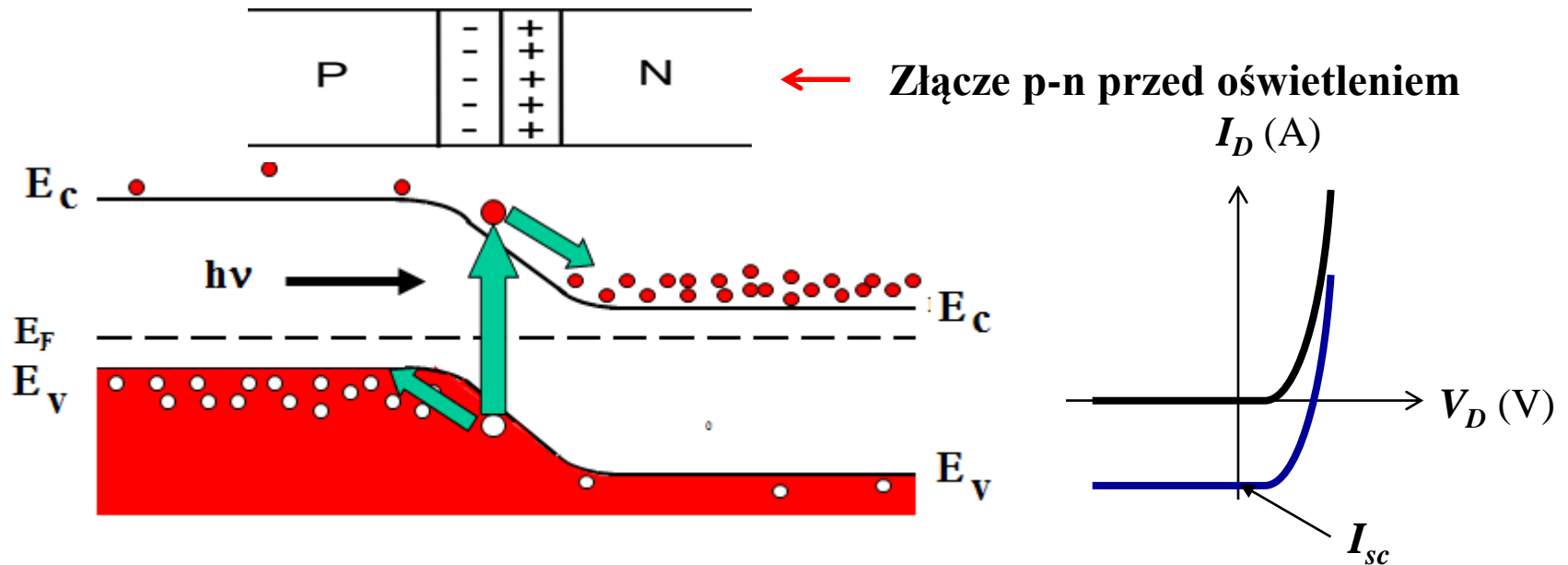
$$h\nu \geq E_g$$

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



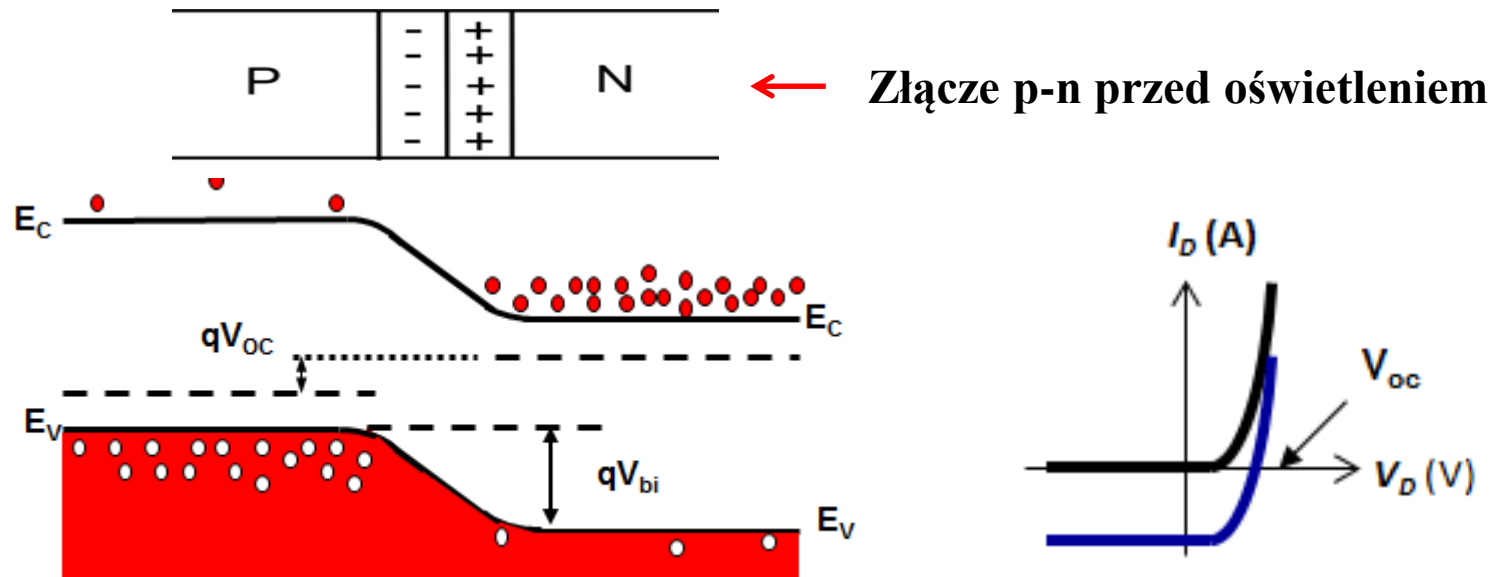
Bariera potencjału na złączu nie zmienia się. Gęstości prądów wstrzykiwania są takie same jak w złączu nieoświetlonym. Prądy te równoważą prądy generacji termicznej ale pozostają niezrównoważone prądy fotogeneracji. Stanowią je: strumień elektronów z obszaru p do n i dziur z n do p.

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

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

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

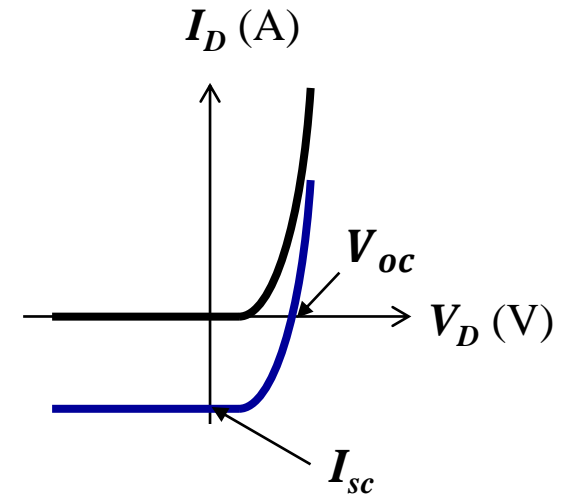
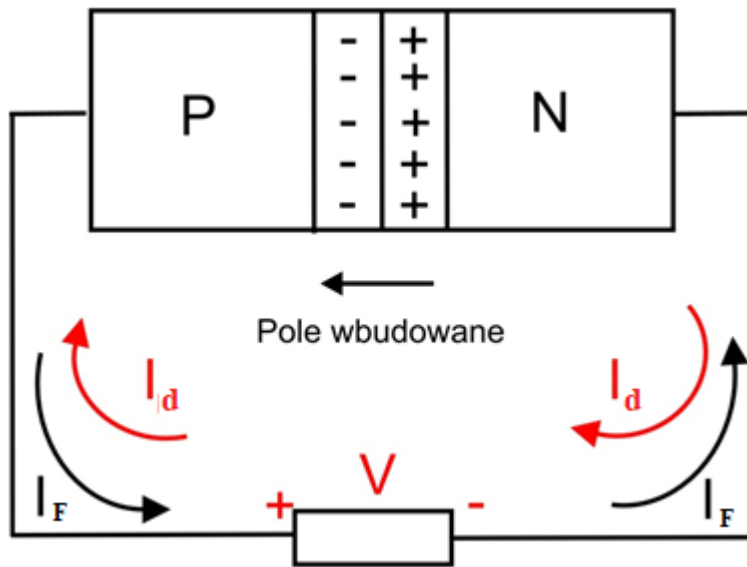
Po przekształceniu:

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

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:

$$I = I_d - I_F$$

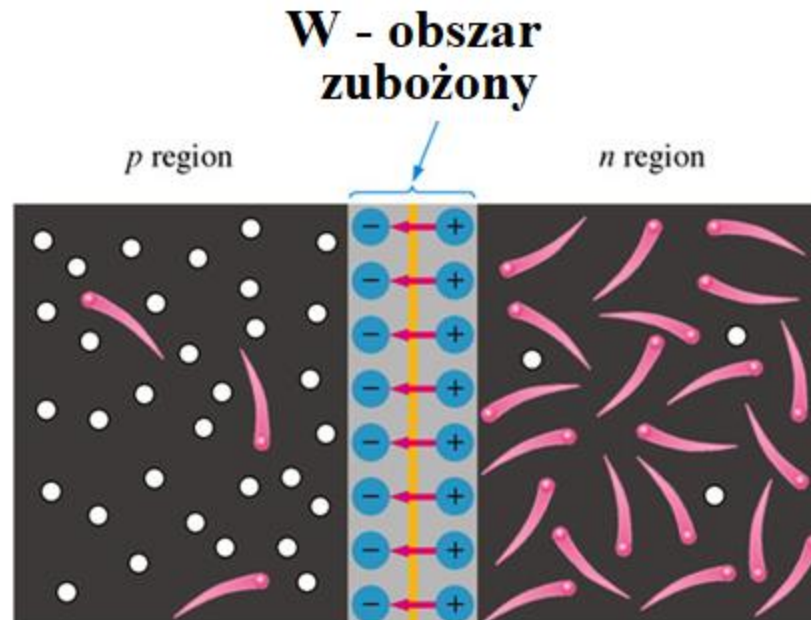
Fotoprąd w złączu p-n

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

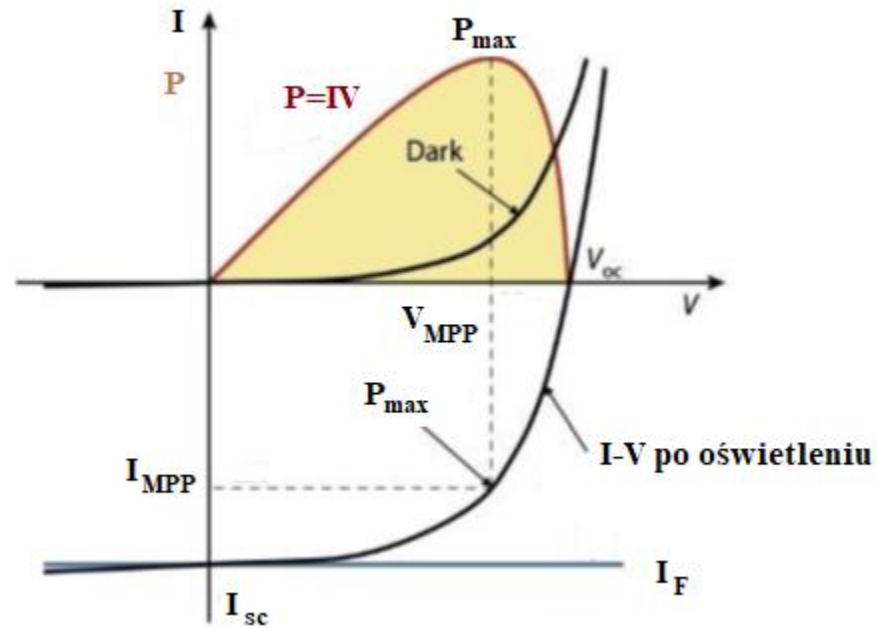
g - szybkość generacji optycznej

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



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

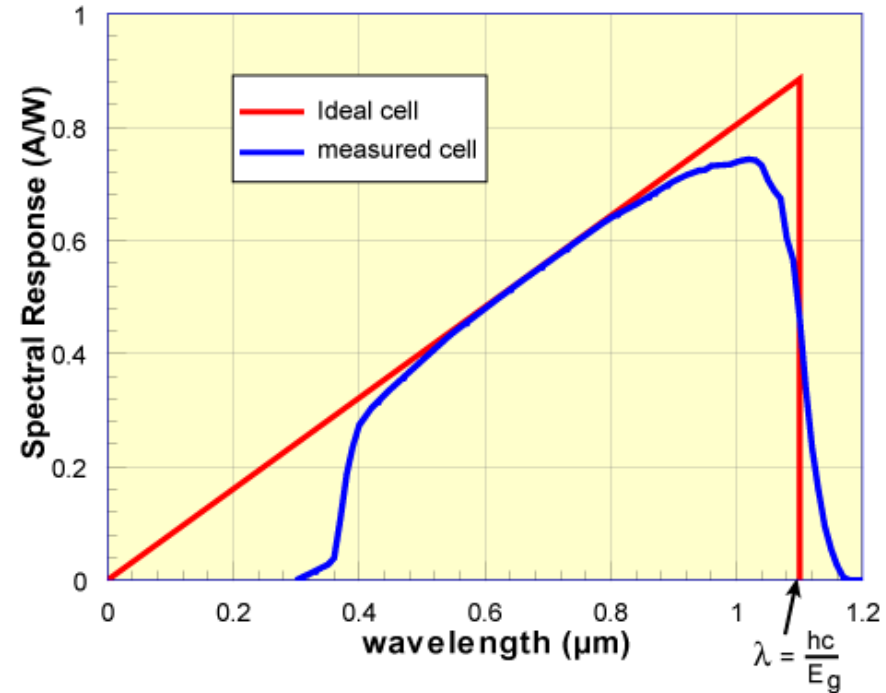
Czułość widmowa

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

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

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

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



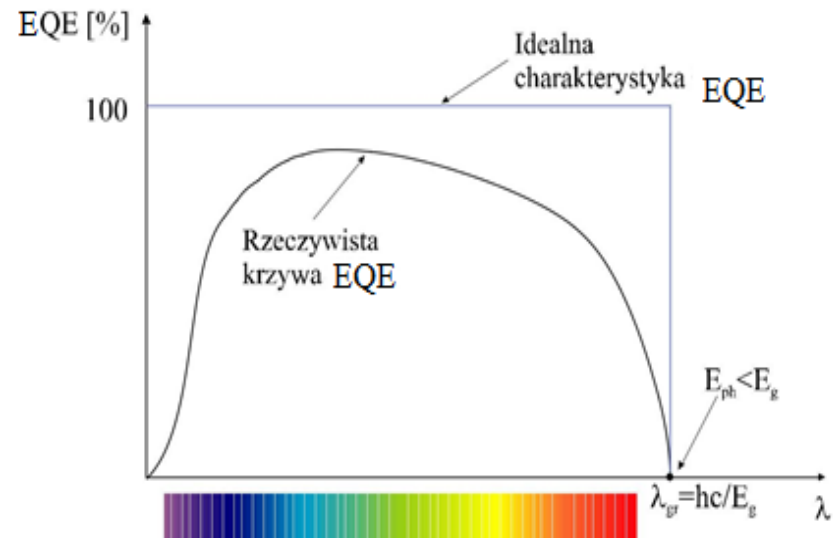
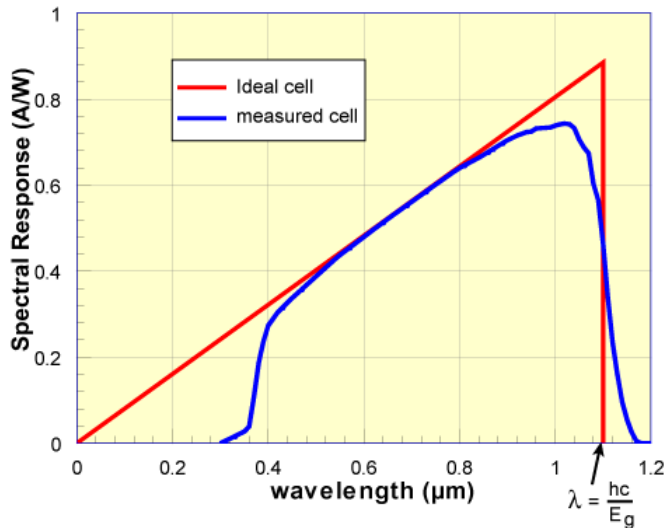
Wydajność kwantowa

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

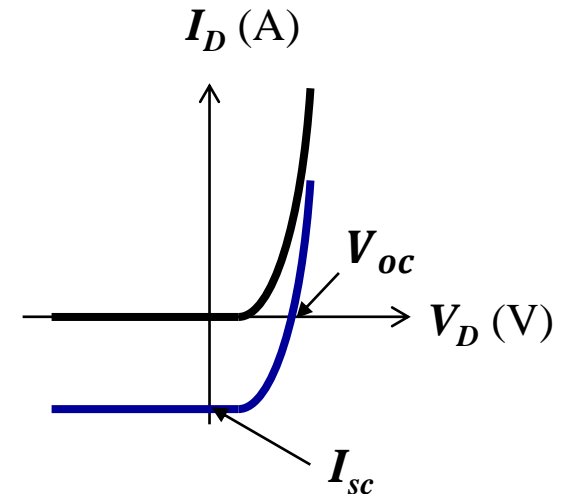
- Urządzenie, które jest stosowane jako czujnik promieniowania elektromagnetycznego:

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

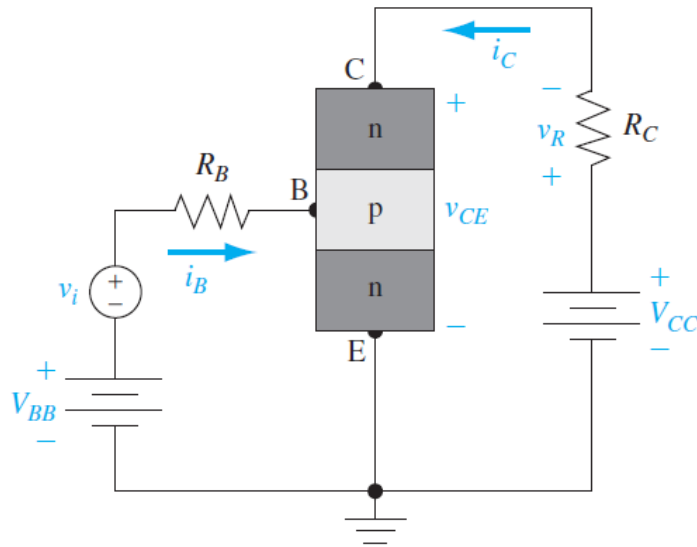
- Zwykle pracuje przy polaryzacji zaporowej

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.



Tranzystor



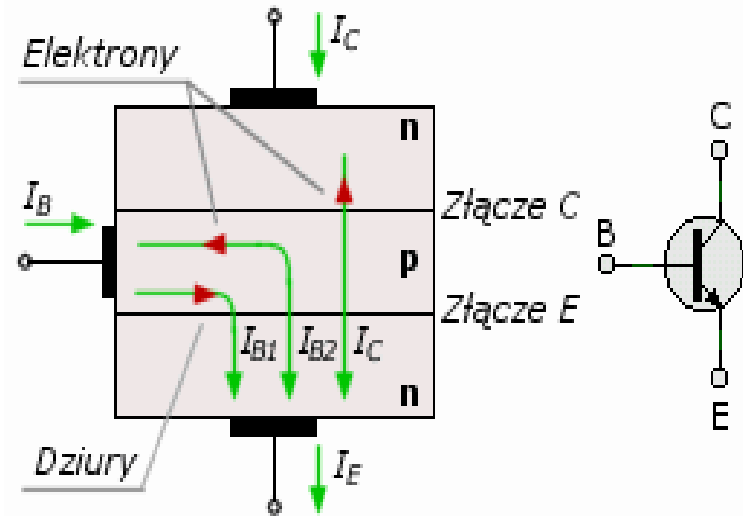
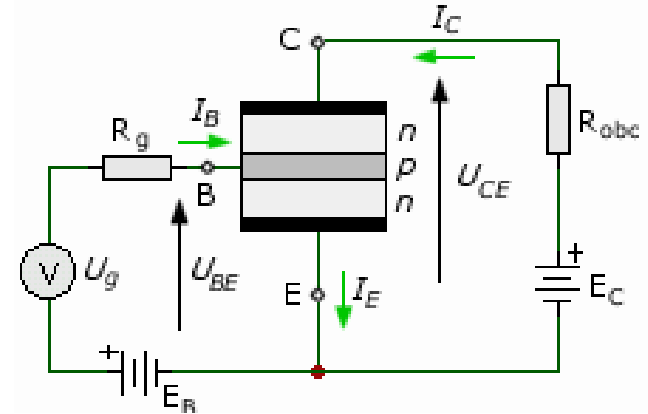
Urządzenie to najczęściej pracuje w układzie wspólnego emitera. Tranzystor n-p-n w układzie o wspólnym emiterze, pracuje w ten sposób, że złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia a emiter-kolektor w kierunku zaporowym. Przez złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia (baza-emiter) 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.

Tranzystor pracujący w układzie wzmacniacza

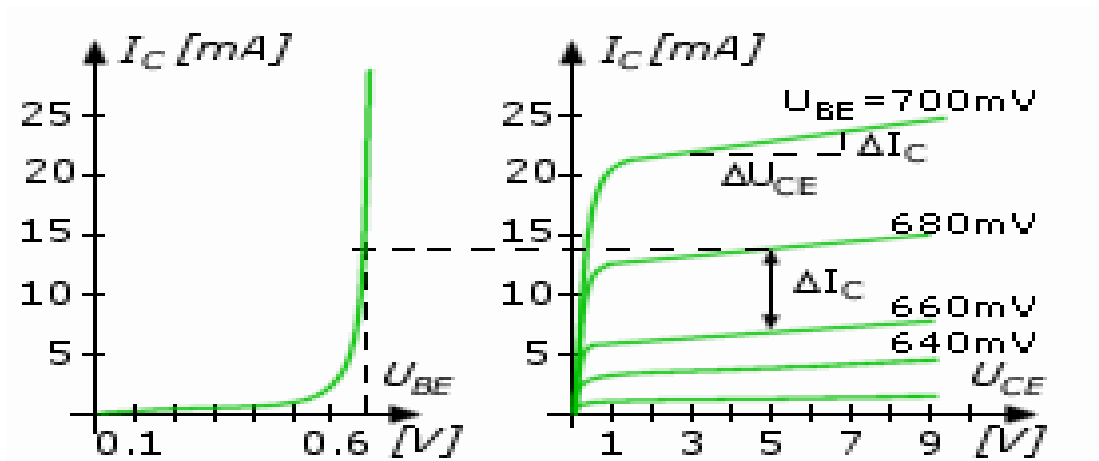
Złącze kolektor-emiter jest spolaryzowane zaporowo (bateria E_C), natomiast złącze baza-emiter w kierunku przewodzenia (bateria E_B)

Rozpływ prądu w tranzystorze npn. Ponieważ złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia to istnieje przepływ dziur z obszaru p do obszaru n I_{B1} oraz przepływ elektronów z obszaru n do obszaru p I_{B2} .

Elektrony wprowadzane z emitera do bazy stają się tam nośnikami **mniejszościowymi** i drogą dyfuzji oddalają się od złącza emiterowego (**złącze E**). Część tych elektronów łączy się z dziurami, których w bazie jest bardzo dużo (obszar p). Wszystkie elektrony, które dotrą w pobliże złącza kolektor-baza (**złącze C**) są unoszone do obszaru kolektora. Dla niedużej szerokości obszaru p (bazy) praktycznie wszystkie elektrony wstrzykiwane przez emiter do bazy dotrą do kolektora. Bardzo ważne jest aby strata elektronów w bazie była jak najmniejsza.



Charakterystyki statyczne OE



Charakterystyka przejściowa

$$I_C = \beta I_B$$

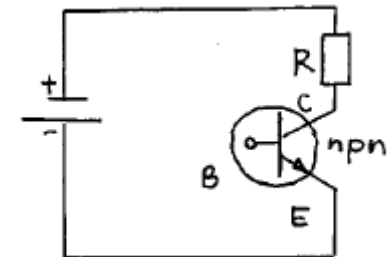
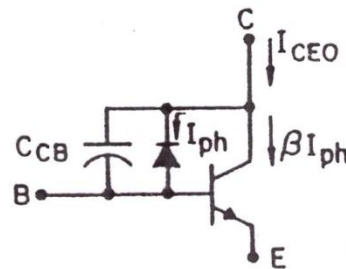
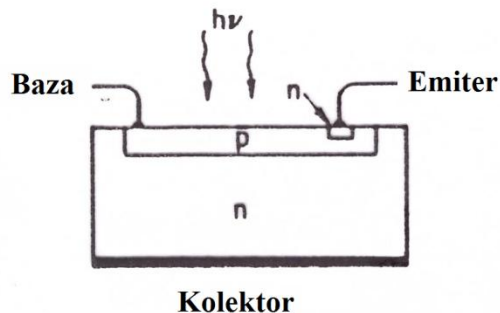
$$I_C = I_{C_0}(T, U_{CE}) \exp\left(\frac{qU_{BE}}{kT}\right)$$

Charakterystyka wyjściowa

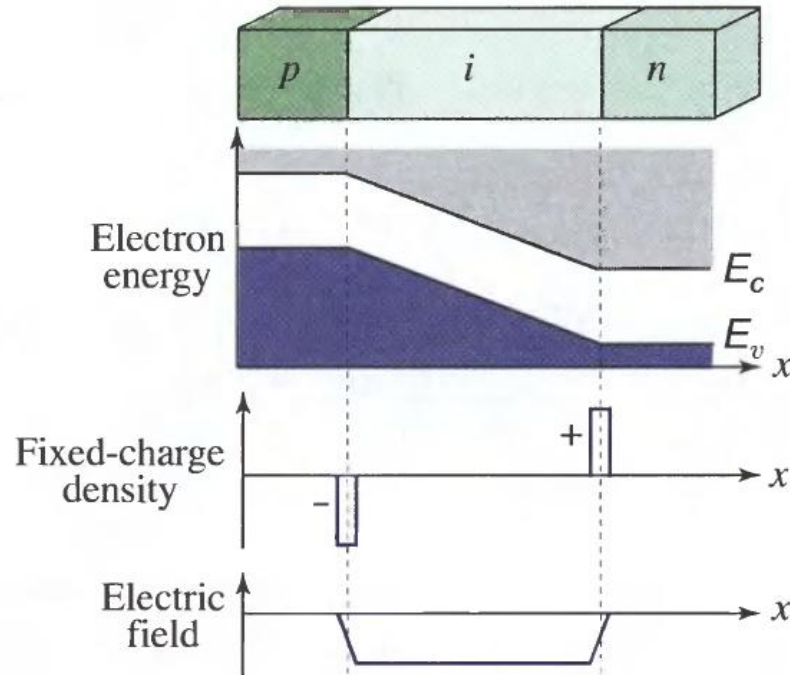
- powyżej pewnego napięcia prąd kolektora prawie nie zależy od napięcia U_{CE}
- do wywołania dużej zmiany prądu kolektora I_C wystarczy mała zmiana napięcia baza-emiter U_{BE}

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 „-”.

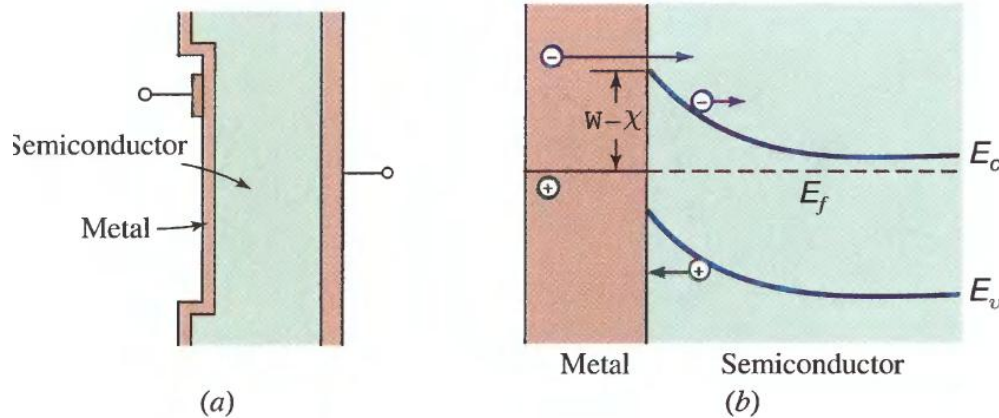


Fotodioda p-i-n



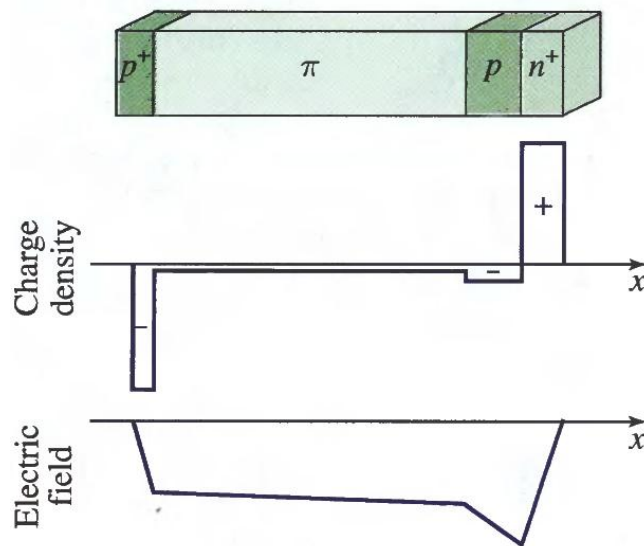
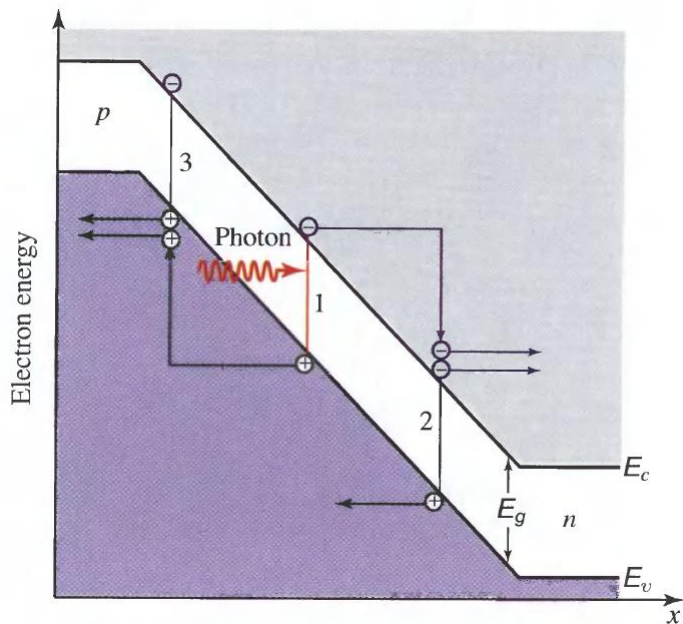
- Szeroki obszar zubożony oznacza większą objętość w której następuje absorpcja Światła.
- Pojemność złącza maleje i stała czasowa diody (RC) maleje, dioda jest „szybsza” od diody na złączu p-n.
- Ponadto czas przejścia nośników przez złącze rośnie.

Fotodioda metal – półprzewodnik (diody Schottky'ego)



- W fotodiodach p-n i p-i-n fotony wysokoenergetyczne są absorbowane tuż pod powierzchnią i nim wygenerowane pary dotrą do obszaru zubożonego ulegną rekombinacji. W fotodiodach m-s rekombinacja powierzchniowa jest wyeliminowana ponieważ obszar zubożony jest tuż pod kontaktem.
- Szybkość odpowiedzi złączy p-n i p-i-n jest ograniczona powolną dyfuzją nośników, które są generowane poza obszarem zubożonym. Aby uniknąć niepożądanego absorpcji światła z którą jest związany ten proces, zmniejsza się grubość tej warstwy, na którą pada światło. To z kolei prowadzi do wzrostu rezystancji i stałej czasowej. W przypadku diody m-s warstwa metalu ma niską rezystancję.
- Fotodiody m-s jest b. szybka również z tego względu, że jest urządzeniem opartym o nośniki większościowe.

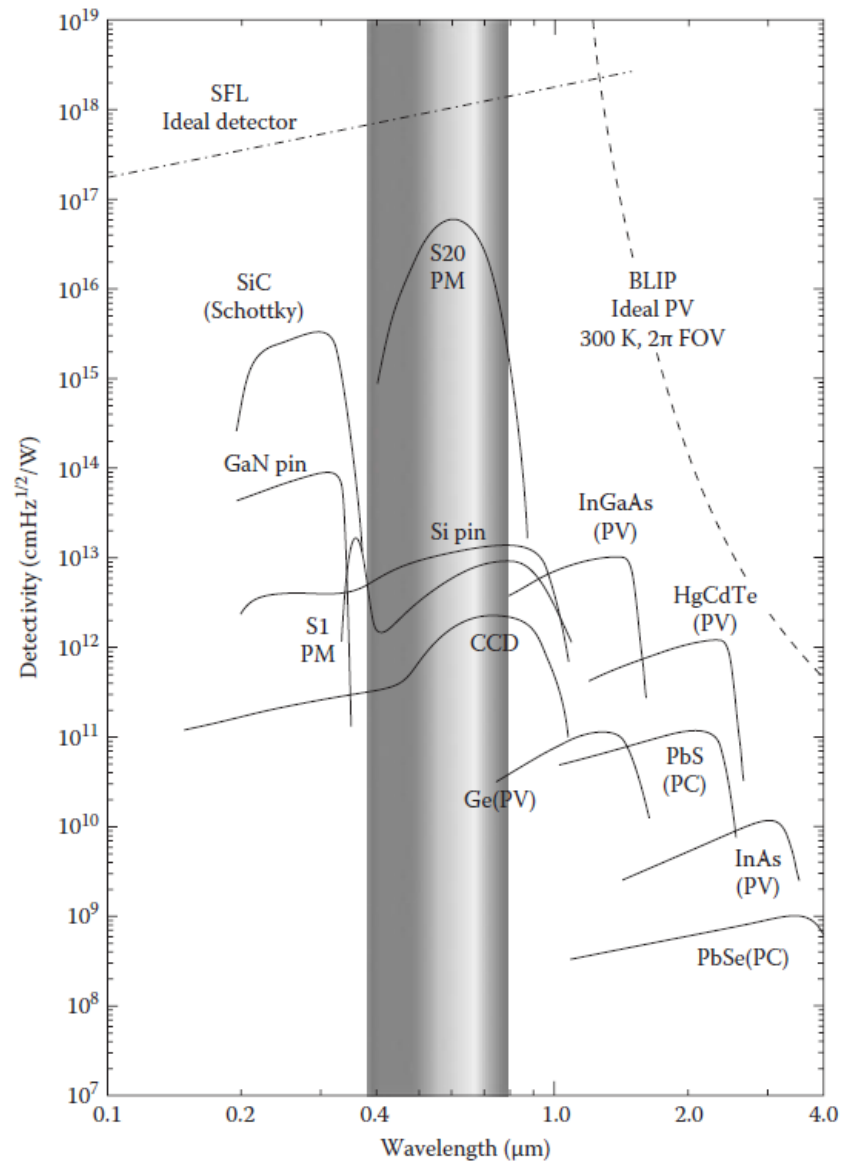
Fotodioda lawinowa



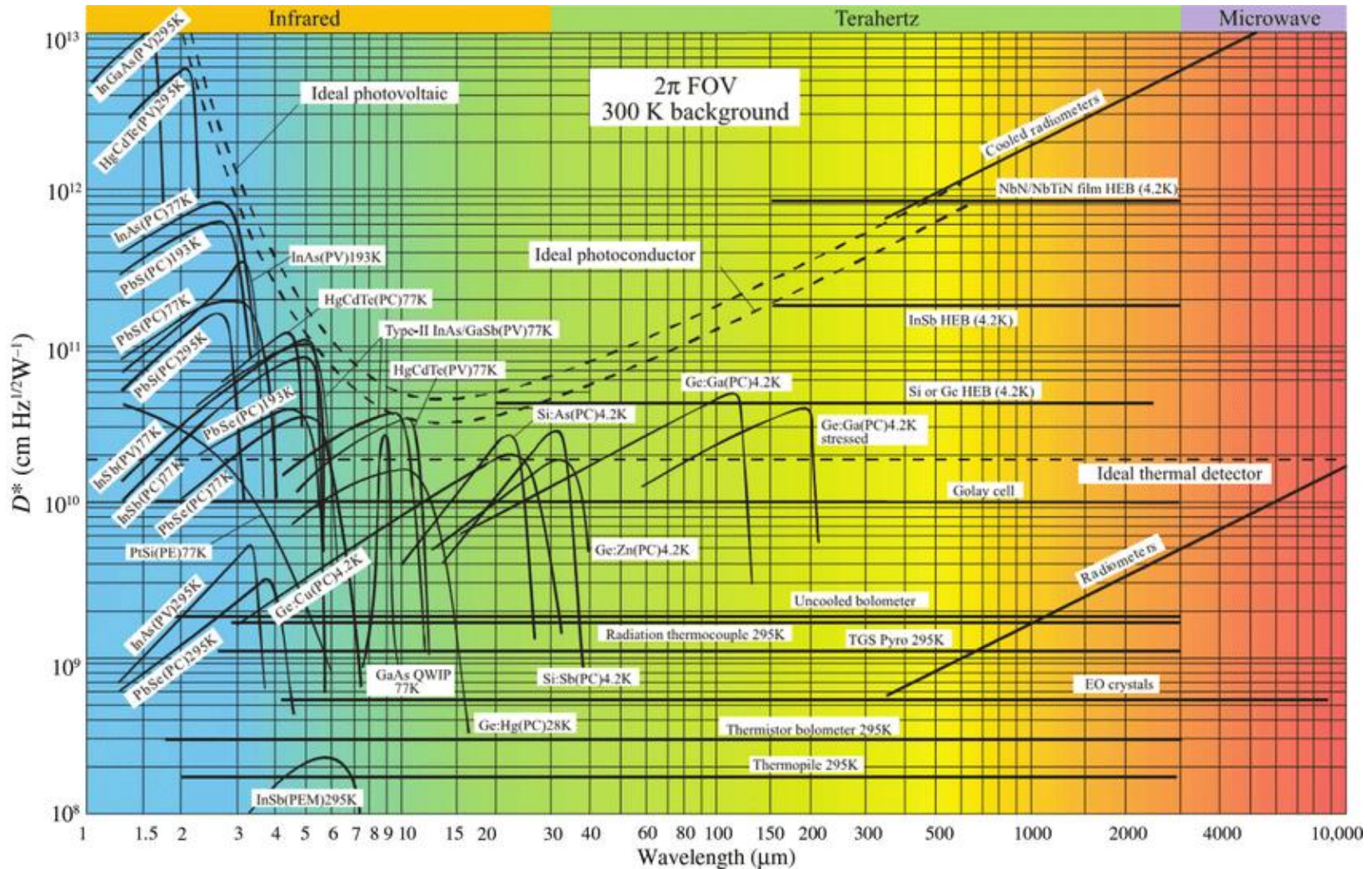
Porównanie detektorów fotonowych

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



Detekcyjności - porównanie

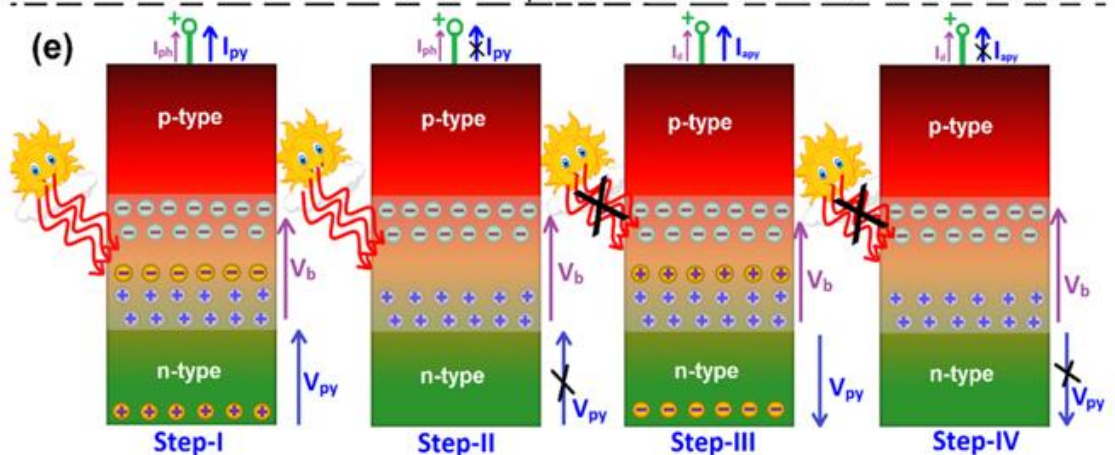
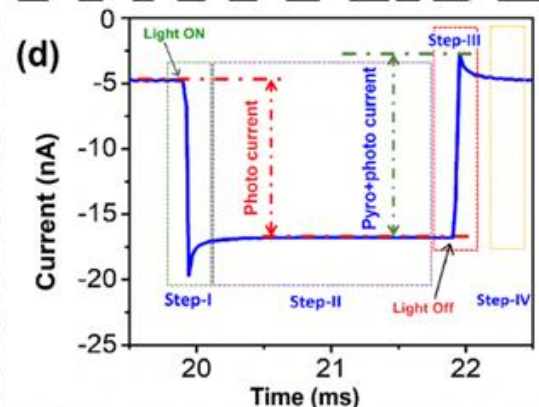
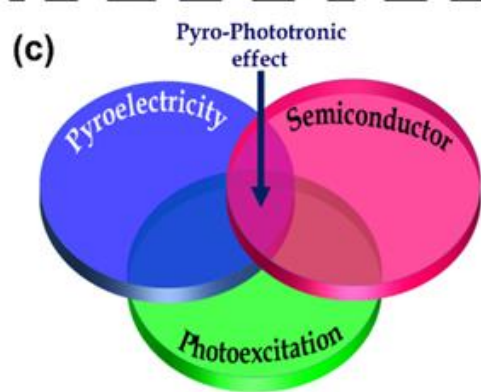
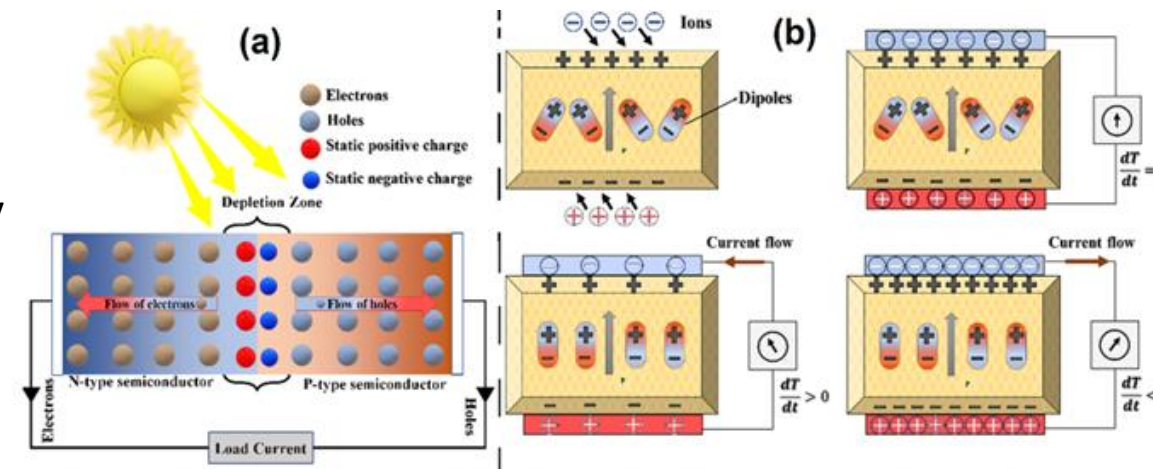


$$R_v(\lambda, f) = \frac{V_s}{\Phi_e(\lambda)}$$

$$NEP = \frac{V_n}{R_v} = \frac{I_n}{R_i}$$

$$D^* = \frac{D(A_d \Delta f)^{1/2}}{V_n} R_v$$

- a) Detektor fotowoltaiczny
- b) Detektor piroelektryczny
- e) Detektor piro-fototroniczny



Detektor piro-fototroniczny