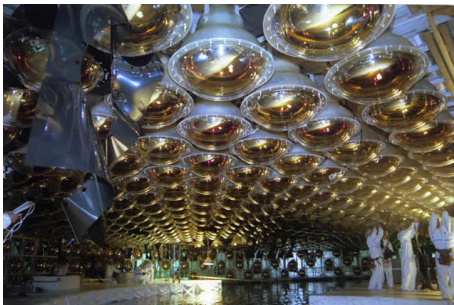


Detekce světla – Vnější fotoelektrický jev

Antonín Černoch Jan Soubusta Ondřej Haderka

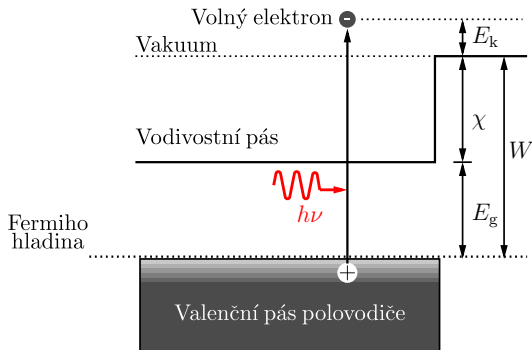
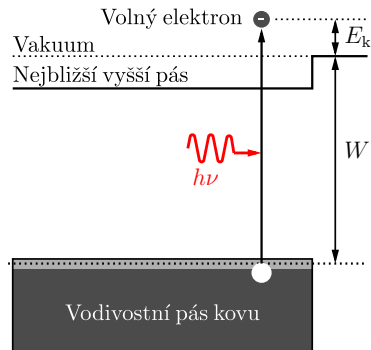
Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče
- 3 Výběr fotonásobiče
- 4 Vlastnosti fotonásobičů
- 5 Šum fotonásobiče
- 6 Konstrukce fotonásobičů

Fotoelektronová emise z kovu a z polovodiče



$$h\nu = W + E_k = E_g + \chi + E_k$$

W výstupní práce

E_k kinetická energie elektronu

E_g šířka zakázaného pásu

χ elektronová afinita

Fotonka

- fotokatoda – generace elektronů po ozáření světlem
- anoda – sběr elektronů



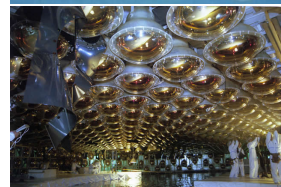
Fotonka

- fotokatoda – generace elektronů po ozáření světlem
- anoda – sběr elektronů



Fotonásobič

- fotokatoda + anoda a mezi nimi
- dynody – znásobení počtu elektronů



Fotonka

- fotokatoda – generace elektronů po ozáření světlem
- anoda – sběr elektronů



Fotonásobič

- fotokatoda + anoda a mezi nimi
- dynody – znásobení počtu elektronů



Vlastnosti

- dobrá citlivost a kvantová účinnost v UV a viditelné oblasti
- rychlý čas odezvy
- nízký šum



Vývoj fotokatody

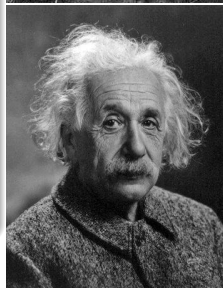
1887 Hertz, objev fotokatody

1905 Einstein, teoretický popis

1913 Elster a Geitel, první fotoelektrická trubice (fotonka)

1929 Koller a Campbell, fotokatoda z Ag-O-Cs, stokrát citlivější

- později
- bialkalické fotokatody pro VIS
 - multialkalické pro IČ
 - alkali-halidové pro UV
 - polovodičové s NEA



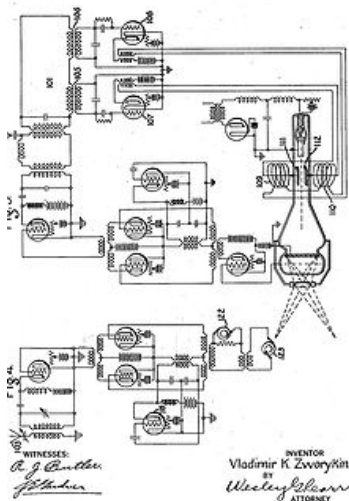
Vývoj fotonásobiče

Dec. 20, 1938.

V. K. ZWORYKIN
TELEVISION SYSTEM
Filed Dec. 29, 1935

2,141,059

3 Sheets-Sheet 3



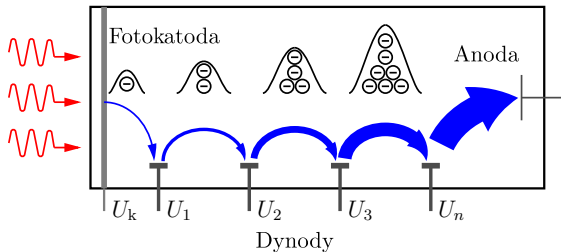
Fotonásobič

- 1902 Austin, povrch pro sekundární emisi
- 1935 Iams a kol., trioda (fotokatoda+dynoda) pro zesilovač zvuku filmu
- 1936 Zworykin a kol., další dynody, transport elektronů elektrickým a magnetickým polem
- 1939 Zworykin a Rajchman, elektrostatický fokuzací fotonásobič z Ag-O-Cs a později z Sb-Cs

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče**
 - Okénko
 - Fotokatoda
 - Dynody
 - Anoda a periferie
- 3 Výběr fotonásobiče
- 4 Vlastnosti fotonásobičů
- 5 Šum fotonásobiče

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

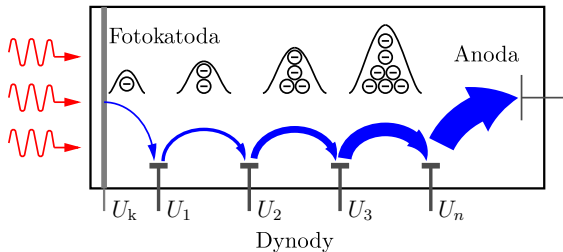
okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton $\rightarrow$ fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu $\rightarrow$ proudový impuls

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

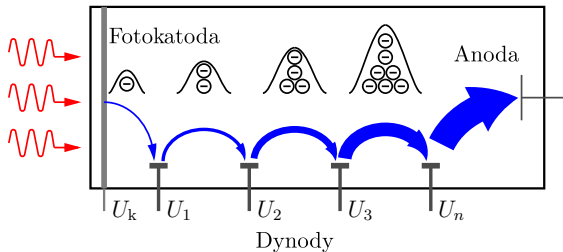
okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton $\rightarrow$ fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu $\rightarrow$ proudový impuls

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

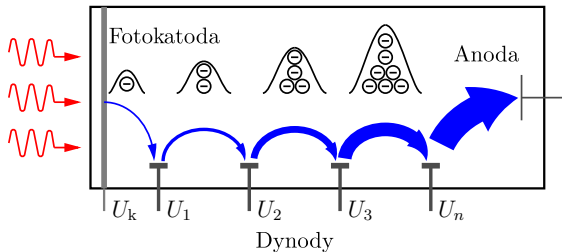
okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton $\rightarrow$ fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu $\rightarrow$ proudový impuls

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

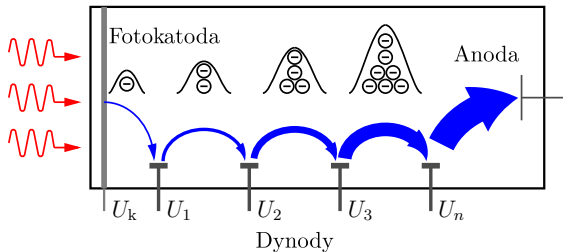
okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton $\rightarrow$ fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu $\rightarrow$ proudový impuls

Konstrukce fotonásobiče



kryt vakuum pro zamezení ztrát a možné ionizace

okénko propustnost pro různé složky spektra

fotokatoda účinnost konverze foton $\rightarrow$ fotoelektron

dynody sekundární emise elektronů

anoda sběr elektronu $\rightarrow$ proudový impuls

Okénko



- průhledná část krytu
- neprodyšný spoj, pokud je kryt z jiného materiálu
- dostatečná propustnost v detekované části spektra
- v UV oblasti speciální materiály

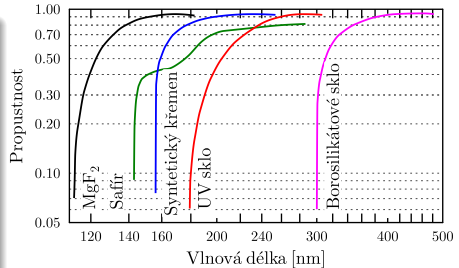
Materiál okénka

MgF₂ od 115 nm, není tolik hydrofilní

Safír (Al₂O₃) od 150 nm

Syntetický Si od 160 nm, menší absorpce než tavený Si, penetrace He₂

UV sklo od 185 nm



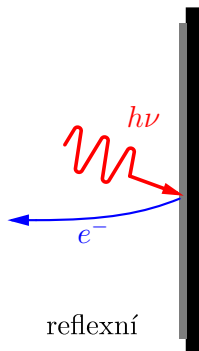
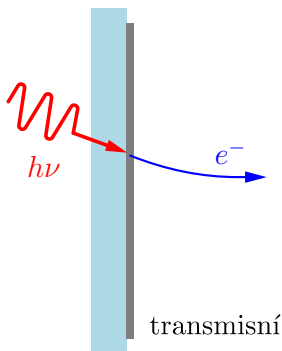
Borosilikátové (Kovarové) sklo od 300 nm, teplotní roztažnost blízká kovarovým slitinám (vodiče), málo ⁴⁰K (K-free), scintilační čítání

Fotokatoda

Dělení fotokatod podle směru elektronové emise

Transmisní *head on*, tenká vrstva aktivního materiálu na skleněné destičce

Reflexní *side on*, na kovovém substrátu



Kvantová účinnost fotokatody

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{v_e}{\alpha v_e + 1} p$$

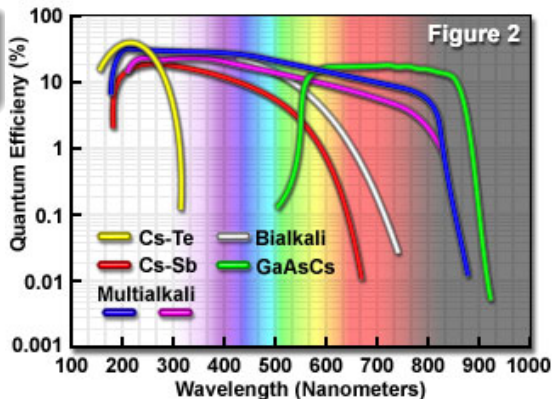
R intenzitní odrazivost materiálu

α absorpční koeficient

v_e střední úniková rychlost elektronů

p pravděpodobnost úniku elektronu do vákua

Photocathode Spectral Responses



Materiály fotokatod

CsI a CsTe od 200 resp. 300 nm, *solar blind*, s okénky z MgF_2 , syntetického Si nebo bez

Sb-Cs UV a VIS, pro větší intenzity, malý odpor, jen reflexní

Bialkalické Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs, UV a VIS, vysoká citlivost, malý temný proud

Vysokoteplotní bialkalické Sb-Na-K, UV a VIS, menší citlivost, pracovní teplota až 175°C (normal 50°C)

Multialkalické Sb-Na-K-Cs, od UV po 900 nm

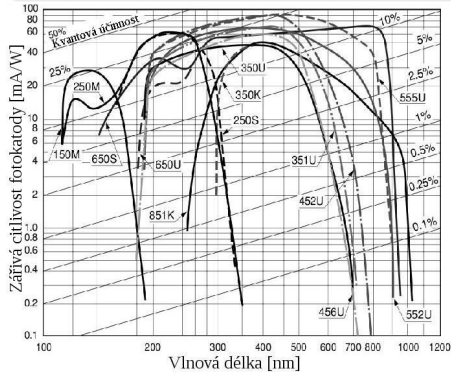
Ag-O-Cs od 300 po 1 200 nm transmisní, po 1 100 nm reflexní, malá citlivost ve VIS

GaAsP(Cs) transmisní ve VIS, velká citlivost, degraduje pro velké intenzity

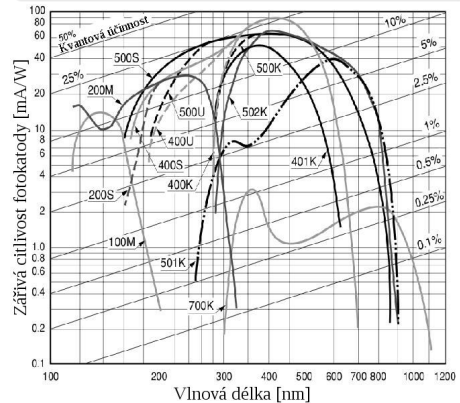
GaAs(Cs) transmisní od UV po 900 nm, plochá závislost citlivosti, degraduje pro velké intenzity

Zářivé citlivosti fotokatod

Reflexní fotokatoda

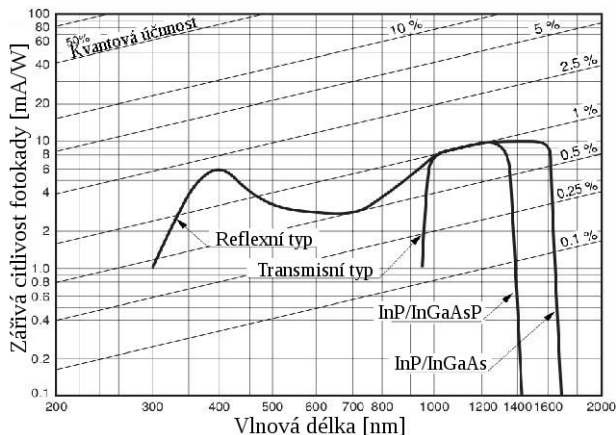


Transmisní fotokatoda



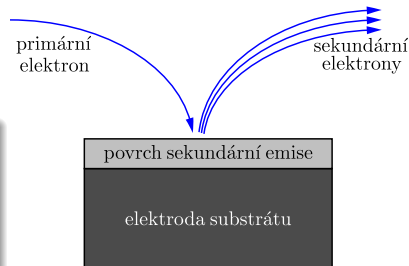
Infračervené fotokatody

InGaAs(Cs) posunutá do IČ, výborný SNR mezi 900 a 1 000 nm
 InP/InAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs) polovodičový p-n přechod, až do 1 700 nm, nutné chlazení až na -80°C kvůli šumu



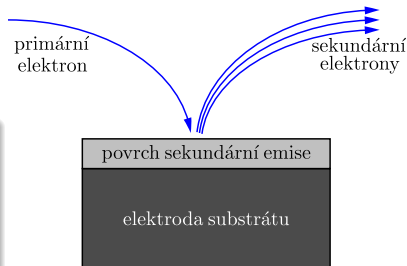
Dynody

- spojitá (MCP) × oddělené (1-19)
- stupňovité napětí 100-200 V
- zisk = poměr sekundární emise δ
- závisí na materiálu a napětí
- typicky $\delta \in (10 - 100)$
- zisk na n dynodách = δ^n
- materiály – alkalicko antimonové slitiny, BeO, MgO, GaP, GaAsP
- elektrody – Ni, ocel a CuBe slitiny



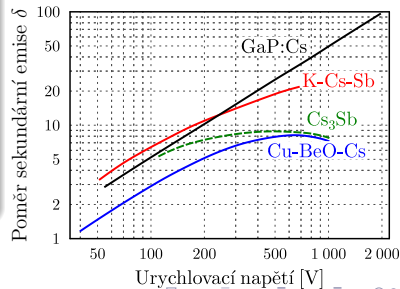
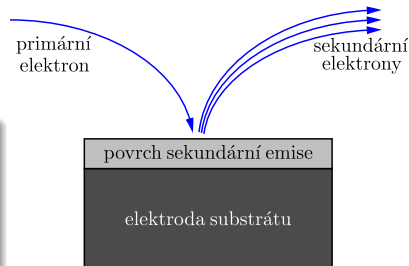
Dynody

- spojitá (MCP) × oddělené (1-19)
- stupňovité napětí 100-200 V
- zisk = poměr sekundární emise δ
- závisí na materiálu a napětí
- typicky $\delta \in (10 - 100)$
- zisk na n dynodách = δ^n
- materiály – alkalicko antimonové slitiny, BeO, MgO, GaP, GaAsP
- elektrody – Ni, ocel a CuBe slitiny



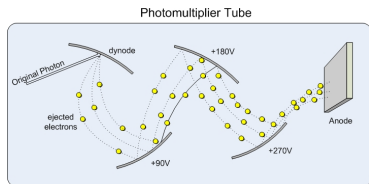
Dynody

- spojitá (MCP) $\times$ oddělené (1-19)
- stupňovité napětí 100-200 V
- zisk = poměr sekundární emise δ
- závisí na materiálu a napětí
- typicky $\delta \in (10 - 100)$
- zisk na n dynodách = δ^n
- materiály – alkalicko antimonové slitiny, BeO, MgO, GaP, GaAsP
- elektrody – Ni, ocel a CuBe slitiny



Trajektorie elektronů

- fokuzace elektronů na dynody
- minimální rozdíl časů průchodu elektronů
- zamezení zpětné vazby (iontová, světelná)
- optimalizováno numerickou analýzou



Sběrná účinnost δ_0

počet elektronů na první dynodě / emitovaných z fotokadody
hodnota mezi 60 až 90 %

Konstrukce

závisí na použití
kruhová, komůrková, lineární fokuzovaný typ a jiné viz dále

Anoda

- tvar tyče, desky nebo sítě
- optimalizace napětí pro omezení prostorového náboje a maximalizaci zisku

Anoda

- tvar tyče, desky nebo sítě
- optimalizace napětí pro omezení prostorového náboje a maximalizaci zisku

Periferie (elektronika a kryt)

- stabilizovaný zdroj vysokého napětí $1\text{-}2\text{ kV} \pm 0.1\%$
- obvody rozdělující napětí na dynody, anodu a směrovací elektrody
- kryt stíní elektrické a magnetické pole, nechtěné světlo
- změna charakteristik fotonásobiče podle vnějších vlivů (teplota, vlhkost, mechanické napětí, elemag. pole)



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče
- 3 Výběr fotonásobiče**
- 4 Vlastnosti fotonásobičů
- 5 Šum fotonásobiče
- 6 Konstrukce fotonásobičů

Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení



Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení



Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení



Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení



Výběr fotonásobiče podle vlastností světla

Vlnová délka materiál okénka, maximum citlivosti fotokatody

Intenzita počet dynod a napětí mezi nimi, analogové nebo digitální zpracování signálu

Rozměr svazku velikost okénka a efektivní průměr fotokatody, transmisní nebo reflexní fotokatoda

Rychlost dějů rychlost odezvy fotonásobiče rychlejší než změna intenzity signálu, šířka pásma elektroniky

Pracovní teplota materiál fotokatody popř. dodat chlazení

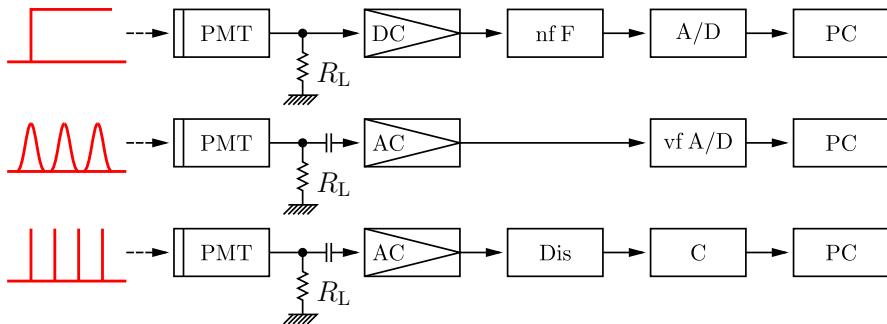


Režim činnosti

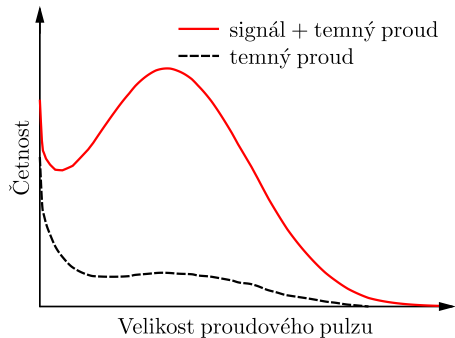
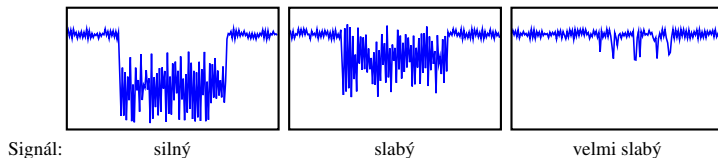
DC kontinuální, pomalá změna intenzity signálu

AC pulzní, rychlé změny intenzity signálu

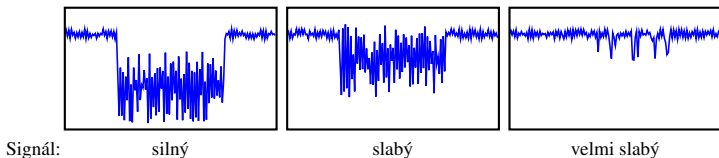
PC čítání fotonů, binární odezva, nastavení diskriminátoru



Fotonové čítání

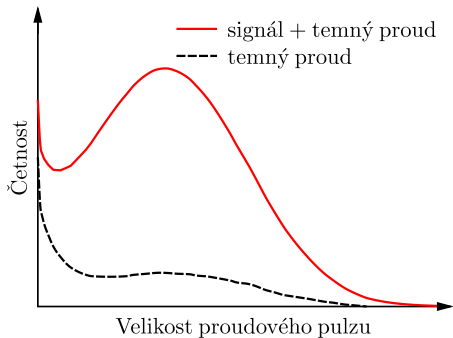


Fotonové čítání



$$\text{SNR} = \frac{n_s^2}{2n_s + 4n_d}$$

- n_s – signální detekce
- n_d – detekce pozadí, nezávisí na šumovém faktoru
- temný šum a šum zesilovače ořezán diskriminátorem
- výkyvy napětí na dynodách ani zesílení nemá vliv na funkci



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče
- 3 Výběr fotonásobiče
- 4 Vlastnosti fotonásobičů**
- 5 Šum fotonásobiče
- 6 Konstrukce fotonásobičů

Zářivá citlivost

$$\mathcal{R}(\lambda) = I_f / \Phi_r \text{ [A/W]}$$

I_f fotoproud

Φ_r vstupní zářivý tok

Zářivá citlivost

$$\mathcal{R}(\lambda) = I_f / \Phi_r \text{ [A/W]}$$

I_f fotoproud

Φ_r vstupní zářivý tok

Kvantová účinnost

$$\eta(\lambda) = \frac{hc}{\lambda e} \mathcal{R}(\lambda) \approx \frac{1240}{\lambda[\mu\text{m}]} \mathcal{R}(\lambda)$$

- porovnání s kalibrovanou fotodiodou nebo fotonásobičem

Zářivá citlivost

$$\mathcal{R}(\lambda) = I_f / \Phi_r \text{ [A/W]}$$

I_f fotoproud

Φ_r vstupní zářivý tok

Kvantová účinnost

$$\eta(\lambda) = \frac{hc}{\lambda e} \mathcal{R}(\lambda) \approx \frac{1240}{\lambda[\mu\text{m}]} \mathcal{R}(\lambda)$$

- porovnání s kalibrovanou fotodiodou nebo fotonásobičem

Rozsah spektrální odezvy

- krátkovlnný limit – materiál okénka
- dlouhovlnný limit – materiál fotokatody
 - pokles na 1 % z maxima pro bialkalické a Ag-O-Cs
 - pokles na 0.1 % z maxima pro multialkalické

Světelná odezva

- závislost výstupního proudu na svítivém toku (v lumenech) z wolframové lampy teploty 2 856 K
- katodová a anodová (vlastnosti po multiplikaci)

Světelná odezva

- závislost výstupního proudu na svítivém toku (v lumenech) z wolframové lampy teploty 2856 K
- katodová a anodová (vlastnosti po multiplikaci)

Zisk

- sběrná účinnost δ_0
- dynodový zisk $\delta = k \cdot U$
(poměr sekundární emise)

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad \dots \quad \delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}}$$

- celkový zisk $G = \delta_0 \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n$

$$\delta_i = \delta_j \quad \rightarrow \quad G = \delta_0 (kU)^n$$

→ velká citlivost na změnu napětí

Světelná odezva

- závislost výstupního proudu na svítivém toku (v lumenech) z wolframové lampy teploty 2 856 K
- katodová a anodová (vlastnosti po multiplikaci)

Zisk

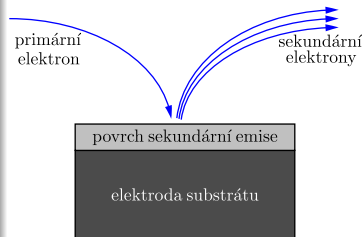
- sběrná účinnost δ_0
- dynodový zisk $\delta = k \cdot U$
(poměr sekundární emise)

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad \dots \quad \delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}}$$

- celkový zisk $G = \delta_0 \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n$

$$\delta_i = \delta_j \quad \rightarrow \quad G = \delta_0 (kU)^n$$

→ velká citlivost na změnu napětí



Světelná odezva

- závislost výstupního proudu na svítivém toku (v lumenech) z wolframové lampy teploty 2 856 K
- katodová a anodová (vlastnosti po multiplikaci)

Zisk

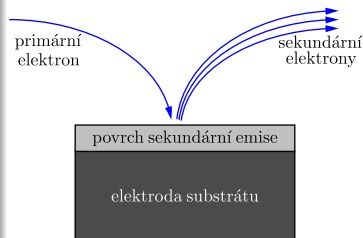
- sběrná účinnost δ_0
- dynodový zisk $\delta = k \cdot U$
(poměr sekundární emise)

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \quad \dots \quad \delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}}$$

- celkový zisk $G = \delta_0 \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n$

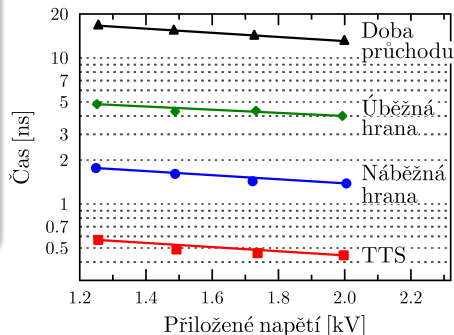
$$\delta_i = \delta_j \quad \rightarrow \quad G = \delta_0 (kU)^n$$

→ **velká citlivost na změnu napětí**



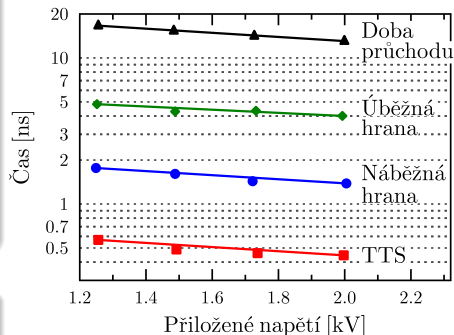
Časová odezva

- zpoždění způsobené prvky od katody po anodu
- $TTS \sim U^{-2}$
- minimální pro lineární fokuzovaný typ a kovové kanálky



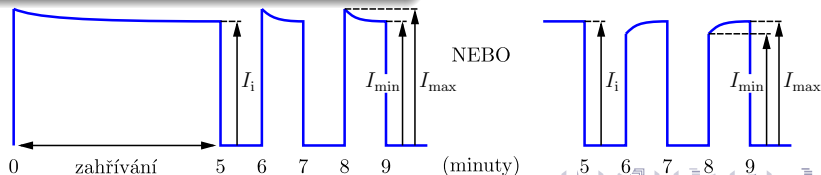
Časová odezva

- zpoždění způsobené prvky od katody po anodu
- $TTS \sim U^{-2}$
- minimální pro lineární fokuzovaný typ a kovové kanálky



Hystereze

závislost výstupního proudu na předchozí hodnotě



Linearita

- horní mez intenzity pro katodu 0.1 až 10 μA , pro anodu 10 mA
- AC – limituje efekt prostorového náboje
- DC – limitují obvody napěťového zesilovače
- lepší u reflexních fotokatod – malý odpor substrátu
- roste s napětím a počtem dynod

Linearita

- horní mez intenzity pro katodu 0.1 až 10 μA , pro anodu 10 mA
- AC – limituje efekt prostorového náboje
- DC – limitují obvody napěťového zesilovače
- lepší u reflexních fotokatod – malý odpor substrátu
- roste s napětím a počtem dynod

Uniformita

změna vlastností fotonásobiče na poloze a úhlu dopadu fotonů

Linearita

- horní mez intenzity pro katodu 0.1 až 10 μA , pro anodu 10 mA
- AC – limituje efekt prostorového náboje
- DC – limitují obvody napěťového zesilovače
- lepší u reflexních fotokatod – malý odpor substrátu
- roste s napětím a počtem dynod

Uniformita

změna vlastností fotonásobiče na poloze a úhlu dopadu fotonů

Stabilita

změna vlastností v čase, krátkodobě drift (zahřívání) 30 až 60 minut, dlouhodobě životnost fotokatody 10^3 až 10^4 hodin

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče
- 3 Výběr fotonásobiče
- 4 Vlastnosti fotonásobičů
- 5 Šum fotonásobiče**
- 6 Konstrukce fotonásobičů

Temný proud (temný šum)

- anodový proud se zakrytým detektorem

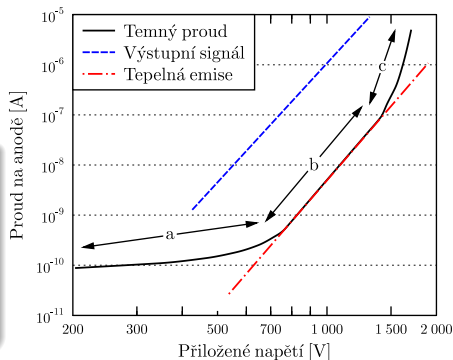
Zdroje

a proniklý proud z dynod na anodu nebo patici (špatná izolace)

b tepelná emise fotokatody a

$$\text{dynod} \sim T^{4/5} e^{\frac{-eW}{k_B T}}$$

c scintilace na skle a držácích elektrod, elektrony vytržené polem ostatní ionizace na zbylém plynu (vakuum 10^{-6} až 10^{-5} Pa), kosmické záření (Čerenkovovo záření z mionů), radioizotopy obsažené ve skle (betazáření z ^{40}K)

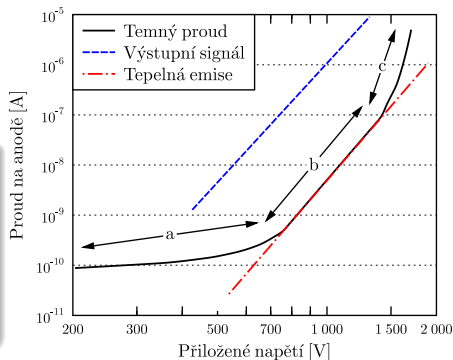


Temný proud (temný šum)

- anodový proud se zakrytým detektorem

Zdroje

- a proniklý proud z dynod na anodu nebo patici (špatná izolace)
- b tepelná emise fotokatody a dynod $\sim T^{4/5} e^{\frac{-eW}{k_B T}}$



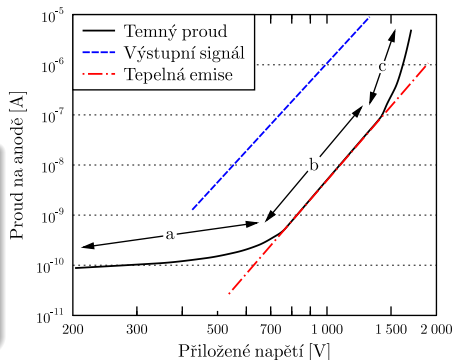
c scintilace na skle a držácích elektrod, elektrony vytržené polem ostatní ionizace na zbylém plynu (vakuum 10^{-6} až 10^{-5} Pa), kosmické záření (Čerenkovovo záření z mionů), radioizotopy obsažené ve skle (betazáření z ^{40}K)

Temný proud (temný šum)

- anodový proud se zakrytým detektorem

Zdroje

- a proniklý proud z dynod na anodu nebo patici (špatná izolace)
- b tepelná emise fotokatody a dynod $\sim T^{4/5} e^{\frac{-eW}{k_B T}}$



- c scintilace na skle a držácích elektrod, elektrony vytržené polem ostatní ionizace na zbylém plynu (vakuum 10^{-6} až 10^{-5} Pa), kosmické záření (Čerenkovovo záření z mionů), radioizotopy obsažené ve skle (betazáření z ^{40}K)

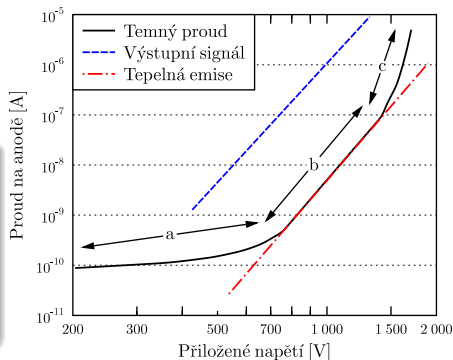
Temný proud (temný šum)

- anodový proud se zakrytým detektorem

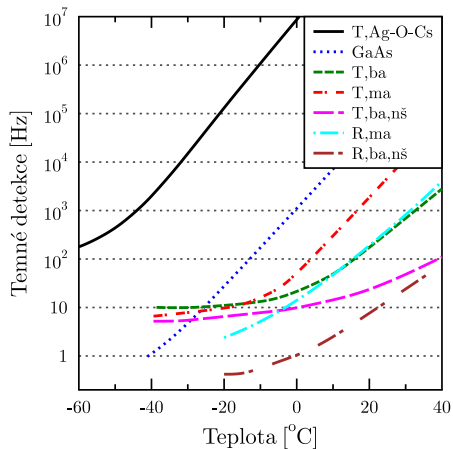
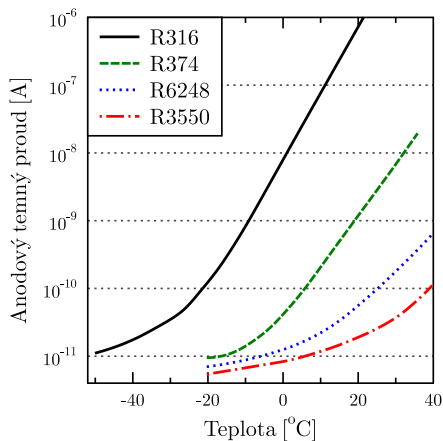
Zdroje

- a proniklý proud z dynod na anodu nebo patici (špatná izolace)
- b tepelná emise fotokatody a dynod $\sim T^{4/5} e^{\frac{-eW}{k_B T}}$

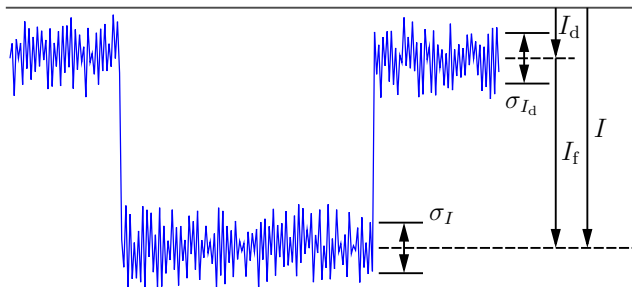
- c scintilace na skle a držácích elektrod, elektrony vytržené polem
- ostatní ionizace na zbylém plynu (vakuum 10^{-6} až 10^{-5} Pa), kosmické záření (Čerenkovovo záření z mionů), radioizotopy obsažené ve skle (betazáření z ^{40}K)



Závislost temného proudu a detekcí na teplotě



Poměr signálu k šumu SNR

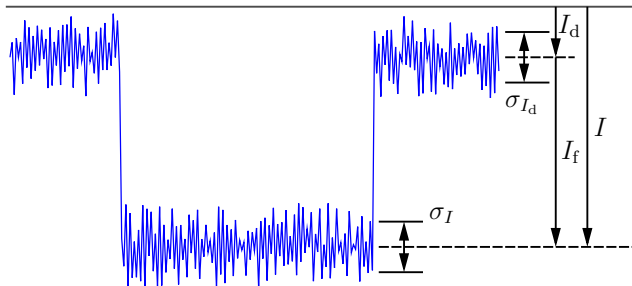


$$\text{SNR} = \frac{I_f^2}{\sigma_I^2} = \frac{(I - I_d)^2}{\sigma_I^2}$$

I_f střední fotoproud

I_d temný proud

Poměr signálu k šumu SNR



$$\text{SNR} = \frac{I_f^2}{\sigma_I^2} = \frac{(I - I_d)^2}{\sigma_I^2}$$

I_f střední fotoproud

I_d temný proud

$$\text{SNR} = \frac{I_k^2}{2eB \frac{\delta}{\delta-1} (I_k + 2I_d) + \sigma_r^2}$$

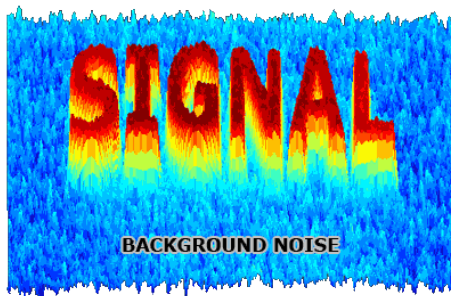
B šířka pásma

δ dynodový zisk

σ_r^2 zesilovacího obvodu

Zlepšení SNR

- maximální zachycení světla
- maximální η resp. $\mathcal{R}$ fotokatody na dané λ
- optimalizace přenosu elektronů skrz dynody
- optimalizace zachycení elektronů na anodě
- vybrat nejvhodnější elektrické zapojení pro danou sílu signálu



Afterpulsing – pravděpodobnost následného pulzu

rychlé $1 \div 100 \text{ ns}$

- důsledek elastických odrazů na první dynodě
- lze eliminovat speciální elektrodou
- fotonového čítání – elektronika je nestihne zaznamenat

pomalé $100 \text{ ns} \div 1 \mu\text{s}$

- důsledek zpětné iontové vazby (penetrující He^+)
- rostou s napětím

Afterpulsing – pravděpodobnost následného pulzu

rychlé $1 \div 100 \text{ ns}$

- důsledek elastických odrazů na první dynodě
- lze eliminovat speciální elektrodou
- fotonového čítání – elektronika je nestihne zaznamenat

pomalé $100 \text{ ns} \div 1 \mu\text{s}$

- důsledek zpětné iontové vazby (penetrující He^+)
- rostou s napětím

Afterpulsing – pravděpodobnost následného pulzu

rychlé $1 \div 100 \text{ ns}$

- důsledek elastických odrazů na první dynodě
- lze eliminovat speciální elektrodou
- fotonového čítání – elektronika je nestihne zaznamenat

pomalé $100 \text{ ns} \div 1 \mu\text{s}$

- důsledek zpětné iontové vazby (penetrující He^+)
- rostou s napětím

Závislost na polarizaci

ztráty na rozhraních okénka a fotokatody podle úhlu dopadu a typu polarizace (Fresnelovy vztahy)

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Součásti fotonásobiče
- 3 Výběr fotonásobiče
- 4 Vlastnosti fotonásobičů
- 5 Šum fotonásobiče
- 6 Konstrukce fotonásobičů**

Kruhový typ

Circular-cage

- kompaktní
- reflexní i transmisní
- velmi rychlá odezva (do 1 ns)
- lineární odezva od 1 do 10 mA
- horší uniformita
- dobrá kolekční účinnost

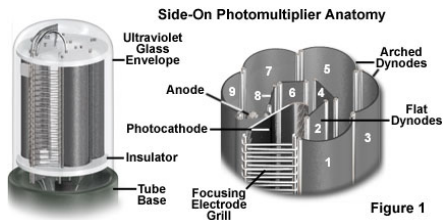
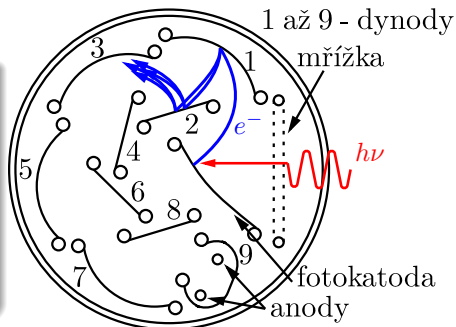
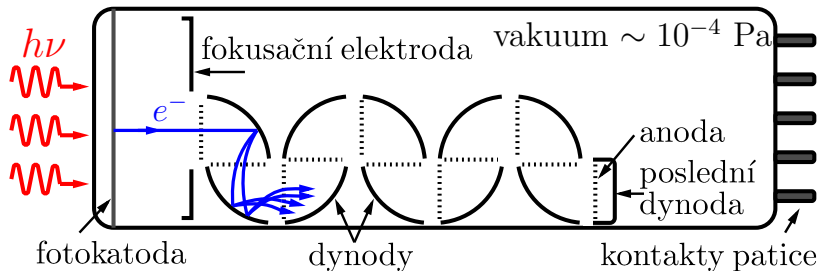


Figure 1

Komůrkkový typ

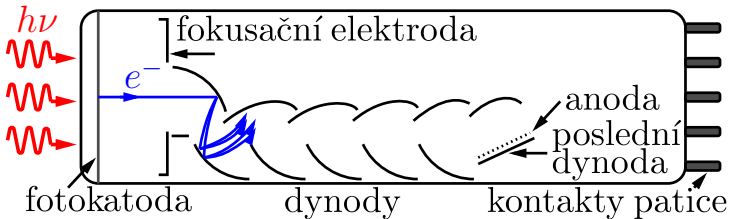
Box&grid



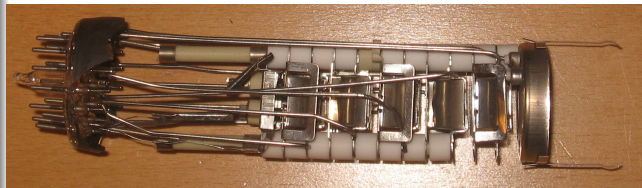
- jen transmisní
- výborná sběrná účinnost elektronů
- odezva do 20 ns
- lineární odezva od 1 do 10 mA
- dobrá uniformita



Lineární fokuzovaný typ

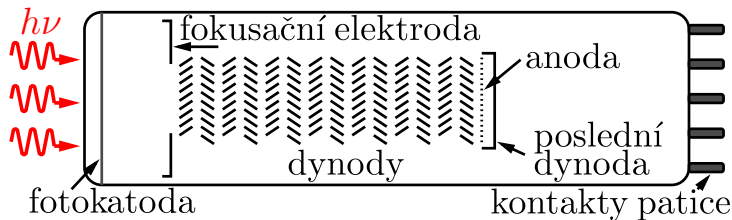
Linear-focused

- jen transmisní
- odezva do 3 ns
- lineární odezva od 10 do 250 mA
- dobré časové rozlišení

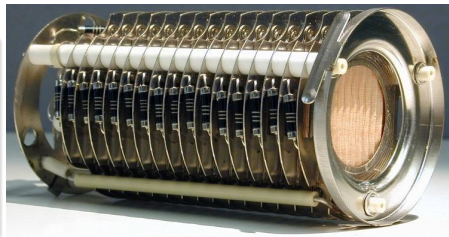


Žaluziový typ

Venetian blind

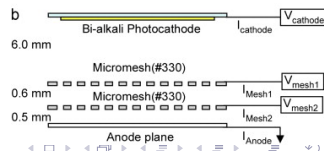
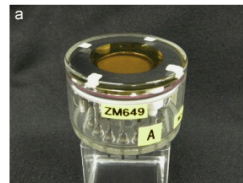
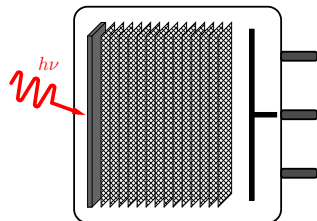
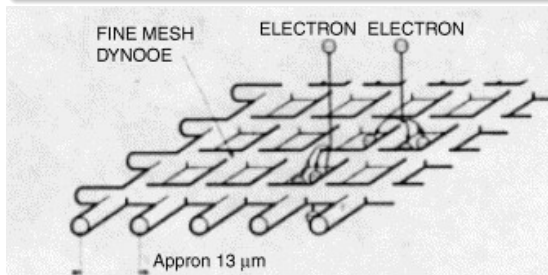


- jen transmisní
- velký průměr fotokatody
- odezva do 18 ns
- linearita od 10 do 40 mA
- dobrá uniformita



Síťový typ *Mesh*

- dobrá linearita (300-1 000 mA)
- necitlivý na magnetické pole
- s multianodou určení místa dopadu
- odezva do 6 ns
- dobrá uniformita
- horší kolekční účinnost

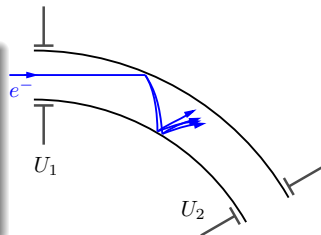


MCP

Microchannel plate

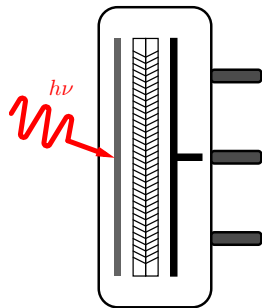
Mikrokanálek

- trubička s vnitřním $\varnothing$ 5 až 45 μm a délkou cca 40x větší
- napětí spojitě podél kanálku
- vyšší šum (o 5 řádů oproti dynodám)



Mikrokanálková destička

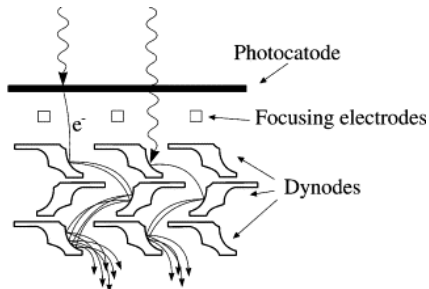
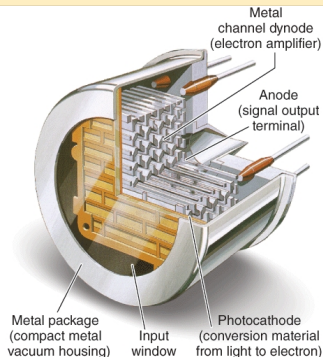
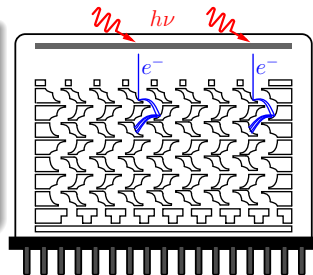
- svazek mikrokanálků až do $\varnothing 10\text{ cm}$
- výborné časové rozlišení
- stabilní zisk (10^4 až 10^6) v mag. poli
- s multianodou určení místa dopadu
- použití v intenzifikátorech obrazu



Kovové kanálky

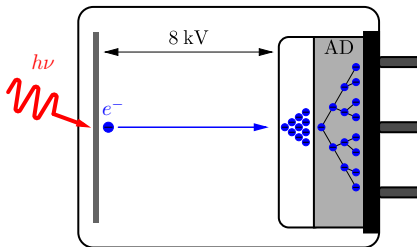
Metal channel

- výborné časové rozlišení do 1.5 ns
- stabilní zisk v magnetickém poli
- s multianodou určení místa dopadu
- linearita do 30 mA
- dobrá uniformita a kolekční účinnost



Elektronové bombardování *Electron bombardment*

- urychlení e^- vysokým napětím
- po dopadu na polovodič excitace spršky elektronů $\rightarrow$ další zesílení
- velký zisk s malým šumem
- výborná uniformita a kolekční účinnost
- možnost rozlišení počtu fotoelektronů



Porovnání konstrukcí fotonásobičů

Typ konstrukce	Náběžná hrana [ns]	Linearita [mA]	Imunita mag. pole [mT]	Uniformita	Sběrná účinnost	Klady
Kruhový	0.9-0.3	1-10	0.1	slabá	dobrá	kompaktní, rychlý
Komůrkový	6-20	1-10	0.1	dobrá	výborná	velká kolekční účinnost
Lin. fok.	0.7-3	10-250	0.1	slabá	dobrá	rychlý, vysoká linearita
Žaluziový	6-18	10-40	0.1	dobrá	dobrá	velký průměr
Síťový	1.5-5.5	300-1 000	500-1 500	dobrá	slabá	vysoká linearita
MCP	0.1-0.3	700	1 500	dobrá	dobrá	rychlý
Kovové kan.	0.65-1.5	30	5	dobrá	dobrá	kompaktní, rychlý
Elek. bomb.	závisí na polovodiči	-	-	výborná	výborná	vysoké elek. rozlišení

