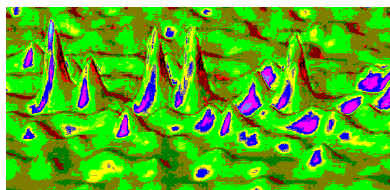




Detekcja światła



Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: **czwartek 13-16**

WS 2008/2009



Zakres wykładu

1. fotodetektory działające w oparciu o efekt fotoelektryczny zewnętrzny: fotokomórka, fotopowielacz, detektor wielokanalikowy
 - 1a. budowa i zasada działania, ~~źródła szumów~~, podstawowe charakterystyki
 - 1b. pomiary absorpcji i fluorescencji roztworów, ~~technika lock-in~~, zliczanie pojedynczych fotonów, skorelowane czasowo zliczanie pojedynczych fotonów

WS 2008/2009



Zakres wykładu

2. fotodetektory działające w oparciu o efekt fotoelektryczny wewnętrzny: fotodioda, fotodioda lawinowa, kamera CCD
 - 2a. budowa i zasada działania fotodiody oraz fotodiody lawinowej, typowe charakterystyki
 - 2b. ~~spektroskopia pojedynczych molekuł~~
 - 2c. kamery TFCCD, TTCCD, ICCD, EMCCD
 - 2d. obrazowanie fluorescencji, przekaz energii, monitorowanie procesów zachodzących w czasie rzeczywistym

WS 2008/2009



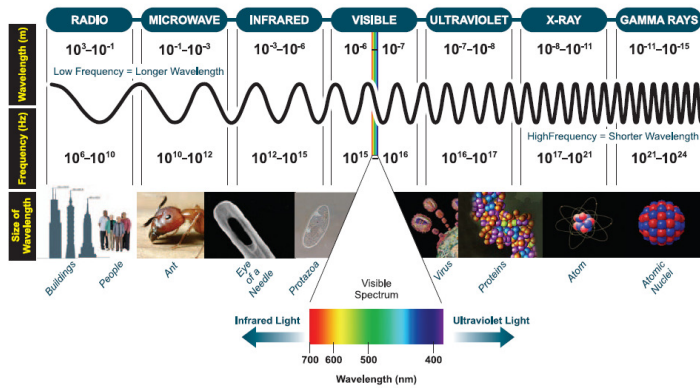
Zakres wykładu

3. kamera smugowa: pomiar zmian spektralnych funkcji czasu
4. rozdzielczość spektralna: monochromatory i pryzmaty; selektywność spektralna: filtry
5. ~~mikroskopia konfokalna i spektroskopia wielokolorowa~~

WS 2008/2009



Światło



WS 2008/2009

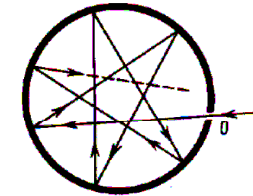


Promieniowanie termiczne

promieniowanie termiczne to najbardziej powszechna forma emisji promieniowania, $T > 0K$



ciało doskonale czarne – pochłania całkowicie padające promieniowanie, niezależnie od długości fali; rozkład widmowy promieniowania zależy jedynie od temperatury



WS 2008/2009



Ciało doskonale czarne

model Rayleigha-Jeansa - opis promieniowania ciała doskonale czarnego w oparciu o elektrodynamikę klasyczną

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

opis Wiena: model empiryczny, w którym dwie stałe otrzymywane były doświadczalnie

$$R(\nu, T) = \alpha\nu^3 \exp\left(-\frac{\beta\nu}{T}\right)$$

WS 2008/2009



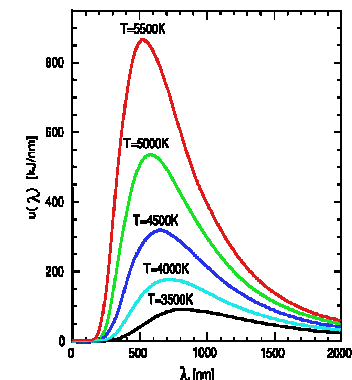
Ciało doskonale czarne

opis Plancka – założenie kwantyzacji energii światła przy statystyce obsadzeń Boltzmanna

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

moc wypromieniowana przez CDC: prawo Stefana-Boltzmann

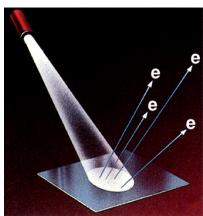
$$R(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$



WS 2008/2009



Efekt fotoelektryczny



emisja elektronów z powierzchni metalu oświetlanego promieniowaniem elektromagnetycznym

obserwacje: Hertz, Hallwachs, Lenard

liczba wybijanych elektronów jest proporcjonalna do natężenia światła, ale ich energia od natężenia nie zależy

maksymalna energia wybijanych elektronów zależy od długości fali padającego światła: dla światła o większej częstotliwości wartość ta jest większa



Hipoteza Einsteina

za postulatem Plancka:
fala elektromagnetyczna o częstotliwości ν jest strumieniem cząstek (fotonów) o energii $E=h\nu$

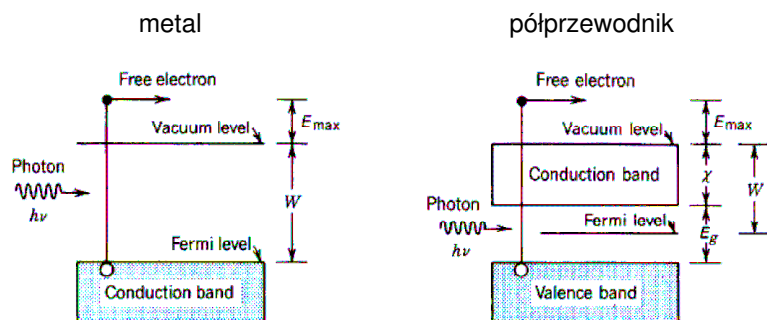
$$h\nu = A + E_{k,max} \quad E_{k,max} = eV_{stop}$$

- jeżeli energia elektronu $E=h\nu$ jest większa od pracy wyjścia A , to elektron może opuścić katodę i w układzie płynie prąd
- wzrost oświetlenia powierzchni katody powoduje wzrost liczby elektronów, a tym samym rośnie wartość prądu nasycenia
- różnicę energii elektron unosi w postaci energii kinetycznej



Efekt fotoelektryczny

efekt fotoelektryczny zewnętrzny – elektron wybijany z metalu bądź z półprzewodnika pod wpływem światła

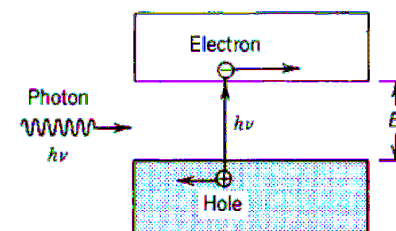


fotopowielacz, MCP, fotokomórka



Efekt fotoelektryczny

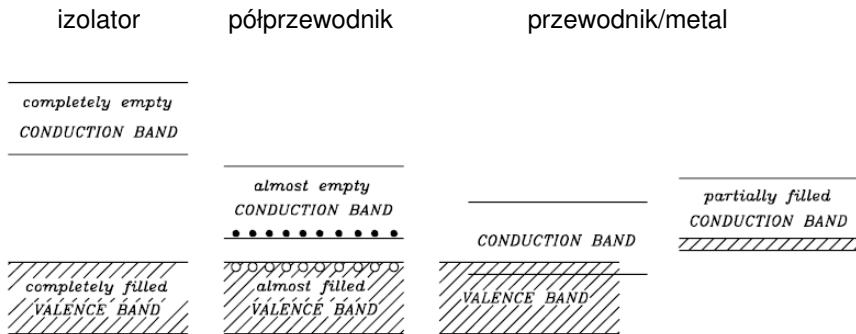
efekt fotoelektryczny wewnętrzny – elektron przenoszony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa pod wpływem światła



fotodiody, detektor CCD



Pasma energetyczne



WS 2008/2009



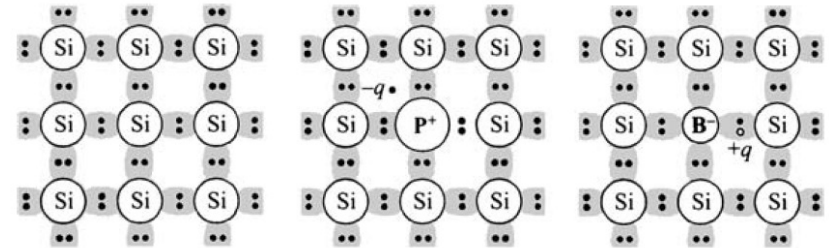
Typy półprzewodników

półprzewodnik samoistny (*intrinsic*)

półprzewodnik domieszkowany (*extrinsic*)

typ n

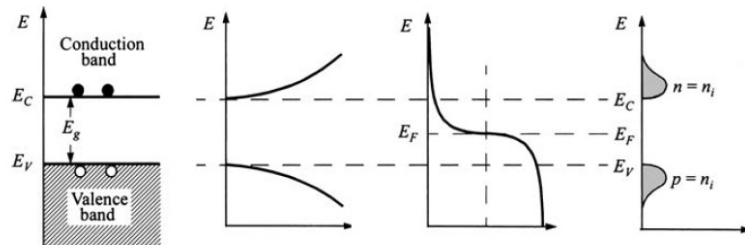
typ p



WS 2008/2009



Półprzewodnik samoistny



stan równowagi między termiczną aktywacją nośników a rekombinacją elektronów i dziur

$$n = p$$

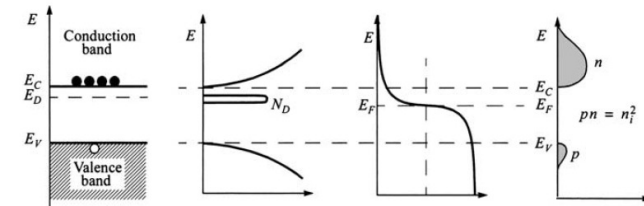
$$pn = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

WS 2008/2009

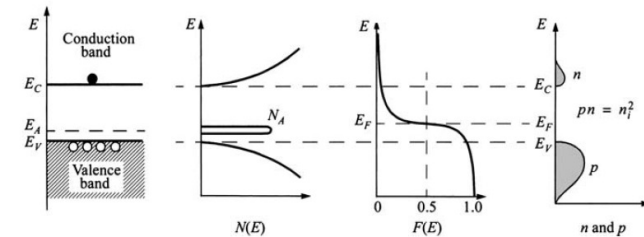


Półprzewodnik domieszkowany

typ n



typ p

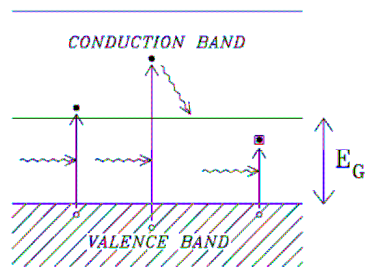


WS 2008/2009

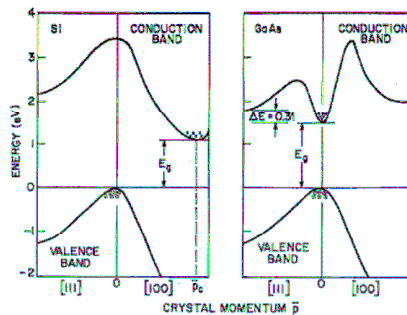


Wzbudzenia w półprzewodniku

wzbudzenia termiczne
wzbudzenia z absorpcją fotonu



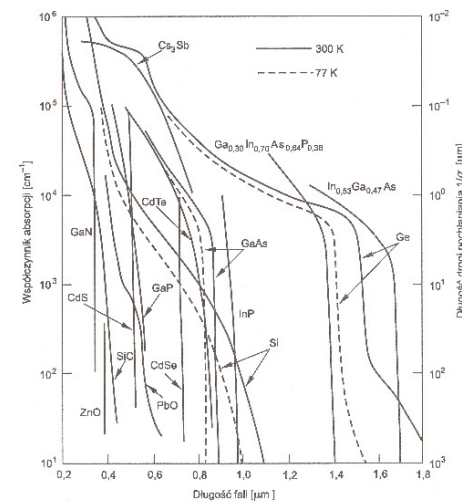
przerwa skośna przerwa prosta



WS 2008/2009



Przerwa energetyczna

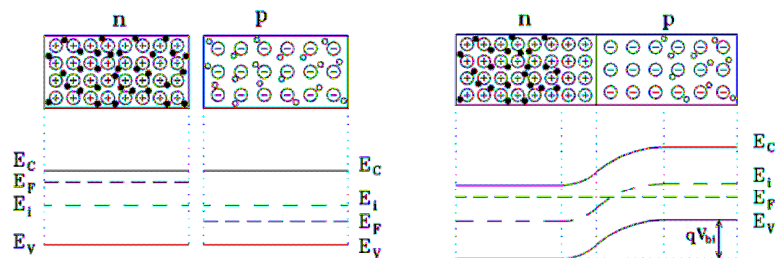


WS 2008/2009



Złącze p-n

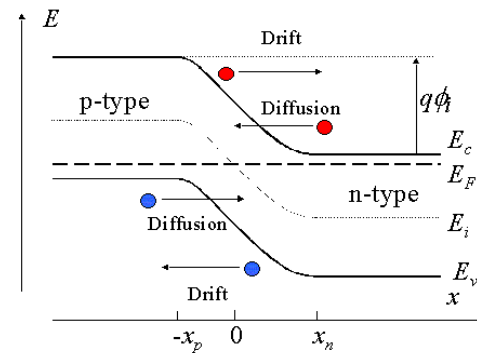
równowaga termodynamiczna osiągnięta jest poprzez dyfuzję nośników
– następuje jonizacja domieszek, donatorów i akceptorów
zjonizowane domieszki powodują drijf nośników w przeciwnym kierunku aż do ustalenia się równowagi



WS 2008/2009



Złącze p-n



poziom Fermiego jest stały dla całego złącza

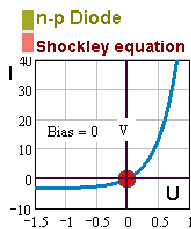
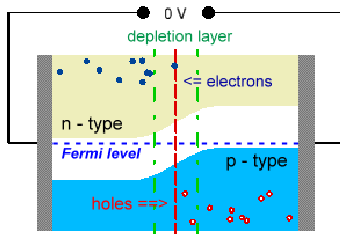
WS 2008/2009



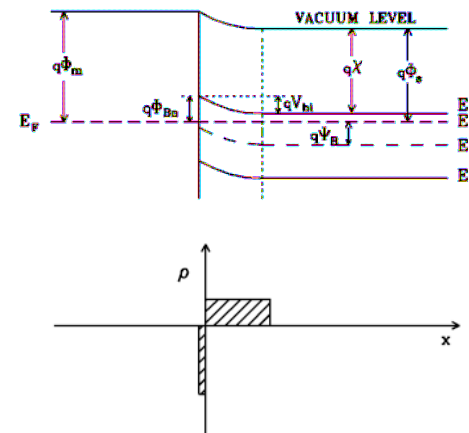
Złącze p-n

całkowity prąd w złączu (równanie Shockleya)

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$



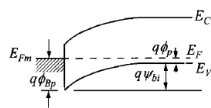
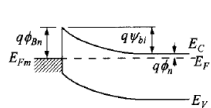
Złącze m-s



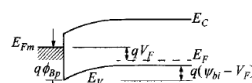
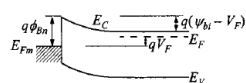
Złącze m-s

n-type semiconductor

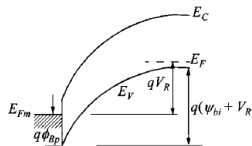
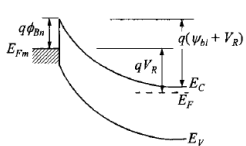
p-type semiconductor



równowaga termodynamiczna



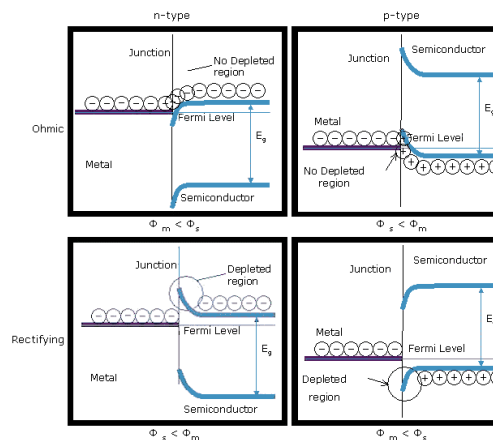
napięcie w kierunku przewodzenia



napięcie w kierunku zaporowym



Złącze m-s

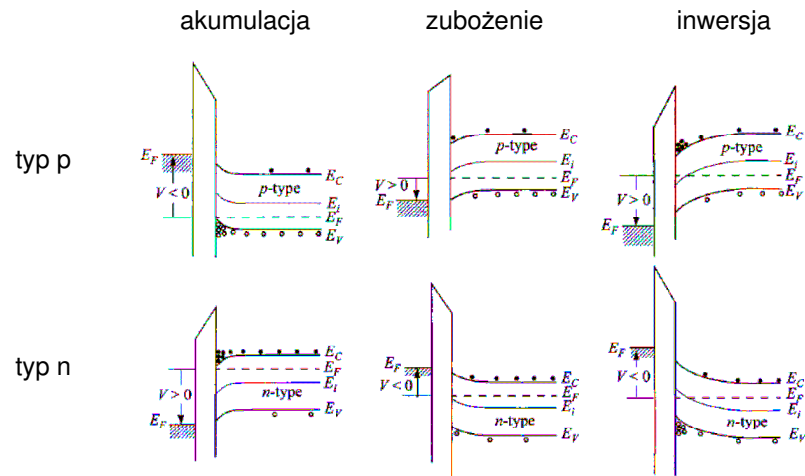


bariera energetyczna w złączu jest niewielka – nie różnie oporność – złącze omowe
brak warstwy zubożonej

bariera energetyczna w złączu jest duża – różnie oporność – złącze Schottky'ego
warstwa zubożona



Złącze m-i-s - układ pasm



Złącze m-i-s

gęstość ładunku powierzchniowego

$$Q_s = -\epsilon_s \mathcal{E}_s = \mp \frac{\sqrt{2} \epsilon_s kT}{q L_D} F\left(\beta \psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

pojemność złącza

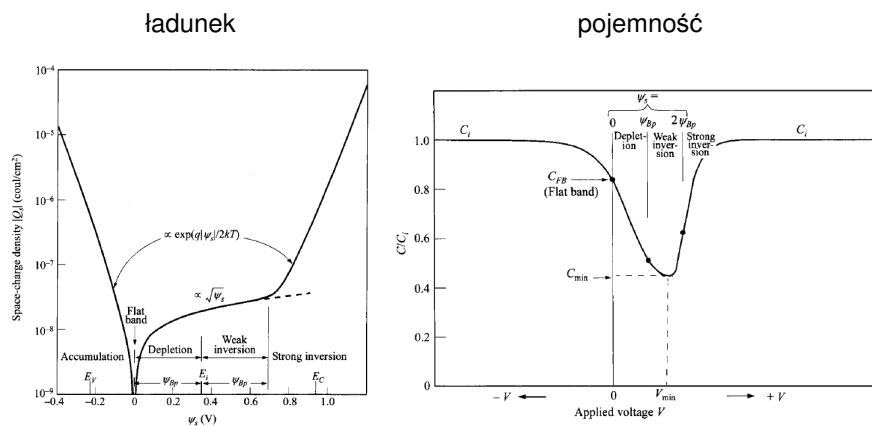
$$C_D \equiv \frac{dQ_s}{d\psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2} L_D} \frac{1 - \exp(-\beta \psi_s) + (n_{po}/p_{po})[\exp(\beta \psi_s) - 1]}{F(\beta \psi_s, n_{po}/p_{po})}$$

$$F\left(\beta \psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \equiv \sqrt{[\exp(-\beta \psi_s) + \beta \psi_s - 1] + \frac{n_{po}}{p_{po}}[\exp(\beta \psi_s) - \beta \psi_s - 1]} \geq 0$$

$$L_D \equiv \frac{\sqrt{kT \epsilon_s}}{\sqrt{p_{po} q^2}} \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_s}{q p_{po} \beta}}$$



Złącze m-i-s



Detektory światła

detektor światła - urządzenie, w którym pod wpływem absorpcji promieniowania elektromagnetycznego zmieniają się jego właściwości

detektory termiczne
pomiar odbywa się poprzez detekcję zmiany temperatury w wyniku absorpcji światła

detektory fotonowe
promieniowanie powoduje zmianę obsadzenia poziomów energetycznych



Detektory termiczne

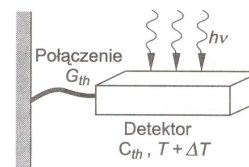
Detektor	Tryb pracy
Bolometr	Zmiana przewodnictwa elektrycznego
Metaliczny	
Półprzewodnikowy	
Nadprzewodzący	
Ferroelektryczny	
Na „gorących nośnikach”	
Termopara	Generacja napięcia na złączu dwóch różnych materiałów spowodowana zmianą temperatury
Piroelektryczny	Zmiana spontanicznej polaryzacji elektrycznej
Komórka Golaya	Termiczne rozprężanie gazu
Z absorpcją krawędziową	Transmisja optyczna półprzewodnika
Piromagnetyczny	Zmiana właściwości magnetycznych
Ciekłokrystaliczny	Zmiana właściwości optycznych

$\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ do 0.1mm , szybkość odpowiedzi $\sim 10 \mu\text{s}$
szeroka i gładka charakterystyka widmowa
duży stosunek powierzchni do objętości
silna absorpcja i dobra izolacja termiczna od otoczenia

WS 2008/2009



Detektory termiczne



C_{th} - pojemność cieplna
 G_{th} - przewodność cieplna

równanie bilansu ciepła:

$$C_{th} \frac{d\Delta T}{dt} + G_{th} \Delta T = \varepsilon \Phi$$

ΔT – zmiana temperatury
 ε – emisyjność detektora
 Φ – sygnał

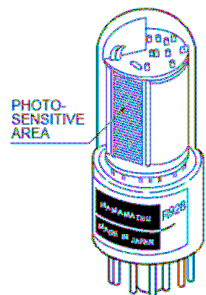
WS 2008/2009



Fotopowielacz

side-on

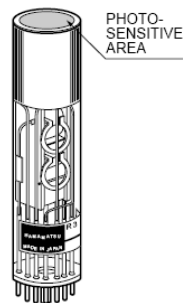
niższa cena, powszechne w prostych urządzeniach do pomiaru widm
fotokatoda odbiciowa



wydajność
 $\sim 50-70\%$

head-on

większa czułość
kontrola powierzchni aktywnej
fotokatoda przezroczysta

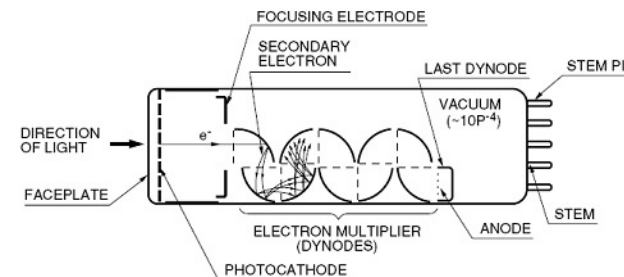


wydajność
 $\sim 70-90\%$

WS 2008/2009



Fotopowielacz



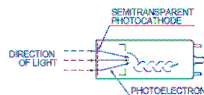
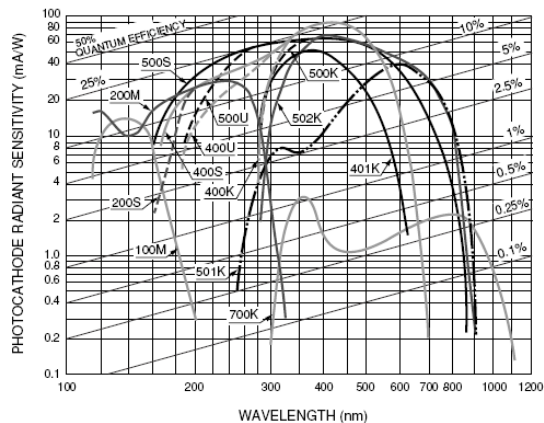
działanie oparte o efekt fotoelektryczny zewnętrzny i emisję wtórną

WS 2008/2009



Fotokatoda transparentna

charakterystyka widmowa – fotokatody transparentne



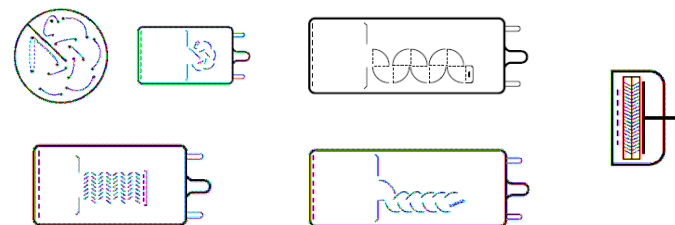
100M – Cs-I
 200M – Cs-Te
 400U – bi-alkaliczna
 500 – wieloalkaliczna
 700K – Ag-O-Cs

WS 2008/2009



Obszar powielenienia

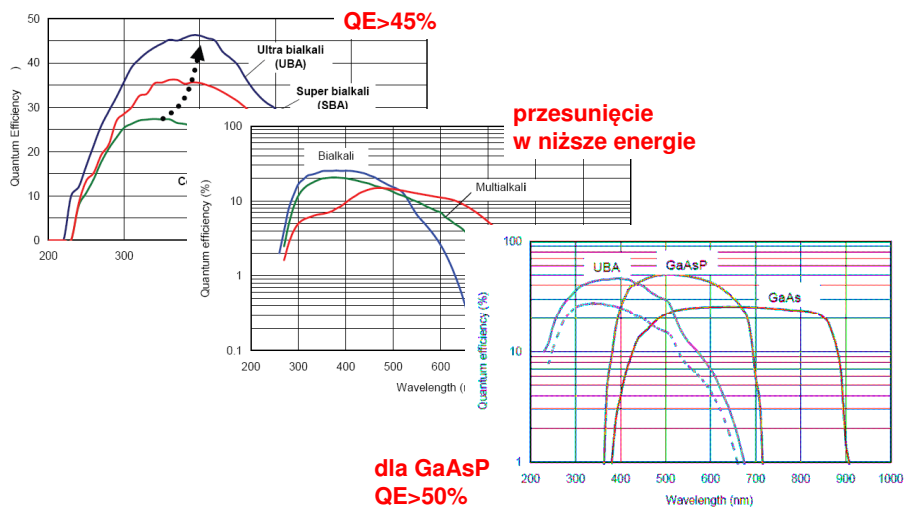
Typ dynody	Czas narastania [ns]	Linowość impulsu przy 2% odchyleniu [mA]	Odporność na pole magnetyczne [mT]	Jednorodność	Efektywność zbierania	Cechy
Obwodowo-ogniskowany	0,9–3,0	1–10	0,1	Słaba	Dobra	Kompakt, duża szybkość
Skrzynkowo-kratowy	6–20	1–10	0,1	Dobra	Bardzo dobra	Duża efektywność zbierania
Linowo-ogniskowany	0,7–3	10–250	0,1	Słaba	Słaba	Duża szybkość, wysoka linowość
Żaluzjowy	6–18	10–40	0,1	Dobra	Słaba	Odpowiedni do fotopowielaczy o dużych średnicach
Siatkowy	1,5–5,5	300–1000	700–1200	Dobra	Słaba	Dla zastosowań w dużych polach magnetycznych
Mikrokanalikowy	0,1–0,3	700	15–1200	Dobra	Słaba	Bardzo duża szybkość



WS 2008/2009



Najnowsze osiągnięcia

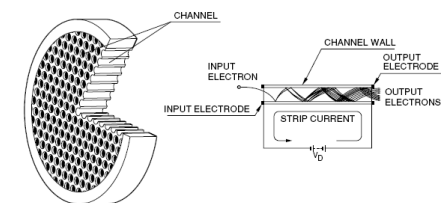


WS 2008/2009

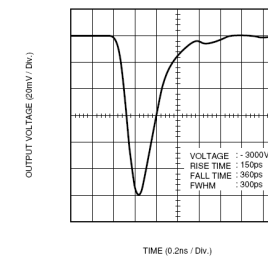


MCP-PMT

microchannel plate



detektory MCP-PMT są bardzo szybkie, pozwalają badać procesy zachodzące w skali dziesięciu pikosekund



WS 2008/2009

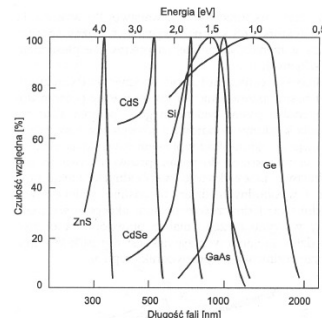


Fotorezystor

zasada działania: zmiana oporności półprzewodnika pod wpływem padającego promieniowania
możliwe wzmocnienie ($<10^6$)



Półprzewodnik	E_g [eV]	λ_c [μ m]
CdS	2,4	0,52
CdSe	1,8	0,69
Si	1,12	1,1
Ge	0,67	1,85
PbS	0,42	2,9
PbSe	0,23	5,3
InSb	0,23	5,3
$Hg_{1-x}Cd_xTe$	zależy od x	maks. 25



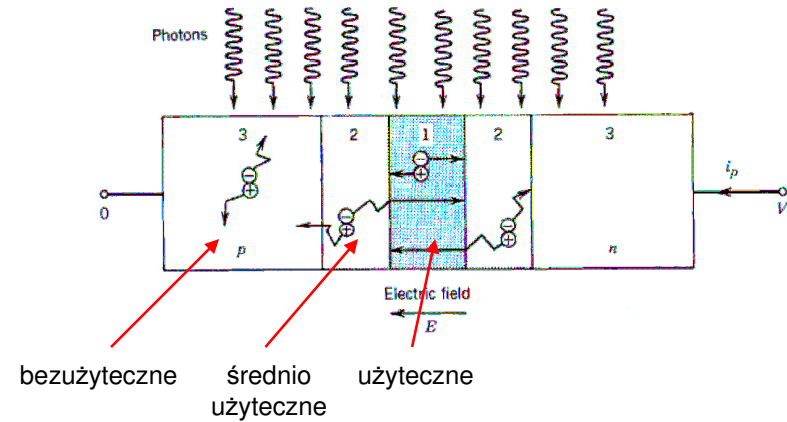
pasmo-pasmo
domieszki
związki potrójne

WS 2008/2009



Fotodioda p-n

fotodioda pn , polaryzacja w kierunku zaporowym



WS 2008/2009

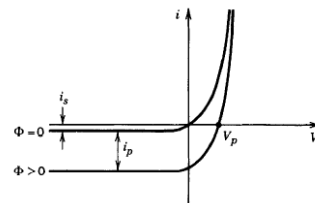


Fotodioda p-n

mod fotoprzewodzący

napięcie w kierunku zaporowym:

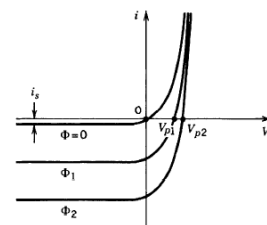
- silne pole elektryczne, wzrost prędkości, skrócenie czasu tranzytu
- wzrost szerokości warstwy zubożonej
- wzrost obszaru aktywnego



mod fotowoltaiczny

złącze niespolaryzowane:

- absorpcja fotonu powoduje powstanie różnicy potencjałów
- prąd ciemny = 0A

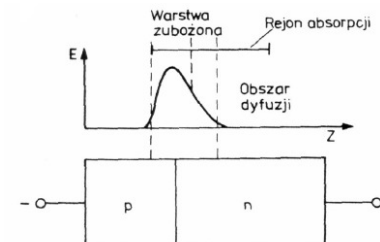


WS 2008/2009

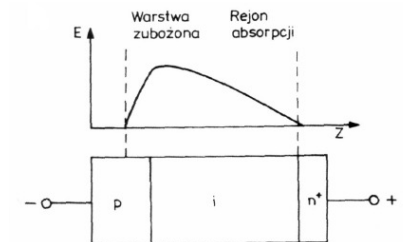


Fotodioda p-i-n

fotodioda pn



fotodioda pin



fotodioda pin :

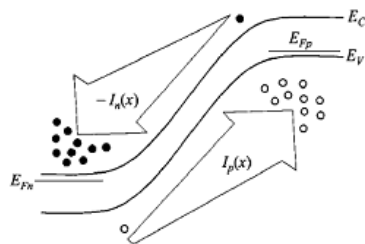
poszerzenie warstwy zubożonej: więcej nośników dryfujących, większy obszar aktywny optycznie, zwiększenie czasu tranzytu

WS 2008/2009



Fotodioda lawinowa

fotodioda lawinowa (APD) – jeden z najbardziej czułych detektorów światła



jonizacja – w przypadku gdy pole elektryczne przekroczy określoną wartość, większą niż przerwa energetyczna, nośniki uzyskują energię, która jest wystarczająco duża by wygenerować parę elektron - dziura

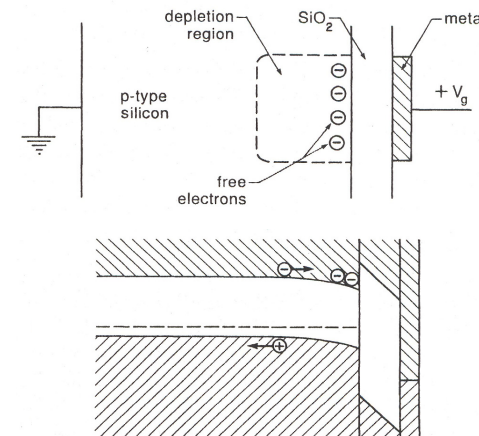
wzmocnienie!



Detektor CCD

pixel – picture element

Si, typ p, w warunkach inwersji kondensator elektronowy



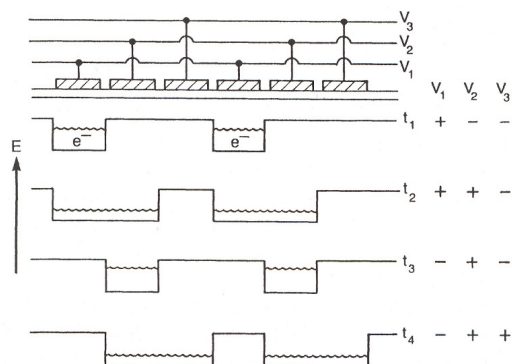
przyłożenie napięcia V_g :
odpływ dziur – warstwa zubożona
wolne elektrony na złączu

absorpcja fotonu:
rozbitcie pary elektron-dziura
brak rekombinacji w warstwie zubożonej



CCD – przekaz ładunku

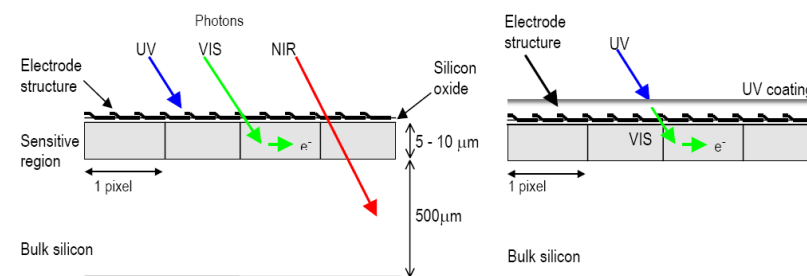
sekwencja napięć prowadzi do transferu ładunku
detektor CCD trójfazowy



Detektor CCD

front-illuminated CCD (FI)

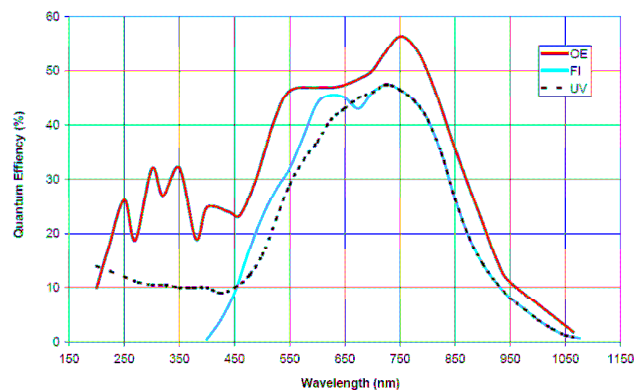
front-illuminated CCD z pokryciem UV





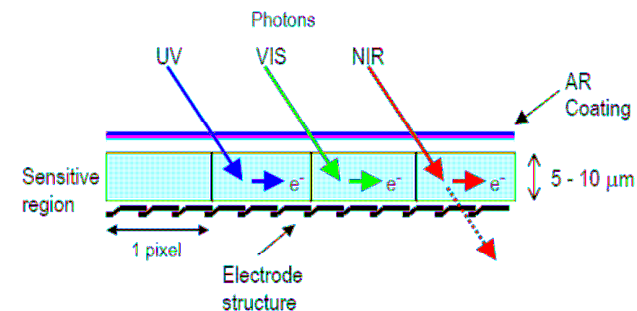
Wydajność kwantowa

front-illuminated CCD (FI)



Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD

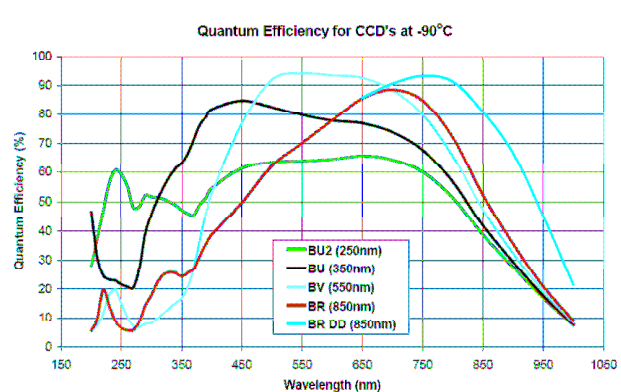


poprzez warstwę AR możliwa zmiana maksimum czułości



Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD



To już (dopiero) koniec

