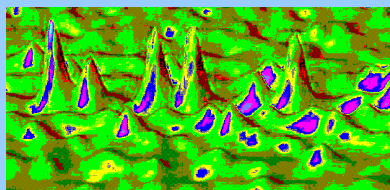




Detekcja światła



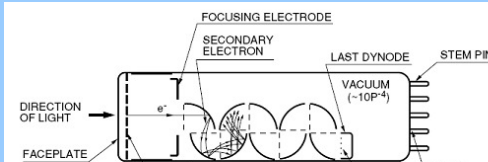
Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl
Biuro: 365, telefon: 611-3250

Konsultacje: czwartek 13-16

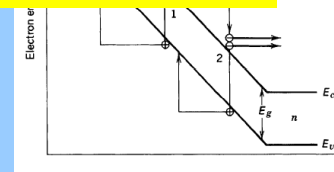
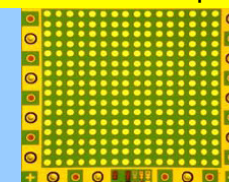


Repeta z wykładu nr 9

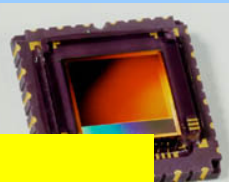
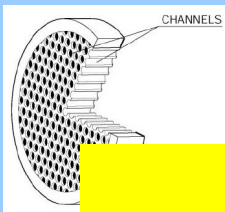


$$n_a = n_k \prod_{i=1}^N g_i$$

fotopowielacz, część 1
fotorezystor
fotodioda p-n
fotodioda p-i-n

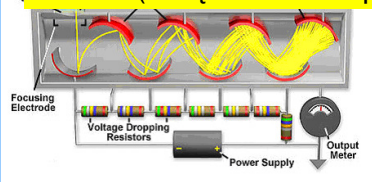


Plan na dzisiaj



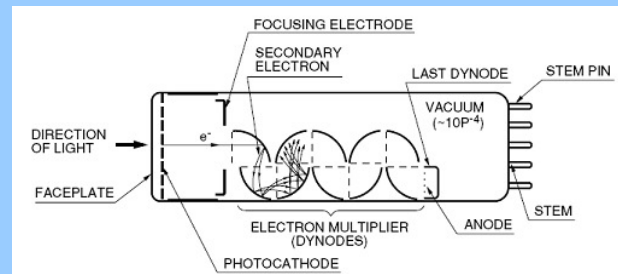
fotopowielacz, część 2
MCP (detektor wielokanałowy)
streak camera

~~GCD (urządzenie ze sprzężeniem ładunkowym)~~



Przypomnienie

działanie fotopowielacza jest oparte o efekt fotoelektryczny zewnętrzny i emisję wtórną



wzmocnienie

$$n_a = n_k \prod_{i=1}^N g_i$$

charakterystyka fotopowielacza zależy od materiału okna, geometrii powielenia, materiału katody, etc.



Kawałek historii

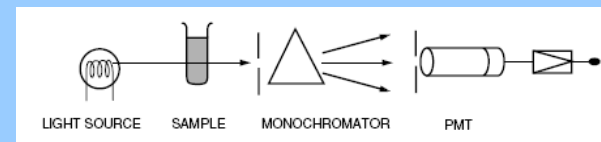
- 1887: Hertz – efekt fotoelektryczny zewnętrzny
- 1902: Austin – obserwacja emisji wtórnej
- 1905: Einstein: „Fotoemisja jest procesem, w którym fotony są konwertowane na swobodne elektrony.”
- 1913: Elster i Geiter skonstruowali tubę fotoelektryczną
- 1929: Koller i Campbell odkryli fotokatodę Ag-O-Cs
- 1935: Iams i inni wytworzyli fotopowielacz oparty o fotokatodę zespoloną z pojedynczą dynodą
- 1936: Zworykin i inni wytworzyli fotopowielacz złożony z wielu dynod, wykorzystujący pole elektryczne i magnetyczne
- 1939: Zworykin i Rajchman zastosowali w fotopowielaczu skupianie elektrostatyczne
- 1949 & 1956: Morton udoskonalił strukturę tuby fotopowielacza

WS 2008/2009



Wstępna uwaga ogólna

dobór (właściwy) fotopowielacza (jak i każdego innego detektora) zależy od tego jaki proces chcemy badać



Incident light conditions	Selection reference	
	<Photomultiplier tubes>	<Circuit Conditions>
Light wavelength	Window material Photocathode spectral response	
Light intensity	Number of dynodes Dynode type Voltage applied to dynodes	Signal processing method (analog or digital method)
Light beam size	Effective diameter (size) Viewing configuration (side-on or head-on)	
Speed of optical phenomenon	Time response	Bandwidth of associated circuit

WS 2008/2009



Typy fotopowielaczy

side-on

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



wydajność
~ 50-70%

head-on

większa czułość
kontrola powierzchni aktywnej
fotokatoda przezroczysta



wydajność
~ 70-90%

WS 2008/2009



Duże fotopowielacze

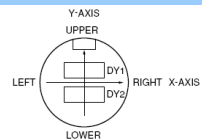


wykorzystywane głównie w fizyce wysokich energii

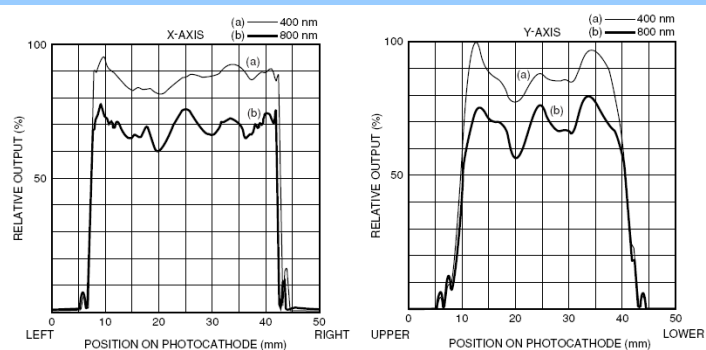
WS 2008/2009



Jednorodność fotokatody



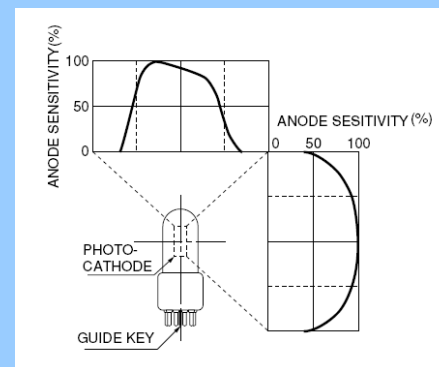
napięcie 1000 V, rozmiar wiązki 1 mm



WS 2008/2009



Jednorodność fotokatody



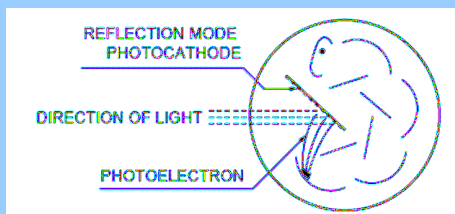
fotopowielacze head-on charakteryzują się lepszą jednorodnością

jednorodność pogarsza się w granicy długofalowej

WS 2008/2009

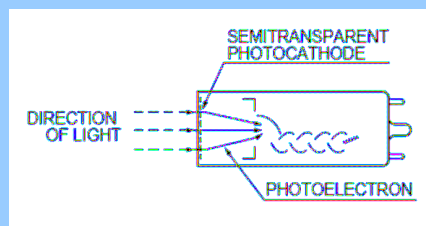


Fotokatoda



fotokatoda odbiciowa

fotokatoda transparentna



WS 2008/2009



Typy fotokatod

fotokatody są wykonane z półprzewodników, w których skład wchodzi metale alkaliczne charakteryzujące się małymi pracami wyjścia

Cs-I – fotokatoda „solar-blind”, zakres: 115-200 nm, łączona z oknami kwarcowymi oraz z MgF_2

Cs-Te – fotokatoda „solar-blind”, zakres do 300 nm, występuje w PMT typu odbiciowego i transparentnego, w tym drugim przypadku nieco gorsza czułość

Sb-Cs – używana do detekcji światła widzialnego i ultrafioletu, bardzo popularna zwłaszcza w aplikacjach charakteryzujących się wysoką intensywnością mierzonych sygnałów optycznych, zwykle w konfiguracji odbiciowej

WS 2008/2009



Typy fotokatod

fotokatody bi-alkaliczne zawierają atomy dwóch metali alkalicznych (przykłady: **Sb-Rb-Cs**, **Sb-K-Cs**)
charakterystyki widmowe podobne do fotokatody Sb-Cs, ale lepsza czułość i niższe wartości prądu ciemnego

fotokatody bi-alkaliczne wysokotemperaturowe (**Sb-Na-K**) mogą pracować w wysokich temperaturach (do 170C), podczas gdy normalne fotokatody bi-alkaliczne do 50C
niezwykle niski prąd ciemny czyni te katody niezastąpionymi w pomiarach słabych natężeń światła w temperaturze pokojowej

fotokatody wieloalkaliczne (**Sb-Na-K-Cs**)
zastosowanie trzech lub więcej metali alkalicznych prowadzi do znacznego rozszerzenia zakresu spektralnego fotonowielacza, aż do 850-900 nm, przy zachowaniu własności detekcyjnych w nadfiolecie
powszechne w szerokopasmowych spektrofotometrych

WS 2008/2009



Typy fotokatod

Ag-O-Cs

zakres spektralny od 300 do 1200 nm, dla konfiguracji odbiciowej d 1100nm, zastosowanie głównie do detekcji promieniowania podczerwonego

GaAs (Cs), InGaAs (Cs)

fotokatody charakteryzujące się dobrą i jednorodną czułością w zakresie nadfioletu, światła widzialnego i bliskiej podczerwieni, duża różnica między katodami transparentnymi i odbiciowymi – absorpcja, dla InGaAs granica długofalowa przesunięta w kierunku niższych energii

InP/InGaAs (Cs), InP/InGaAsP (Cs)

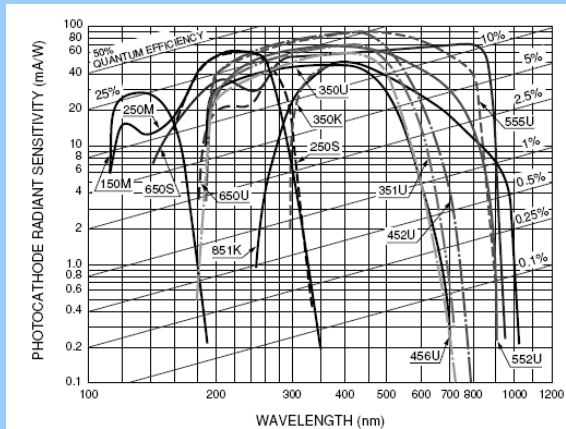
fotokatody wykorzystujące złącze p-n, w których po przyłożeniu napięcia dochodzi do obniżenia energii pasma przewodnictwa – zakres widmowy rozszerzony do 1.4 mm, 1.7 mm
konieczność chłodzenia do -60C, -80C, ze względu na prąd ciemny

WS 2008/2009

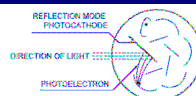


Fotokatody odbiciowe

charakterystyka widmowa – fotokatody odbiciowe



150M – Cs-I
250M – Cs-Te
452U – bi-alkaliczna
555 – wieloalkaliczna
650S – GaAs



WS 2008/2009



Fotokatoda

charakterystyki fotokatod odbiciowych

Curve Code (S number)	Photocathode Material	Window Material	Luminous Sensitivity (Typ.) (μA/lm)	Spectral Response				
				Spectral Range (nm)	Peak Wavelength			
					Radiant Sensitivity (mA/W)	(nm)	Quantum Efficiency (%)	(nm)
150M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	25.5	135	26	125
250S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	62	240	37	210
250M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	63	220	35	220
350K (S-4)	Sb-Cs	Borosilicate	40	300 to 650	48	400	15	350
350U (S-5)	Sb-Cs	UV	40	185 to 650	48	340	20	280
351U (Ext'd S-5)	Sb-Cs	UV	70	185 to 750	70	410	25	280
452U	Bialkali	UV	120	185 to 750	90	420	30	260
456U	Low dark bialkali	UV	60	185 to 680	60	400	19	300
552U	Multialkali	UV	200	185 to 900	68	400	26	260
555U	Multialkali	UV	525	185 to 900	90	450	30	260
650U	GaAs(Cs)	UV	550	185 to 930	62	300 to 800	23	300
650S	GaAs(Cs)	Quartz	550	160 to 930	62	300 to 800	23	300
851K	InGaAs(Cs)	Borosilicate	150	300 to 1040	50	400	16	370
—	InP/InGaAsP(Cs)	Borosilicate	—	300 to 1400	10	1250	1.0	1000 to 1200
—	InP/InGaAs(Cs)	Borosilicate	—	300 to 1700	10	1550	1.0	1000 to 1200

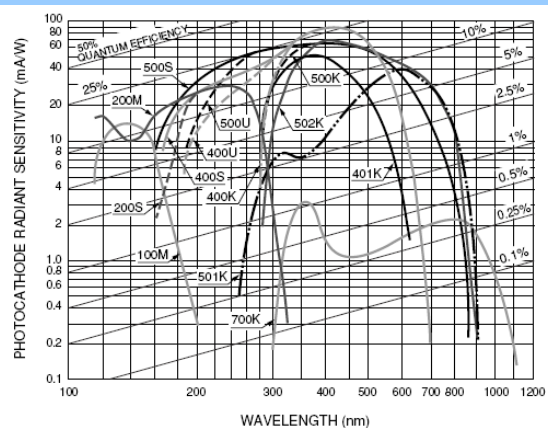


WS 2008/2009

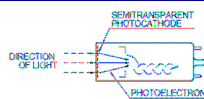


Fotokatody transparentne

charakterystyka widmowa – fotokatody transparentne



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



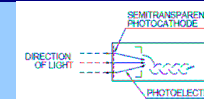
WS 2008/2009



Fotokatoda

charakterystyki fotokatod transparentnych

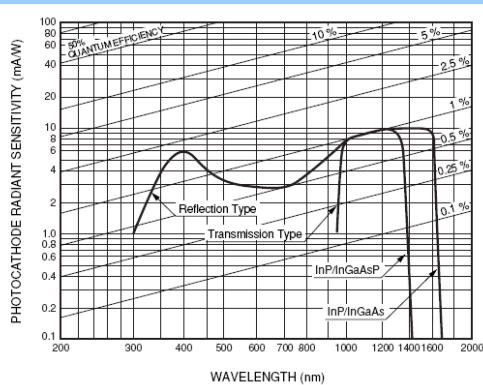
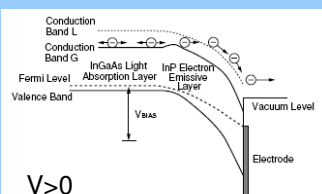
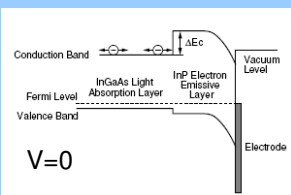
Curve Code (S number)	Photocathode Material	Window Material	Luminosity Sensitivity (Typ.) (μA/lm)	Spectral Response				
				Spectral Range (nm)	Peak Wavelength			
					Radiant Sensitivity (mA/W)	(nm)	Quantum Efficiency (%)	(nm)
100M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	29	240	14	210
200M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	29	240	14	200
400K	Bialkali	Borosilicate	95	300 to 650	88	420	27	390
400U	Bialkali	UV	95	185 to 650	88	420	27	390
400S	Bialkali	Quartz	95	160 to 650	88	420	27	390
401K	High temp. bialkali	Borosilicate	40	300 to 650	51	375	17	375
500K(S-20)	Multialkali	Borosilicate	150	300 to 850	64	420	20	375
500U	Multialkali	UV	150	185 to 850	64	420	25	280
500S	Multialkali	Quartz	150	160 to 850	64	420	25	280
501K(S-25)	Multialkali	Borosilicate	200	300 to 900	40	600	8	580
502K	Multialkali	Borosilicate (prism)	230	300 to 900	69	420	20	390
700K(S-1)	Ag-O-Cs	Borosilicate	20	400 to 1200	2.2	800	0.36	740
—	InP/InGaAsP(Cs)	—	—	950 to 1400	10	1250	1.0	1000 to 1200
—	InP/InGaAs(Cs)	—	—	950 to 1700	10	1550	1.0	1000 to 1200



WS 2008/2009



Fotokatoda InP/InGaAs



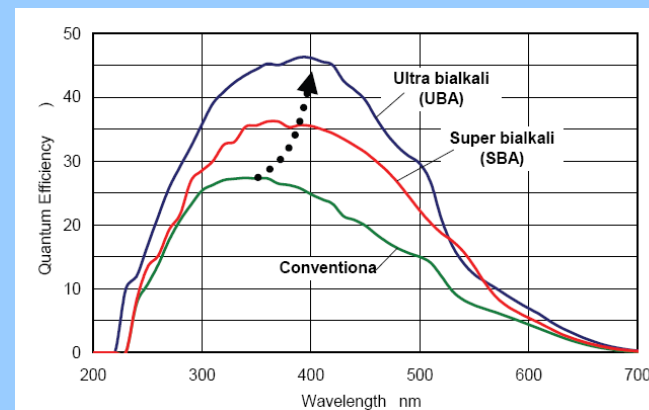
WS 2008/2009



Najnowsze osiągnięcia

HAMAMATSU

QE > 45%



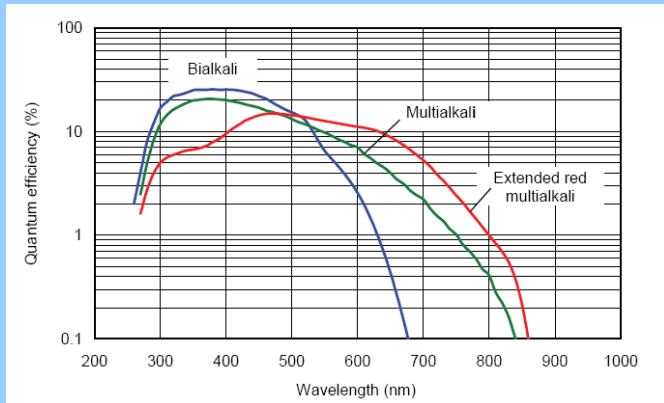
WS 2008/2009



Najnowsze osiągnięcia

HAMAMATSU

przesunięcie
w niższe energie



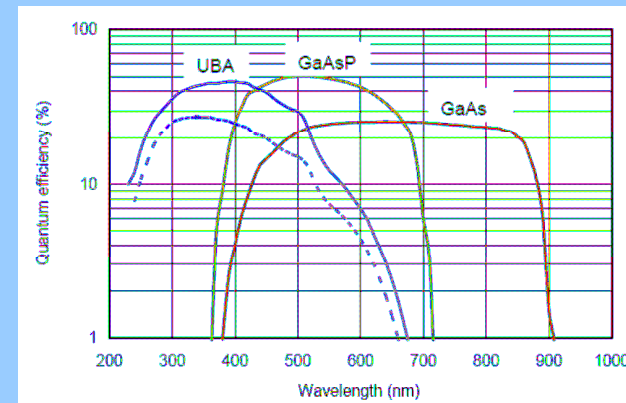
WS 2008/2009



Najnowsze osiągnięcia

HAMAMATSU

dla GaAsP
QE > 50%



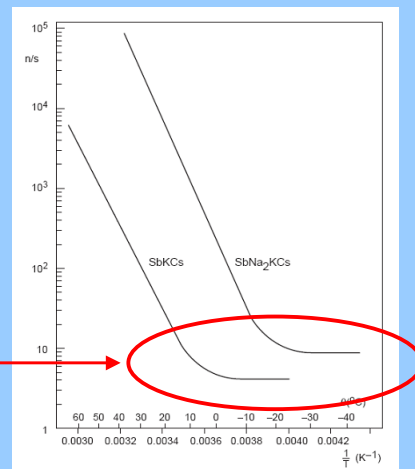
WS 2008/2009



Fotokatoda – prąd ciemny

prąd ciemny silnie zależy
od temperatury

wysoka czułość: możliwy
pomiar pojedynczych fotonów



WS 2008/2009

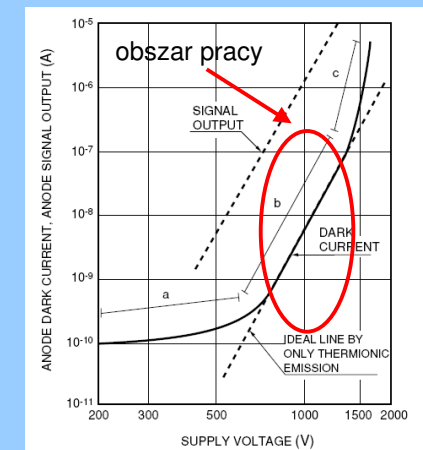


Prąd ciemny

źródła prądu ciemnego

-) termoemisja z katody i dynod
-) prądy płynące między anodą i dynodami czy też między pinami wychodzącymi z tuby
-) jonizacja cząstek gazu znajdujących się w tubie
-) promieniowanie izotopów znajdujących się w szkle

prąd ciemny zależy od
przyłożonego napięcia

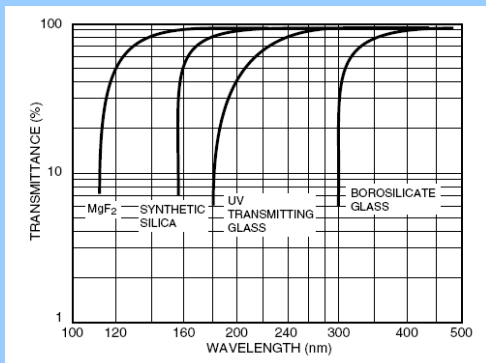


WS 2008/2009



Okno fotopowielacza

charakterystyka widmowa fotopowielacza zależy zarówno od materiału fotokatody jak i od okna fotopowielacza

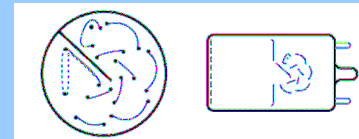


borosilicate glass – najbardziej powszechny

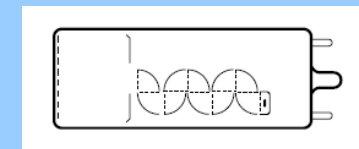


Obszar powielenia

wysoka czułość i dobre wartości stosunku sygnału do szumu uzyskiwane dla fotopowielaczy wynikają z niskoszumowego powielenia elektronu i generacji kaskady elektronowej



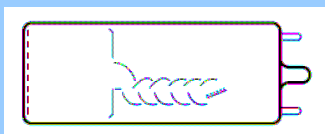
obwodowo-ogniskowany
circular-cage type
geometria side-on
zwarta konstrukcja
krótkie czasy odpowiedzi



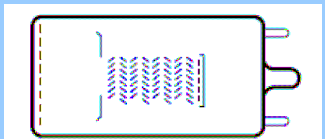
skrzynkowo-kratowy
box-and-grid type
geometria head-on
prosty układ dynod
wydłużony czasy odpowiedzi



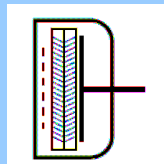
Obszar powielenia



liniowo-ogniskowany
linear-focused type
geometria head-on
bardzo krótki czas odpowiedzi
powszechna konstrukcja



żaluzjowy
Venetian blind type
duża powierzchnia dynod
wysoki prąd na anodzie
długi czas odpowiedzi



mikrokanalikowy (microchannel plate)
miliony małych niezależnych kanałków
odporność na pola magnetyczne
możliwość obrazowania
niezwykła szybkość

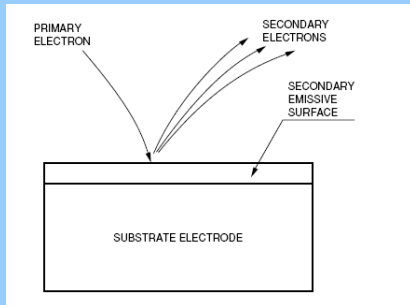


Porównanie

Typ dynody	Czas narastania [ns]	Liniiowość 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
Liniowo-ogniskowany	0,7-3	10-250	0,1	Słaba	Słaba	Duża szybkość, wysoka liniiowość
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



Obszar powielenia



liczba dynod: do 19

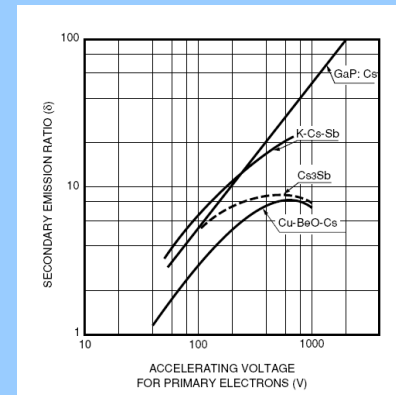
typowe materiały służące do emisji wtórnej elektronów:
 antymonki metali alkalicznych
 tlenek berylu (BeO)
 tlenek magnezu (MgO)
 fosforek arsenkowo-galowy (GaAsP)

materiały te są naniesione na elektrody wykonane z nierdzewnej stali, niklu lub stopów berylowo-miedziowych

WS 2008/2009



Obszar powielenia



powielenie na pojedynczej dynodzie:

od 10 do ponad 100

WS 2008/2009



Polaryzacja

zależność fotoprądu od polaryzacji

$$I_{\theta} = I_S \cos^2 \theta + I_P \sin^2 \theta = \frac{1}{2} (I_P + I_S) \left(1 - \frac{I_P - I_S}{I_P + I_S} \cdot \cos^2 \theta \right)$$

I_S fotoprąd wytworzony przez składnik światła prostopadły do fotokatody

I_P fotoprąd wytworzony przez składnik światła równoległy do fotokatody

wprowadzając

$$I_0 = \frac{I_P + I_S}{2}, \quad P = \frac{I_P - I_S}{I_P + I_S}$$

otrzymujemy

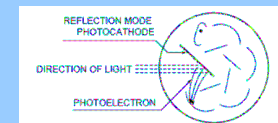
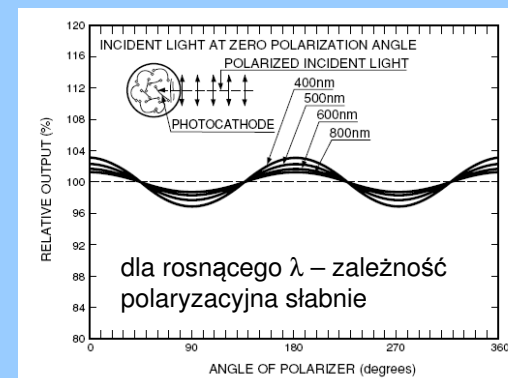
$$I_{\theta} = I_0 (1 - P \cdot \cos^2 \theta)$$

WS 2008/2009



Polaryzacja

side-on z fotokatodą odbiciową



fotokatoda odbiciowa
 silna zależność od polaryzacji padającego światła
 typowo $P < 10\%$
 dla katod GaAs $P \sim 20\%$

fotokatoda transparentna
 P praktycznie = 0
 (dla kierunku prostopadłego do fotokatody)

WS 2008/2009



Obudowa fotopowielacza

wra liwo na o wietlenie – w czenie wiat a w laboratorium przy pracuj cym fotopowielaczu oznacza wydatek kilku tyśi cy USD na nowe urz dzenie

wra liwo na pole magnetyczne - nawet pole magnetyczne Ziemi zak óca dzia anie fotopowielaczy

wra liwo na efekty elektrostatyczne – adunki w otoczeniu fotopowielacza wp ywaj na jego dzia anie – konieczne dobre uzimienie i izolacja

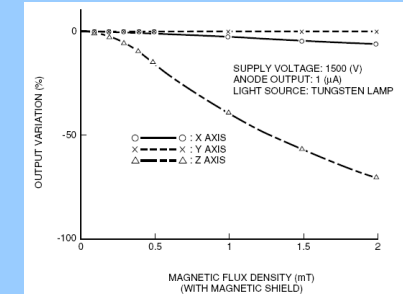
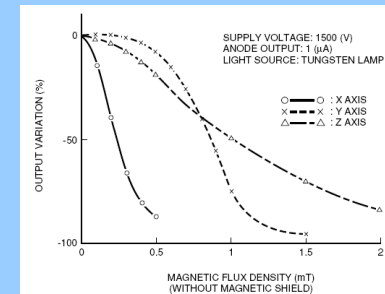
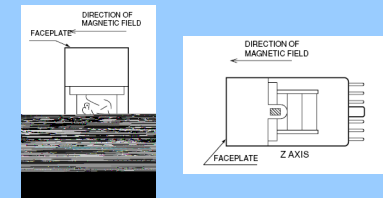
HOUSING czyli DOMEK

WS 2008/2009



Pole magnetyczne

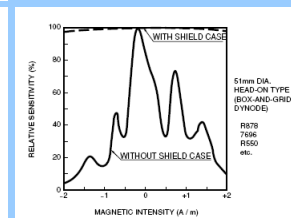
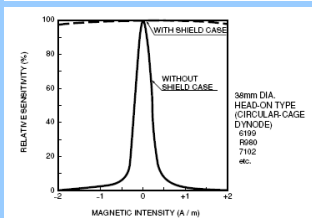
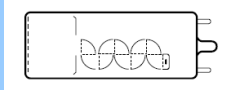
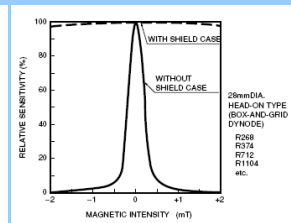
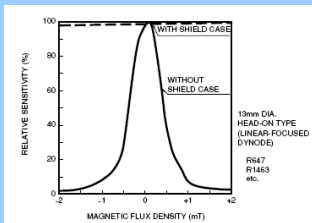
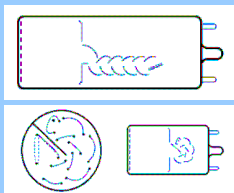
orientacja PMT wzgl dem pola magnetycznego



WS 2008/2009



Pole magnetyczne

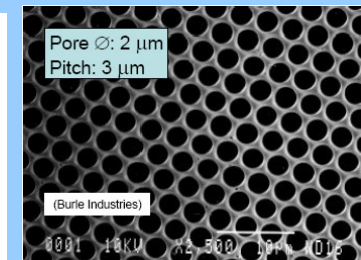
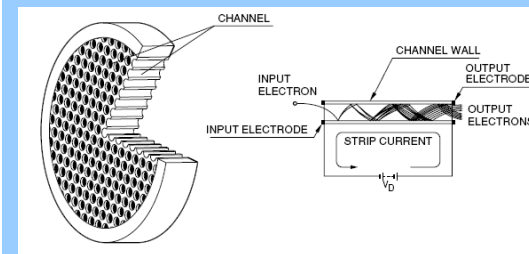


WS 2008/2009



MCP

detektor wielokana owy (multichannel plate, MCP) jest matryc dwuwymiarow z o on z wielu szklanych kapilar, równoleg ych wzgl dem siebie i tworz cych dysk w kanale dochodzi do niezale nego powielenia



typowe rozmiary kana ów: od kilku do dwudziestu mikrometrów

WS 2008/2009

MCP

zalety MCP:

-) krótkie czasy odpowiedzi
-) niska konsumpcja energii
-) niewrażliwość na pole magnetyczne
-) duże wzmocnienie, pomimo niewielkich rozmiarów
-) dwuwymiarowa detekcja z dobrą rozdzielczością przestrzenną
-) możliwa detekcja naładowanych cząstek, UV, X-ray, neutronów

zastosowania MCP:

-) wzmacniacze obrazu w pomiarach niewielkich natężeń
-) szybkie fotopowielacze z MCP (MCP-PMT)
-) wieloanodowe fotopowielacze
-) kamery smugowe
-) obrazowe zliczacze pojedynczych fotonów

WS 2008/2009

MCP-PMT

detektory wielokanałowe można łączyć, ale to powoduje wzrost szumów

WS 2008/2009

MCP-PMT

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

WS 2008/2009

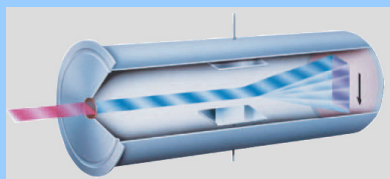
MCP-PMT

wpływ pola magnetycznego

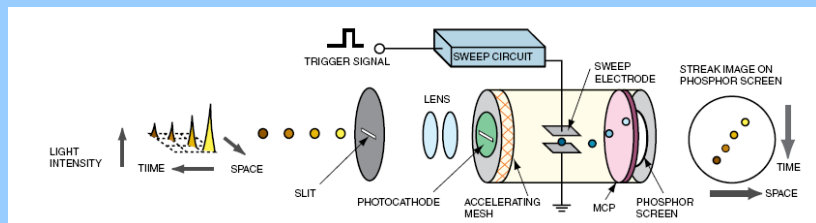
WS 2008/2009



Kamera smugowa



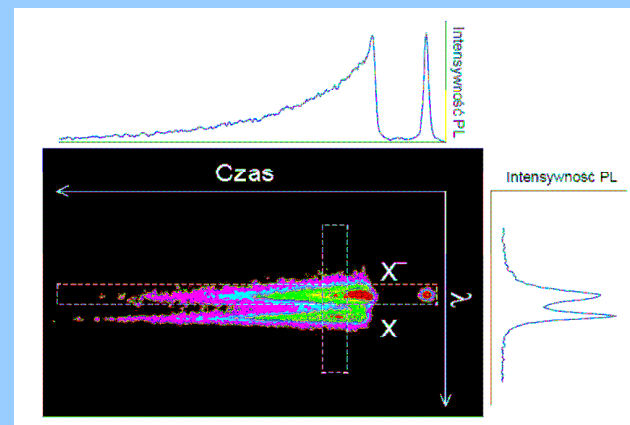
kamera smugowa jest szybkim detektorem pozwalającym na badanie dynamicznych charakterystyk emisji



WS 2008/2009



Kamera smugowa



WS 2008/2009