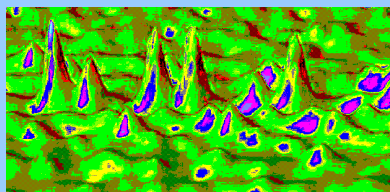




Detekcja światła



Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

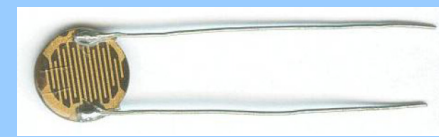
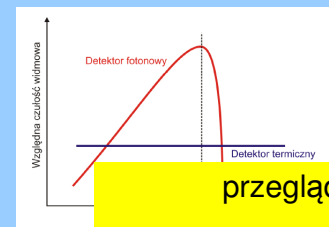
Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16

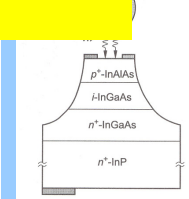
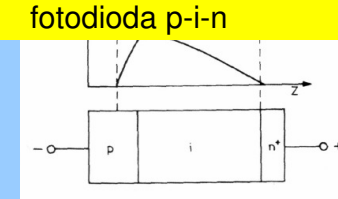
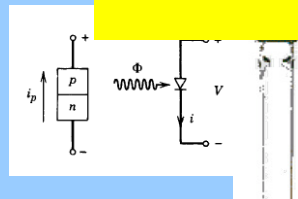
WS 2008/2009



Repeta z wykładu nr 8



przeгляд detektorów fotonowych 1
fotorezystor
fotodioda p-n
fotodioda p-i-n

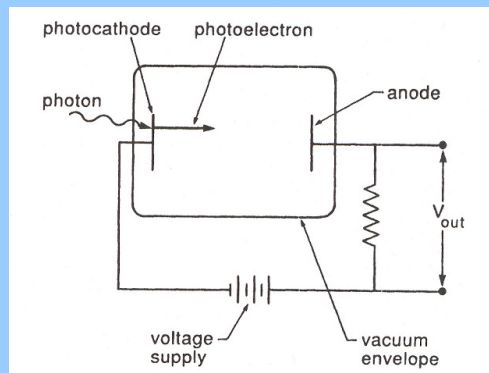


WS 2008/2009



Przypomnienie

fototuba – detektor oparty o efekt fotoelektryczny zewnętrzny
– brak wzmacnienia

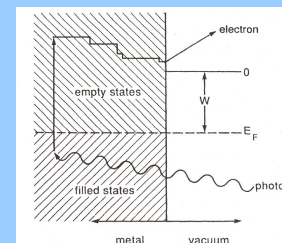


WS 2008/2009

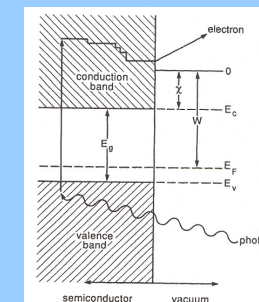


Efekt fotoelektryczny

metal



półprzewodnik

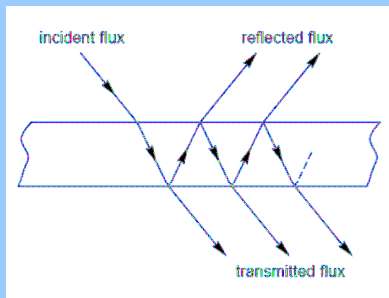


fotony przekazują swoją energię elektronom
elektrony poruszają się w materiale tracąc część tej energii
elektrony, które dotrą do powierzchni i posiadają jeszcze
wystarczająco dużo energii opuszczą materiał

WS 2008/2009



Wpływ odbicia od powierzchni

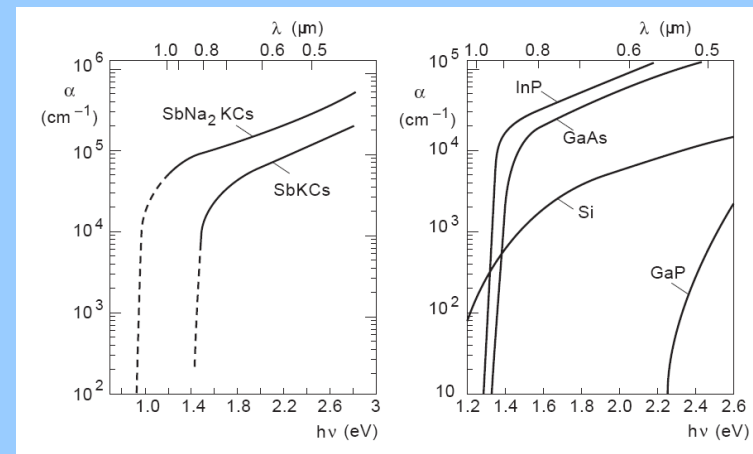


katody półprzewodnikowe (odbicie ~ 15-50%) absorbują znacznie więcej fotonów niż katody metaliczne (odbicie > 80%)

założenie: prawdopodobieństwo dotarcia do powierzchni – 30%
 efektywność kwantowa: 15-25% dla półprzewodnika

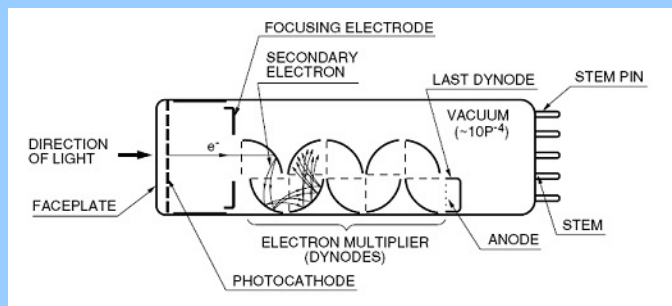


Absorpcja katody



Fotopowielacz

przykładowa konstrukcja



działanie oparte o efekt fotoelektryczny zewnętrzny i emisję wtórną



Wzmocnienie

n_k – liczba elektronów wybitych z katody
 g_i – wzmocnienie i-tej dynody

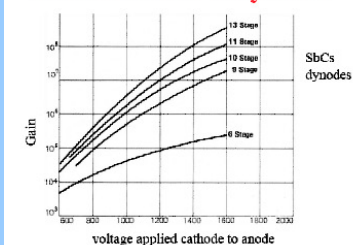
liczba elektronów n_a po dwóch dynodach: $n_k g_1 g_2$

$$\text{dla } N \text{ dynod: } n_a = n_k \prod_{i=1}^N g_i$$

przykład
 $g_i = 4, N = 10$

$$M = \frac{n_a}{n_k} = \prod_{i=1}^{10} g_i = 4^{10} \approx 10^6$$

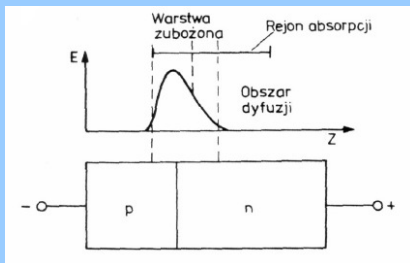
Gain vs number of dynodes



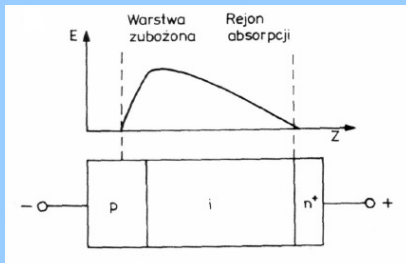


Przypomnienie

fotodioda p-n



fotodioda p-i-n



napięcie w kierunku zaporowym, około 30 V
 prąd ciemny ~ 10 nA
 czas odpowiedzi ~ 200 ns (p-n), ~ 5 ns (p-i-n)
brak wzmocnienia



Fotodioda p-i-n

typowe diody p-i-n i ich charakterystyki

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Quantum efficiency	η	%	75–90	50–55	60–70
Dark current	I_d	nA	1–10	50–500	1–20
Rise time	T_r	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	V_b	V	50–100	6–10	5–6



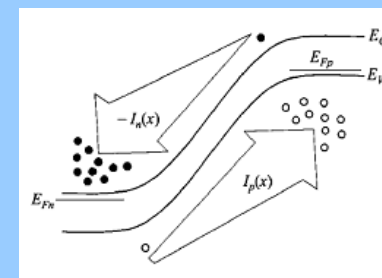
Fotodioda lawinowa (APD)

fotodioda lawinowa – avalanche photodiode
 – jeden z najbardziej czułych fotodetektorów



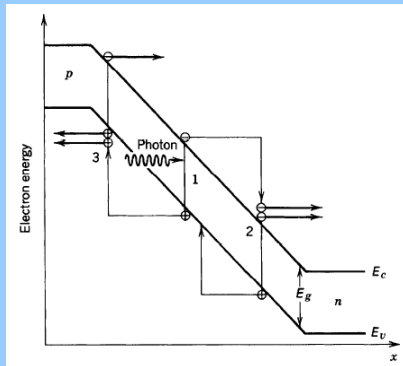
Jonizacja

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





Jonizacja



współczynnik jonizacji α – liczba par elektron – dziura wytworzonych przez nośnik na jednostkowym odcinku drogi

dla elektronu poruszającego się z v_n :

$$\alpha_n = \frac{1}{n} \frac{dn}{d(tv_n)} = \frac{1}{nv_n} \frac{dn}{dt}$$

$1/\alpha$ – średni czas pomiędzy kolejnymi aktami jonizacji

α_n, α_p – współczynniki jonizacji dla elektronu i dziury



Jonizacja

uwzględniając elektrony i dziury

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p \quad \text{czyli} \quad = \frac{\alpha_n J_n}{q} + \frac{\alpha_p J_p}{q}$$

w każdej chwili czasu gęstość prądu zależy od położenia

$$\frac{dJ_n}{dx} = \alpha_n J_n + \alpha_p J_p$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = -\alpha_n J_n - \alpha_p J_p$$

znak „-” wynika z przeciwnego kierunku

suma prądu elektronowego i dziurowego jest stała



Zależność od pola E

$$\alpha(\mathcal{E}) = \frac{q\mathcal{E}}{E_I} \exp\left\{-\frac{\mathcal{E}_I}{\mathcal{E}[1 + (\mathcal{E}/\mathcal{E}_p)] + \mathcal{E}_T}\right\}$$

dla Si:
 $E_I = 3.6$ eV (elektrony)
 $E_I = 5$ eV (dziury)

progowe wartości pola elektrycznego związane z rozpraszaniem

- \mathcal{E}_T termicznym
- \mathcal{E}_p na fononach optycznych
- \mathcal{E}_I na zjonizowanych centrach

gdym $\mathcal{E}_p > \mathcal{E} > \mathcal{E}_T$ to

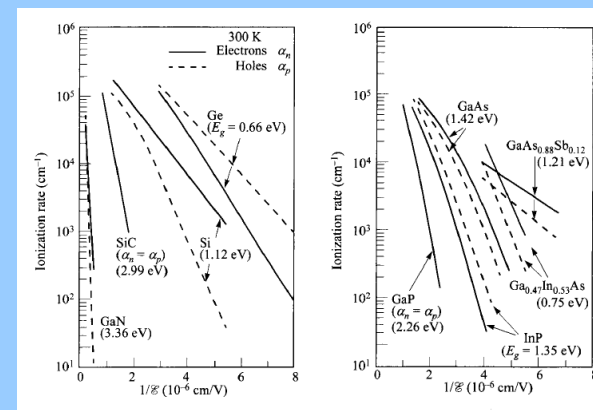
$$\alpha(\mathcal{E}) = \frac{q\mathcal{E}}{E_I} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_I}{\mathcal{E}}\right)$$

gdym $\mathcal{E} > \mathcal{E}_p$ $\mathcal{E} > \sqrt{\mathcal{E}_p \mathcal{E}_T}$ to

$$\alpha(\mathcal{E}) = \frac{q\mathcal{E}}{E_I} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_I \mathcal{E}_p}{\mathcal{E}^2}\right)$$



Zależność od pola E



GaAs, GaP

$$\alpha(\mathcal{E}) = \frac{q\mathcal{E}}{E_I} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_I \mathcal{E}_p}{\mathcal{E}^2}\right)$$

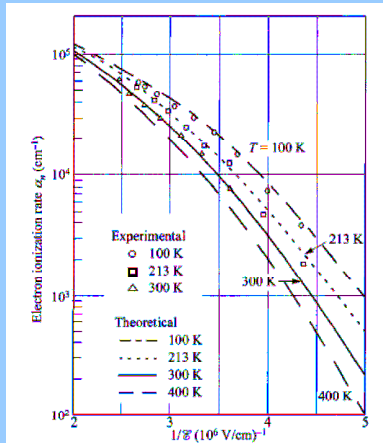
pozostałe

$$\alpha(\mathcal{E}) = \frac{q\mathcal{E}}{E_I} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_I}{\mathcal{E}}\right)$$

α maleje dla półprzewodników o większej przerwie energetycznej



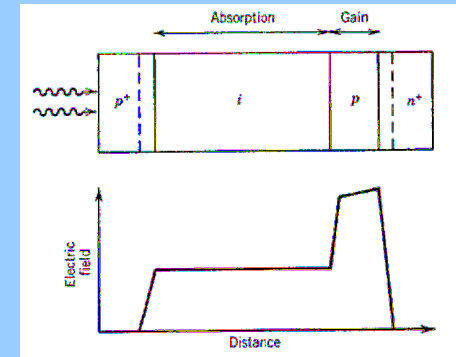
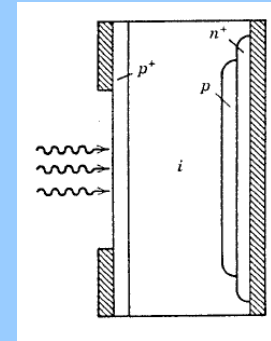
Zależność od temperatury



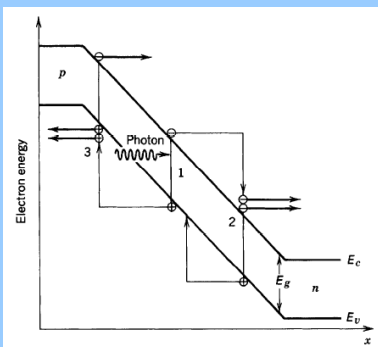
redukcja wartości α ze wzrostem temperatury wynika ze wzrostu prawdopodobieństwa rozproszeń, a tym samym zmniejszenia szansy osiągnięcia energii progowej na jonizację



Zasada działania



Wzmocnienie APD



stosunek współczynników jonizacji

$$k = \frac{\alpha_h}{\alpha_e}$$

$$\alpha_h \ll \alpha_e \quad (k \ll 1)$$

jonizacja związana z elektronami od strony p do strony n

$$k \approx 1$$

elektrony są tworzone przez elektrony i dziury – rośnie wartość wzmocnienia

$$k \approx 1$$

sytuacja niekorzystna, bo:

- proces jest przypadkowy, powoduje wzrost szumów
- zwiększa możliwość przebiccia lawinowego
- zajmuje więcej czasu, redukując szybkość działania



Wzmocnienie APD

założenie: powielenie elektronowe $k = 0$

wtedy zmiana gęstości prądu na odcinku dx wynosi

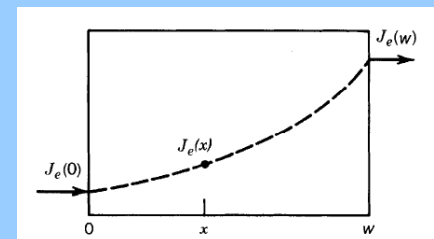
$$dJ_e(x) = \alpha_e J_e(x) dx \quad \rightarrow \quad \frac{dJ_e}{dx} = \alpha_e J_e(x)$$

rozwiązanie

$$J_e(x) = J_e(0) \exp(\alpha_e x)$$

wzmocnienie (gain)

$$G = \exp(\alpha_e w)$$





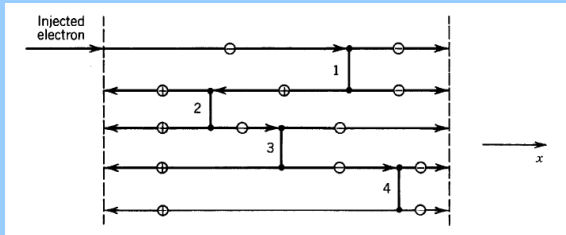
Wzmocnienie APD

założenie: powielenie elektronowe + jonizacja wywołana dziurami

$$\frac{dJ_e}{dx} = \alpha_e J_e(x) + \alpha_h J_h(x)$$

zasada zachowania ładunku

$$dJ_e/dx = -dJ_h/dx \quad \text{oraz} \quad J_e(x) + J_h(x) = \text{constant}$$

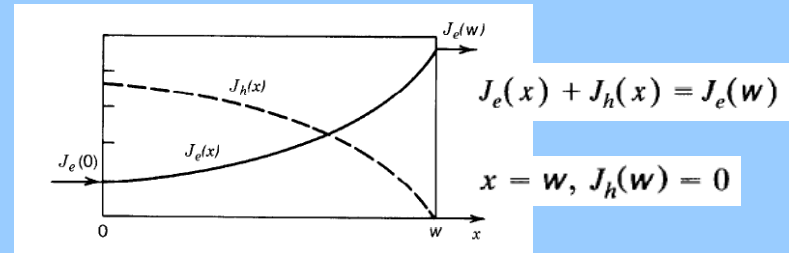


WS 2008/2009



Wzmocnienie APD

założenie: powielenie elektronowe + jonizacja wywołana dziurami



wtedy

$$\frac{dJ_e}{dx} = (\alpha_e - \alpha_h)J_e(x) + \alpha_h J_e(w)$$

WS 2008/2009



Wzmocnienie APD

wzmocnienie: $G = J_e(w)/J_e(0)$ dla przypadku gdy $\alpha_e \neq \alpha_h$

$$G = (\alpha_e - \alpha_h) / \{ \alpha_e \exp[-(\alpha_e - \alpha_h)w] - \alpha_h \}$$

$$G = \frac{1 - k}{\exp[-(1 - k)\alpha_e w] - k}$$

gdy $k = 0$

gdy $k = \infty$

gdy $k = 1$

$$G = \exp(\alpha_e w)$$

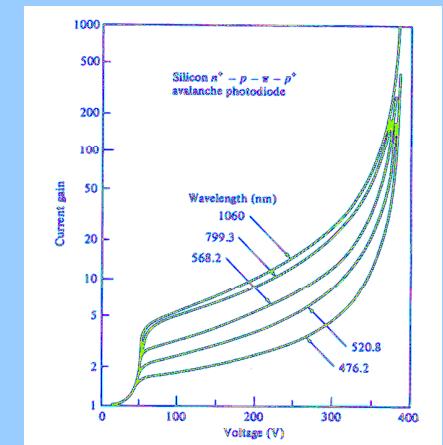
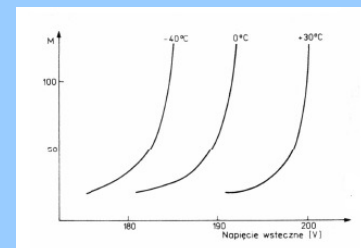
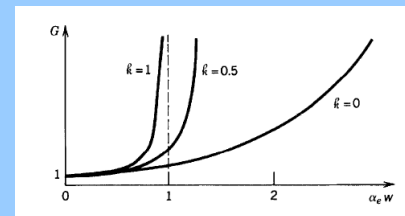
$$G = 1$$

$$G = 1/(1 - \alpha_e w)$$

WS 2008/2009



Wzmocnienie APD



WS 2008/2009



Typowe APD

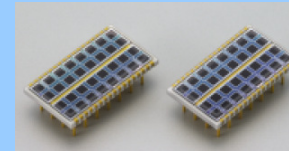
Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R_{APD}	A/W	80–130	3–30	5–20
APD gain	M	—	100–500	50–200	10–40
k -factor	k_A	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Dark current	I_d	nA	0.1–1	50–500	1–5
Rise time	T_r	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.2–1	0.4–0.7	1–10
Bias voltage	V_b	V	200–250	20–40	20–30

WS 2008/2009

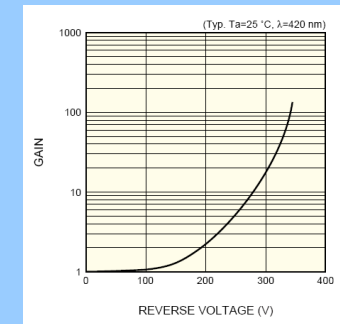
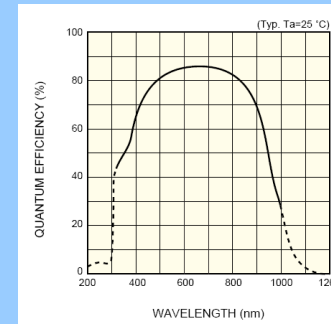


Matryce APD

Si



HAMAMATSU

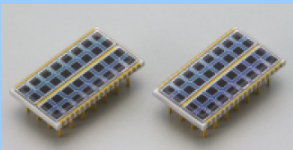


WS 2008/2009



Matryce APD

Si



HAMAMATSU

General ratings

Parameter	Rating	Unit
Element size	1.6 × 1.6 (× 32 elements)	mm
Element pitch	2.3	mm
Package	Ceramic	-
Window material	Epoxy resin	-

Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Operating temperature	T_{opr}	-20 to +60	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	T_{stg}	-20 to +80	$^\circ\text{C}$

Electrical and optical characteristics ($T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$)

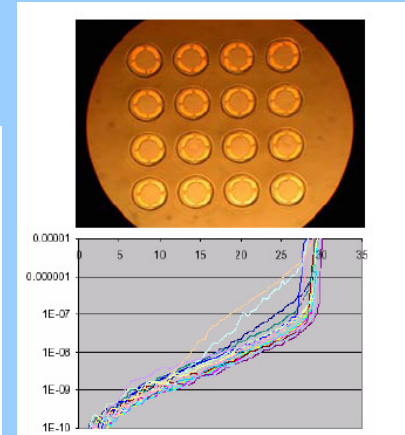
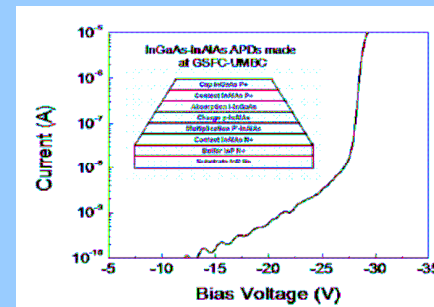
Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Spectral response range	λ	-	-	320 to 1000	-	nm
Peak sensitivity wavelength	λ_p	$M=50$	-	600	-	nm
Quantum efficiency	QE	$\lambda=420\text{ nm}$	60	70	-	%
Breakdown voltage	V_{BR}	-	-	400	500	V
Dark current	I_D	per 1 element, $M=50$	-	10	50	nA
Terminal capacitance	C_t	per 1 element, $M=50$, $f=10\text{ kHz}$	-	10	-	pF
Gain	M	-	-	50	-	-

WS 2008/2009



Matryce APD

4x4
InGaAs

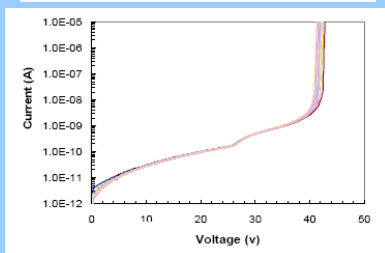
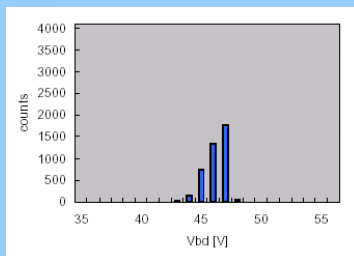
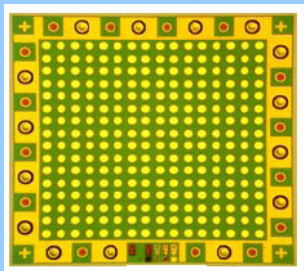


WS 2008/2009



Matryce APD

16x16
InGaAs



WS 2008/2009



Matryce APD

256x256

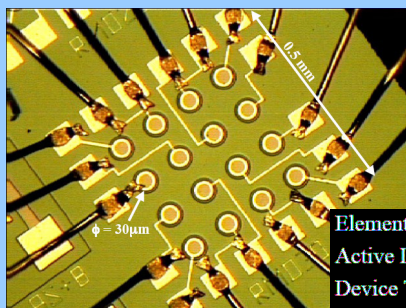


OptoGration
 256x256 InGaAs/InAlAs matryca APD
 powierzchnia 1.5 cm²
 niski poziom szumów
 doskonała jednorodność i wydajność
 kwantowa
 napięcie przebicia w zakresie 2V
 ciemny prąd ~ 4 nA

WS 2008/2009



Matryce APD



Lincoln Labs

Element Spacing	100 μm
Active Diameters	20, 30, 40 μm
Device Thickness	~ 20 μm
Formats Produced	4 x 4 and 32 x 32
Breakdown Voltage	~ 25 V
Photon Detection Efficiency	30% (> 50% with AR coating)
Dark Count Rate	~ 2400e ^{0.106T} s ⁻¹ , T in °C
Effective Resistance	25 k Ω
Effective Capacitance	< 2 pF

WS 2008/2009



Porównanie detektorów

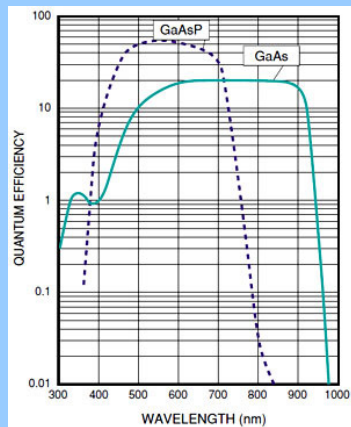
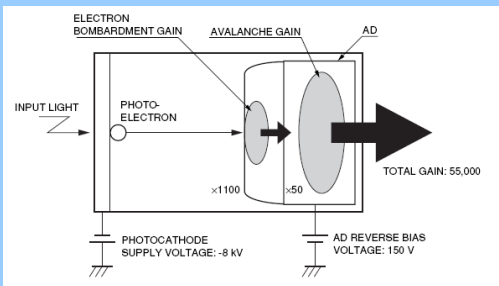
Parametr	Si-PIN	Si-APD	fotopowielacz
Średnica aktywna-mm	0.1 do > 10	0.1 do 16	kilka do > 50
Zakres spektralny-nm	185 do 1150	350 do 1150	110 do 700
Efektywność kwantowa	>90% @ max ~60% @200nm ~50% @1060nm		
Czułość	Średnia	Duża	Duża
Wymagana polaryzacja	0-100 V	100-500 V	kilka kV
Odporność na przeciężenia	Bardzo dobra	Bardzo dobra	Zła-Średnia
Wielkość	Mała	Mała	Średnia-Duża
Czas uruchomienia	<1 μs	<1 μs	sek. do godz.
Czas życia	> 10 lat	> 10 lat	Zależy od syg.
Łatwość użytkowania	Prosta	Średnia	Średnia
Cena	Mała	Średnia	Średnia-Wysoka

WS 2008/2009

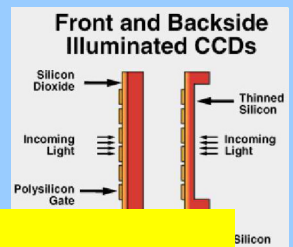
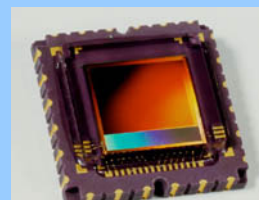
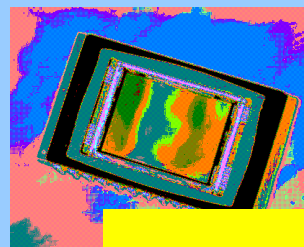


Detektor hybrydowy

połączenie fotokatody i diody lawinowej



Plan na dziesiąty wykład



CCD

