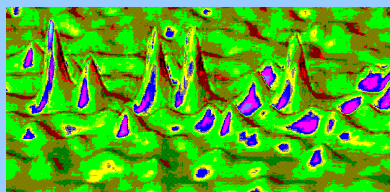




## Detekcja światła



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



## Rekapitulacja

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

### detektory światła

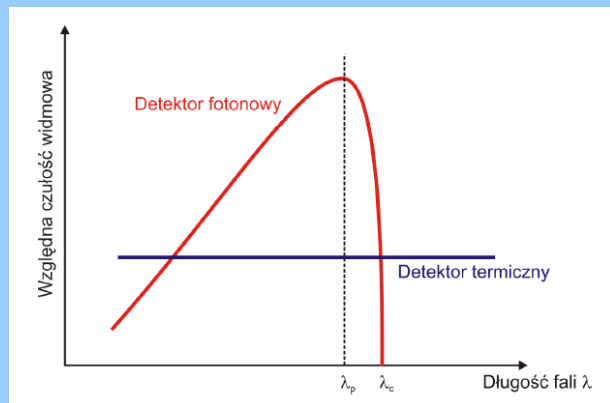
**detektory termiczne**  
pomiar odbywa się poprzez detekcję zmiany temperatury w wyniku absorpcji światła

**detektory fotonowe**  
promieniowanie powoduje zmianę obsadzenia poziomów energetycznych

WS 2008/2009



## Rekapitulacja



WS 2008/2009

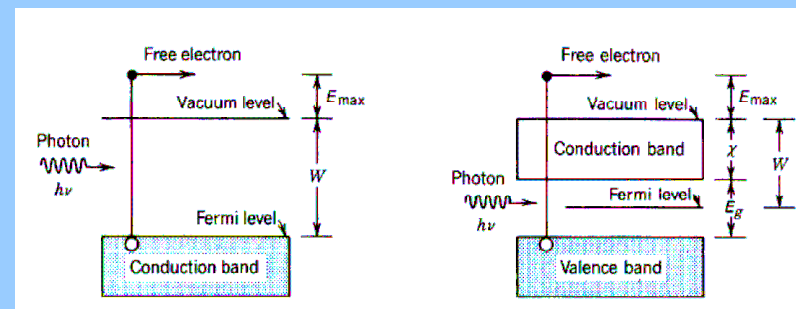


## Rekapitulacja

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

metal

półprzewodnik

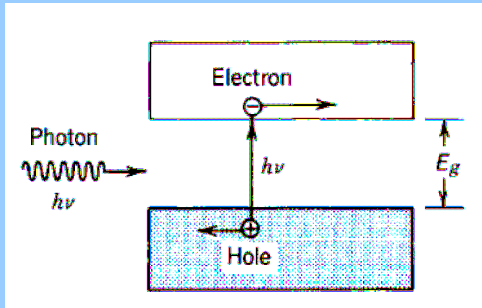


WS 2008/2009



# Rekapitulacja

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



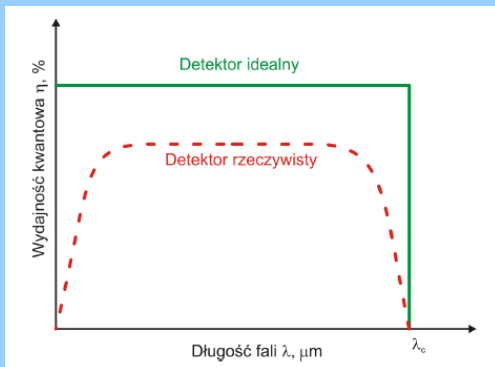
# Idealny fotodetektor

1. słabo domieszkowany obszar aktywny, w którym absorbowane jest promieniowanie: właściwy dobór parametrów takich jak przerwa energetyczna, domieszkowanie, geometria
2. kontakty elektryczne do obszaru aktywnego, które zbierają sygnał nie stanowiąc jednocześnie źródła prądu ciemnego
3. powierzchnia obszaru aktywnego izolowana od otoczenia – eliminacja rekombinacji powierzchniowej oraz generacji nośników na powierzchni
4. tylna powierzchnia antyrefleksyjna - zwiększenie absorpcji promieniowania



# Idealny fotodetektor

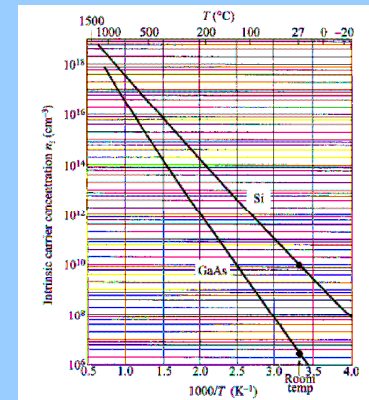
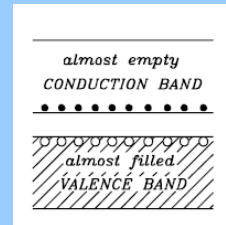
idealny detektor fotonowy



# Rekapitulacja

generacja nośników: procesy termiczne i procesy optyczne

półprzewodnik





# Rekapitulacja

koncentracja samoistna zależy od przerwy energetycznej

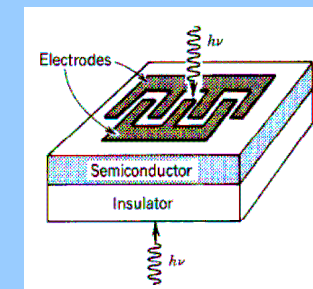
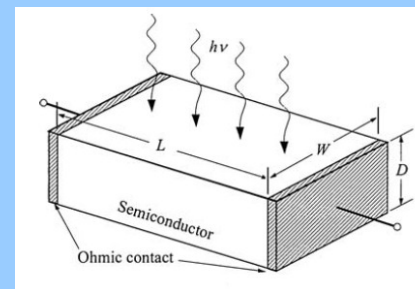
	Si	Ge	GaAs
$E_G$ [eV]	1.12	0.67	1.35
$dE_G/dT$ [eV/K]	$-2.3 \times 10^{-4}$	$-3.7 \times 10^{-4}$	$-5.0 \times 10^{-4}$
$n_i(300\text{ K})$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.45 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$	$1.79 \times 10^6$

detektory fotonowe – zdławienie generacji termicznej, istotne zwłaszcza dla detektorów podczerwieni – najczęściej poprzez chłodzenie



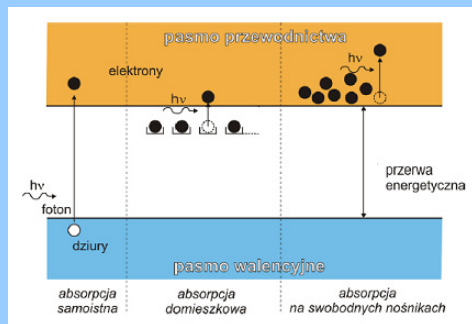
# Fotorezystor

zwany także fotoprzewodnikiem (photoconductor) – zmiana oporności półprzewodnika pod wpływem padającego promieniowania



# Fotorezystor

typy wzbudzeń w półprzewodniku



$h\nu$  – energia fotonu  
 $E_g$  – przerwa energetyczna  
 $E_i$  – energia poziomów domieszkowych



# Fotorezystor

**absorpcja samoistna:** energia fotonu musi być większa niż przerwa energetyczna półprzewodnika

$$h\nu > E_g \quad \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad \lambda_c [\mu m] = \frac{1,238}{E_g [eV]}$$

**absorpcja domieszkowa:** energia fotonu musi być większa niż energia jonizacji domieszek  $E_i$  (donorów lub akceptorów)

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_i} \quad \lambda_c [\mu m] = \frac{1,238}{E_i [eV]}$$

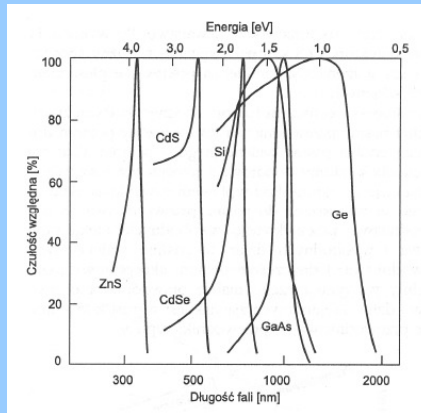
**absorpcja na swobodnych nośnikach:** wzrost energii nośników w paśmie, wzrost fotoprądu wynika ze wzrostu ruchliwości nośników



# Fotorezystor

materiały półprzewodnikowe służące do wytwarzania fotorezystorów

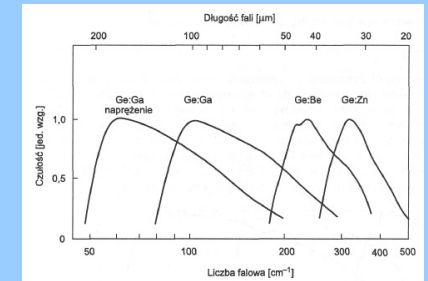
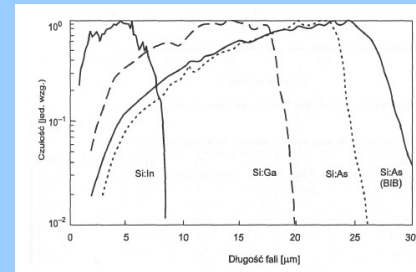
Półprzewodnik	$E_g$ [eV]	$\lambda_A$ [ $\mu\text{m}$ ]
CdS	2,4	0,52
CdSe	1,8	0,69
Si	1,12	1,1
Ge	0,67	1,85
PbS	0,42	2,9
PbSe	0,23	5,3
InSb	0,23	5,3
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$	zależy od $x$	maks. 25



# Fotorezystor

fotoprzewodnictwo domieszkkowe

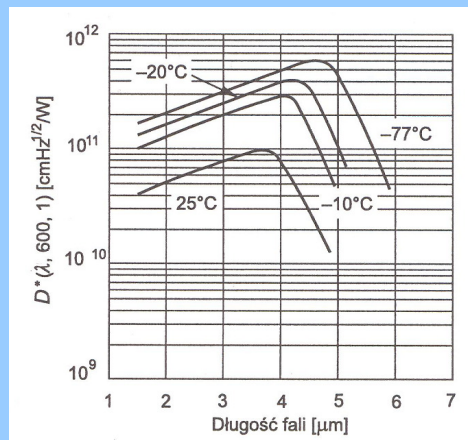
Semiconductor:Dopant	$E_A$ (eV)	$\lambda_A$ ( $\mu\text{m}$ )
Ge:Hg	0.088	14
Ge:Cu	0.041	30
Ge:Zn	0.033	38
Ge:B	0.010	124
Si:B	0.044	28



# Fotorezystor

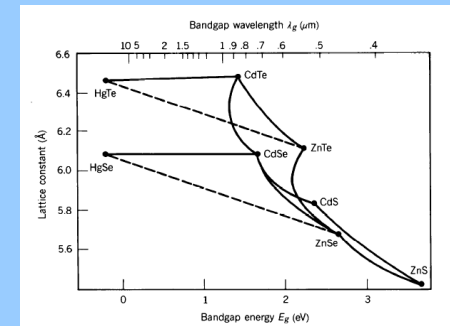
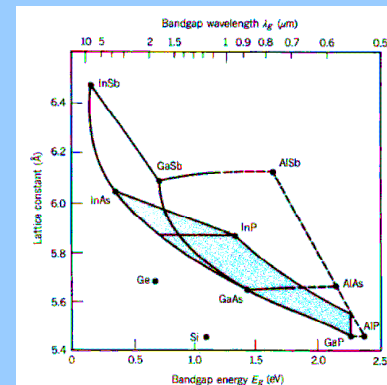
wpływ temperatury

PbSe



# Fotorezystor

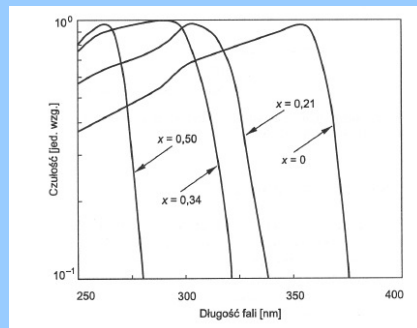
związki potrójne – ciągła zmiana wartości przerwy energetycznej





## Fotorezystor AlGaN

czułość fotorezystorów ze związków potrójnych

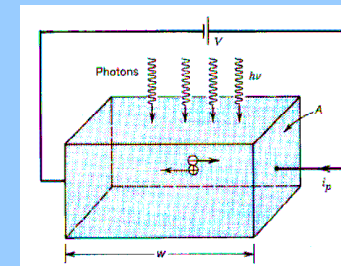


## Fotoprąd

szybkość generacji par elektron – dziura, R

$$R = \eta\Phi/wA$$

$\Phi$  – strumień fotonów  
 $w$  – długość detektora  
 $A$  – powierzchnia boczna  
 $\eta$  – wydajność kwantowa  
 liczba zaabsorbowanych fotonów, które tworzą parę elektron-dziura



rekombinacja elektronów:  $\Delta n/\tau$   
 $\Delta n$  – koncentracja fotoelektronów  
 $\tau$  – czas rekombinacji



## Fotoprąd

dla stanu ustalonego szybkość generacji nośników równa się szybkości rekombinacji nośników

$$R = \Delta n/\tau$$

czyli

$$\Delta n = \eta\tau\Phi/wA$$

wytworzenie par elektron-dziura prowadzi do wzrostu przewodnictwa

$$\Delta\sigma = e\Delta n(\mu_e + \mu_h) = \frac{e\eta\tau(\mu_e + \mu_h)}{wA}\Phi$$

$\mu_e, \mu_h$  – ruchliwość elektronów i dziur



## Fotoprąd

gęstość prądu

$$J_p = \Delta\sigma E$$

prędkość nośników

$$v_e = \mu_e E$$

$$v_h = \mu_h E$$

wówczas

$$J_p = [e\eta\tau(v_e + v_h)/wA]\Phi$$

fotoprąd

$$i_p = AJ_p = [e\eta\tau(v_e + v_h)/w]\Phi$$

gdy

$$v_h \ll v_e$$

to

$$i_p \approx e\eta\frac{\tau}{\tau_e}\Phi$$

$$\tau_e = w/v_e$$

czas przelotu między elektrodami



# Wzmocnienie

wzmocnienie (gain) – ładunek generowany w obwodzie

$$G = \frac{q}{e}$$

fotoprąd bez wzmocnienia

$$i_p = \eta e \Phi$$

fotoprąd ze wzmocnieniem

$$i_p = \eta q \Phi = G \eta e \Phi$$

wzmocnienie fotorezystora

$$G = \tau / \tau_e$$

typowo

$$w = 1 \text{ mm}$$

$$v_e = 10^7 \text{ cm/s}$$

$$\tau_e \approx 10^{-8} \text{ s}$$

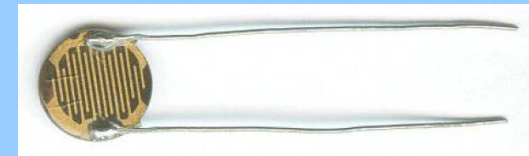
$$G < 10^6$$



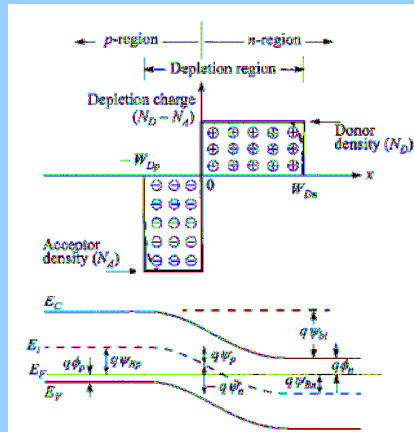
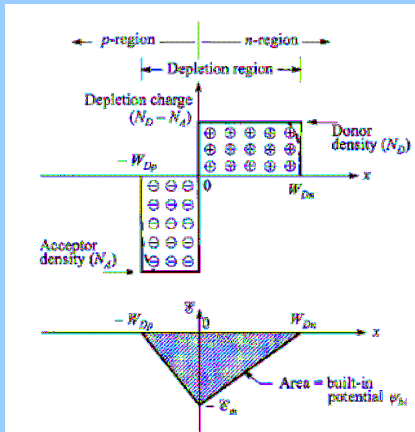
# Fotorezystor

fotorezystor

- zmiana oporności półprzewodnika pod wpływem padającego promieniowania
- zakres widmowy zależy od półprzewodnika, głównie podczerwień
- niska cena
- prosta konstrukcja
- wzmocnienie
- długi czas odpowiedzi, ułamek sekundy

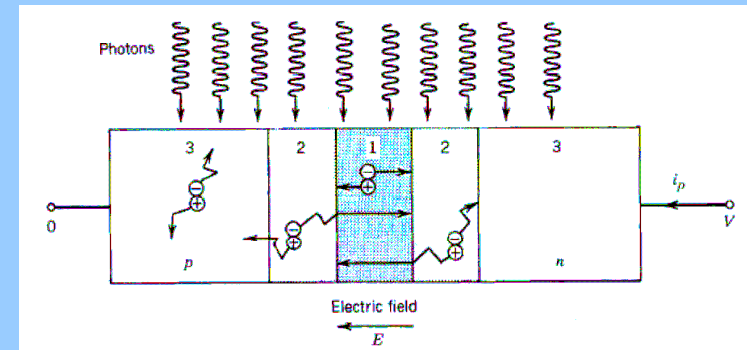


# Złącze pn - rekapitulacja



# Fotodioda

fotodioda pn, polaryzacja w kierunku zaporowym

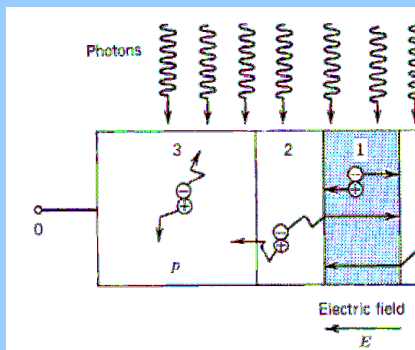


pary elektron-dziura tworzone w trzech regionach



## Generacja nośników

region 3



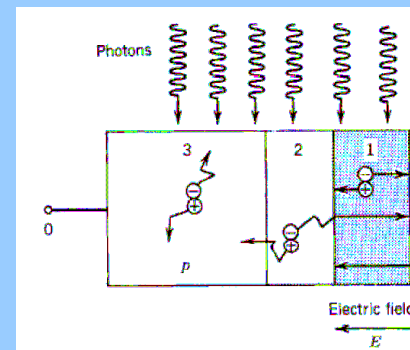
pary elektron-dziura tworzone w obszarze neutralnym bez pola elektrycznego – tylko dyfuzja  
rekombinacja spontaniczna  
zerowy wkład do mierzonego prądu w obwodzie

WS 2008/2009



## Generacja nośników

region 2



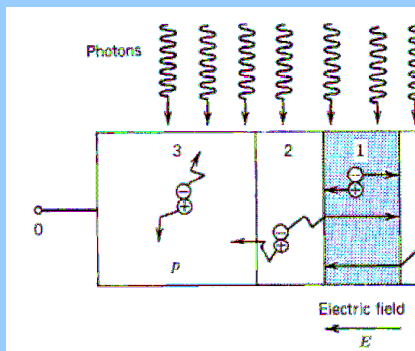
pary elektron-dziura tworzone w pobliżu obszaru zubożonego dzięki dyfuzji nośnik może trafić do obszaru zubożonego wkład do mierzonego prądu w obwodzie dają elektrony z obszaru  $p$  i dziury z obszaru  $n$

WS 2008/2009



## Generacja nośników

region 1



pary elektron-dziura tworzone w obszarze zubożonym silne pole elektryczne – separacja nośników  
brak rekombinacji spontanicznej  
prąd w kierunku zaporowym

WS 2008/2009



## Fotoprąd w diodzie $pn$

wkład od nośników z obszaru 1 i 2

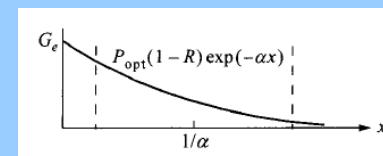
$$J_{\text{tot}} = J_{\text{dr}} + J_{\text{diff}}$$

drift w obszarze 1      dyfuzja w obszarze 2

szybkość tworzenia par elektron-dziura w warstwie zubożonej

$$G_e(x) = \Phi_0 \alpha \exp(-\alpha x)$$

$$P_{\text{opt}}(1-R)/Ah\nu$$



WS 2008/2009



## Fotoprąd w diodzie pn

fotoprąd – wkład dryfowy

$$J_{dr} = -q \int_0^{W_D} G_e(x) dx = q \Phi_0 [1 - \exp(-\alpha W_D)]$$

dyfuzja nośników (dziur w obszarze domieszkowanym na typ n)

$$D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} + G_e(x) = 0$$

$D_p$  – współczynnik dyfuzji dziur  
 $\tau_p$  – czas życia nośników  
 $p_{no}$  – równowagowa koncentracja dziur

WS 2008/2009



## Fotoprąd w diodzie pn

rozwiązanie

$$p_n = p_{no} - [p_{no} + C_1 \exp(-\alpha W_D)] \exp\left(\frac{W_D - x}{L_p}\right) + C_1 \exp(-\alpha x)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$C_1 = \left(\frac{\Phi_0}{D_p}\right) \frac{\alpha L_p^2}{1 - \alpha^2 L_p^2}$$

prąd dyfuzyjny

$$J_{diff} = -q D_p \frac{\partial p_n}{\partial x} \Big|_{x=W_D} = q \Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} \exp(-\alpha W_D) + \frac{q p_{no} D_p}{L_p}$$

prąd całkowity

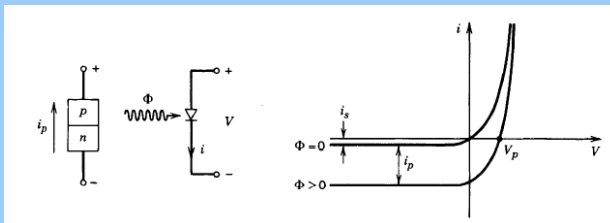
$$J_{tot} = q \Phi_0 \left[ 1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] + \frac{q p_{no} D_p}{L_p}$$

WS 2008/2009



## Mod fotoprzewodzący

mod fotoprzewodzący



prąd ciemny  
~ 1 to 10 nA

napięcie w kierunku zaporowym:

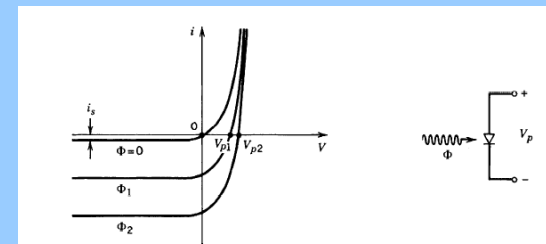
- silne pole elektryczne, wzrost prędkości, skrócenie czasu tranzytu
- wzrost szerokości warstwy zubożonej, obniżenie pojemności złącza
- wzrost obszaru aktywnego fotodetektora

WS 2008/2009



## Mod fotowoltaiczny

mod fotowoltaiczny



prąd ciemny  
0 A

złącze niespolaryzowane:

- absorpcja fotonu powoduje powstanie różnicy potencjałów

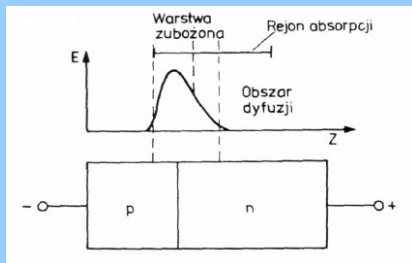
WS 2008/2009



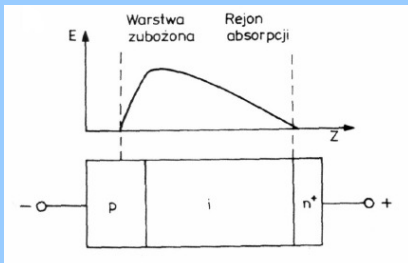


## Fotodioda p-i-n

fotodioda pn



fotodioda pin

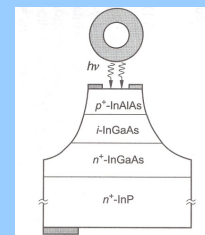


fotodioda pin:  
poszerzenie warstwy zubożonej: więcej nośników dryfujących, większy obszar aktywny optycznie, zwiększenie czasu tranzytu

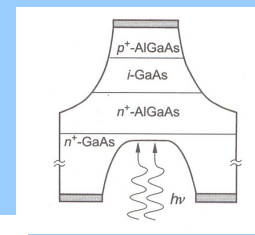


## Fotodioda p-i-n - konfiguracje

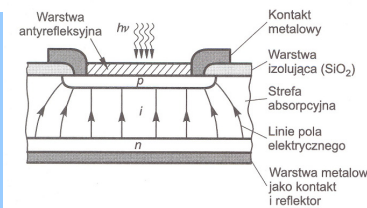
meza oświetlana od przodu



meza oświetlana od spodu



planarna oświetlana od przodu

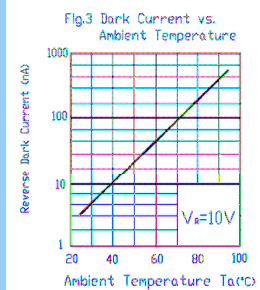
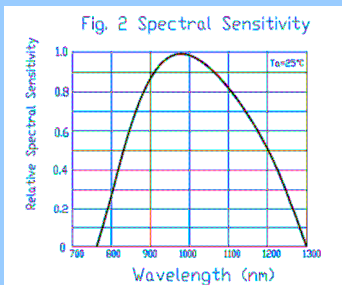


## Fotodioda pin - przykład

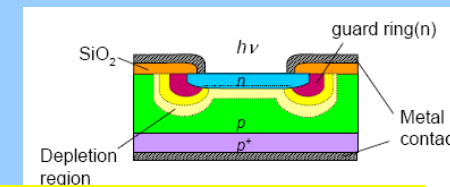


Absolute Maximum Ratings at  $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Rating	Unit	Notice
Reverse Voltage	$V_R$	32	V	
Power Dissipation	$P_d$	150	mW	
Lead Soldering Temperature	$T_{sol}$	260	$^\circ\text{C}$	4mm from mold body less than 5 seconds
Operating Temperature	$T_{opr}$	-25 ~ +85	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$	



## Plan na ósmy wykład



fotodioda lawinowa  
fotopowielacz

