

# Fotonásobiče (2)

Ing. Miroslav Jedlička, CSc.,  
Česká a Slovenská společnost pro fotoniku

(pokračování z č. 6/2009)

## 4. Vlastnosti fotonásobičů

### 4.1 Citlivost

Celková citlivost fotoelektrického násobiče je součin citlivosti fotokatody a zesílení násobiče

$$G_n = GM \text{ (A/lm)} \quad (2)$$

kde

$G_n$  je celková (někdy také anodová) citlivost fotoelektrického násobiče,  
 $G$  integrální citlivost fotokatody.

S údajem o celkové citlivosti fotonásobiče je vždy nutné uvádět teplotu chromatičnosti měřící žárovky a velikost napájecího napětí fotonásobiče. Při obvyklých hodnotách těchto údajů bývá celková citlivost běžných fotoelektrických násobičů v řádu 10 až 100 A/lm. Je ovšem třeba poznamenat, že největší možné výstupní proudy jsou jen několik stovek miliampérů, a i ty již s rizikem dosti značné únavy systému (změna citlivosti, zpravidla její snížení, což je však reverzibilní jev, a po jisté době „odpočinku“ nastává návrat do původního stavu). Většími proudy lze fotoelektrické násobiče zatížit jen krátkodobě. Při trvalém přetížení nastává velká únava nebo i trvalé poškození posledních dynod a dochází také ke změnám elektronově-optických podmínek na posledních stupních vlivem vzniku prostorového náboje.

Celkové zesílení fotonásobiče  $M$  je značně závislé na velikosti napájecího napětí, které musí být velmi stálé, nemá-li výstupní signál kolísat. Elektrody fotonásobiče se obvykle napájejí z odporového děliče. Na třech posledních stupních bývají rezistory přemostěny kondenzátory, což má význam především v případě impulzního provozu. Je žádoucí, aby proud, který protéká děličem, byl nejméně pětinásobkem středního výstupního proudu

Integrální citlivost fotokatody  $G$  je velikost fotoelektrického proudu vyvolaného jednotkovým světelným nebo zářivým tokem. Její rozměr je tedy buď A/lm nebo A/W.

Nejdůležitější vlastností fotokatody je závislost její citlivosti na vlnové délce dopadajícího záření, která se nazývá spektrální charakteristika. Dopadá-li na fotokatodu zářivý tok  $d\Phi_e$  monochromatický v intervalu  $\lambda$  a  $\lambda+d\lambda$ , vznikne fotoelektrický proud  $di$ . Spektrální citlivost fotokatody je poměr

$$s(\lambda) = di/d\Phi_e \text{ (A/W; A, W)} \quad (3)$$

Spektrální citlivost se nejčastěji uvádí v jednotkách A/W nebo *elektron/foton*. Při použití jednotek *elektron/foton* spektrální charakteristika udává spektrální průběh kvantového výtěžku, tj. počtu emitovaných elektronů na dopadající foton, popř. kvantovou účinnost, vyjadřující tuto okolnost v procentech. Dlouhovlnná hranice spektrální charakteristiky, tzv. dlouhovlnná mez  $\lambda_0$ , určuje mezní vlnovou délku záření, při níž fotoelektrická emise právě přestává. Dlouhovlnnou mez nelze přesně určit, proto se dohodou často za ni považuje 1% maximální spektrální citlivosti. V praxi se často používá veličina zvaná relativní spektrální citlivost. Relativní spektrální citlivost se uvádí v procentech a je vztažena k maximální hodnotě spektrální citlivosti. Spektrální charakteristika fotokatody závisí nejen na vlastnostech vlastní fotokatody, ale také na spektrální závislosti propustnosti její skleněné podložky, kterou záření před dopadem do fotokatody musí procházet. Příklady nejčastějších spektrálních cha-

arakteristik jsou na obr. 4 a obr. 5. Bližší souvislost mezi integrální a spektrální citlivostí je uvedena v příložené vysvětlivce.

### 4.2 Proud za tmy

Důležitým činitelem pro posouzení jakosti fotonásobiče je proud za tmy, tj. výstupní proud, který protéká fotonásobičem při neosvětlené fotokatodě. Proud za tmy se skládá z několika složek. Jednu z nich tvoří termoelektrická emise fotokatody a dynod, která nastává i při normální teplotě. Další příčinou může být emise elektronů vyvolaná silným elektrickým polem, která se objevuje u ostrých hran elektrod. V proudu za tmy se uplatňují také svodové proudy mezi elektrodami, na vnitřní stěně baňky a mezi vývody v patce elektronky. V elektronce se rovněž mohou objevit elektrony, které z určité příčiny nesledují obvyklé dráhy. Pocházejí-li z prvních stupňů, mohou být posledními dynodami urychleny na takovou energii, že při dopadu na skleněnou

### Integrální citlivost fotokatody

Dopadá-li na fotokatodu zářivý tok, vzniklý zahřátím tělesa na teplotu  $T$  a daný vztahem

$$\Phi_e = aS \int_0^{\infty} I_s(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{W; m}^2, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}) \quad (1)$$

kde

$a$  je součinitel určující část celkového toku zdroje, která dopadá na fotokatodu,

$S$  plocha vyzářujícího povrchu,

$I_s$  spektrální intenzita vyzářování,

$\lambda$  vlnová délka záření,

vzniká fotoelektrický proud  $i$ , pro jehož nasycenou hodnotu bude platit

$$i = aS \int_0^{\infty} I_s(\lambda, T) s(\lambda) d\lambda \quad (\text{A; m}^2, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{A} \cdot \text{W}^{-1}, \text{m}) \quad (2)$$

Poměr

$$G_e = i / \Phi_e = aS \int_0^{\infty} I_s(\lambda, T) s(\lambda) d\lambda / aS \int_0^{\infty} I_s(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{A} \cdot \text{W}^{-1}; \text{A, W}) \quad (3)$$

se jmenuje integrální citlivost fotokatody. Pro potřeby praxe se však integrální citlivost nejčastěji vyjadřuje v jednotkách  $\mu\text{A/lm}$ . Protože lumen je jednotka subjektivní, vztažená k citlivosti průměrného lidského oka, je třeba uvažovat pouze tu část zářivého toku dopadajícího na fotokatodu, na kterou oko reaguje, a to v souladu s křivkou spektrální citlivosti oka pro fotopické vidění. Výraz (1) pak přejde na

$$\Phi = aK_m S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_e(\lambda, T) V_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (\text{lm; lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{m}^2, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}) \quad (4)$$

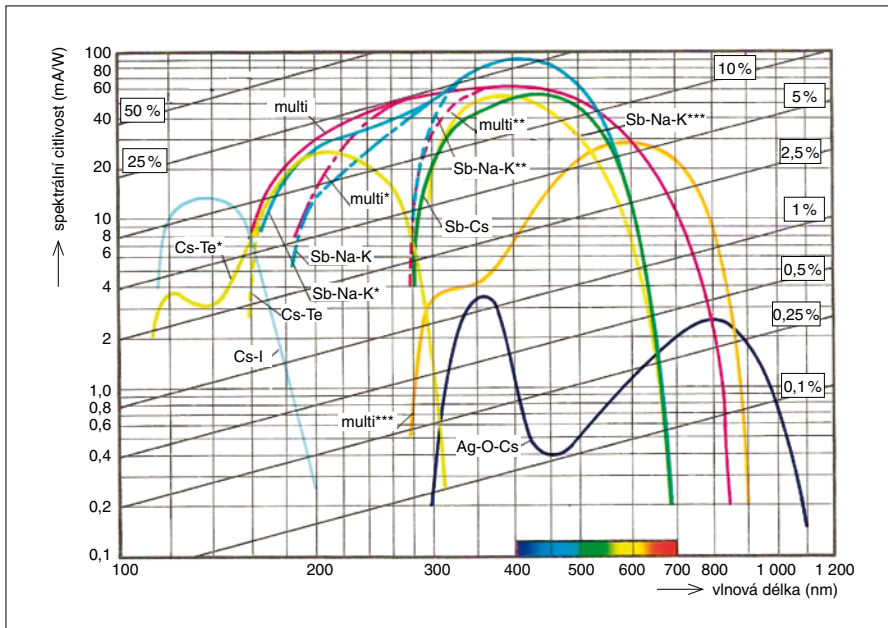
kde

$K_m$  je maximální světelná účinnost záření (683 lm/W),

$V_\lambda$  poměrná světelná účinnost jednobarevného záření.

Integrální citlivost fotokatody v jednotkách A/lm je tedy analogicky podle vztahu (3)

$$G = i / \Phi = \int_0^{\infty} I_s s d\lambda / K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_e V_\lambda d\lambda \quad (\text{A/lm; A, lm}) \quad (5)$$



Obr. 4. Vybrané spektrální charakteristiky některých klasických fotokatod Fotokatoda Cs-I na podložce (čelní destičce) MgF<sub>2</sub>, Cs-Te na křemenném skle, Cs-Te\* na MgF<sub>2</sub>, Sb-Cs na borosilikátovém skle, bialkalická fotokatoda Sb-Ns-K na UV skle, Sb-Na-K\* na syntetickém křemenném skle, Sb-Na-K\*\* na borosilikátovém skle, Sb-Na-K\*\*\* na borosilikátovém skle pro provoz při teplotách až 175 °C, multi – multialkalická fotokatoda Sb-Na-K-Cs na syntetickém křemenném skle, multi\* na UV skle, multi\*\* na borosilikátovém skle, multi\*\*\* s citlivostí pro blízké infračervené záření, Ag-O-Cs – na borosilikátovém skle; čáry označené procenty udávají velikost kvantové účinnosti

stěnu nebo poslední stupně vyvolávají luminescenci. Dopadne-li luminescenční záření na fotokatodu, vzniká fotoelektrická emise, která se dále zesílí a zvětší velikost proudu za tmy. Při pokojové teplotě bývá proud za tmy v řádu 10<sup>-15</sup> A a s každými přibývajícými 10 °C se zdvojnásobuje. Proud za tmy lze podstatně zmenšit provozem fotonásobiče v chlazeném prostředí. O dalších faktorech ovlivňujících proud za tmy pojednává např. [2].

### 4.3 Odstup signálu od šumu

Při velmi nízkých hladinách osvětlení je využívání fotonásobičů omezeno poměrem signálu k šumu. Pro určení jakosti fotonásobiče se často používá tzv. světelný ekvivalent šumu za tmy, který je obsažen v katalogích pod označením ENI (Equivalent Noise Input). Je to hodnota světelného toku dopadajícího na fotokatodu násobiče, který způsobí na jeho výstupu signál rovnající se šumu fotonásobiče za tmy při šířce kmitočtového pásma 1 Hz.

$$ENI = \sqrt{i_s^2 / G_n M} \quad (\text{lm; A, A/lm}) \quad (4)$$

kde  $i_s^2$  je střední kvadratická hodnota šumového proudu fotonásobiče za tmy.

Často se lze také setkat s výrazem NEP (Noise Equivalent Power), který udává velikost zářivého toku dopadajícího na fotokatodu násobiče v případě, kdy se signál právě rovná šumu při šířce pás-

ma 1 Hz (měřeno v maximu spektrální charakteristiky). ENI i NEP jsou synonyma, ale s tím rozdílem, že ENI se vztahuje ke světelnému a NEP k zářivému toku. Typické hodnoty pro vlnovou délku 450 nm a pokojovou teplotu: NEP ~ 7·10<sup>-16</sup> W, ENI ~ 7·10<sup>-13</sup> lm.

### 4.4 Časová konstanta

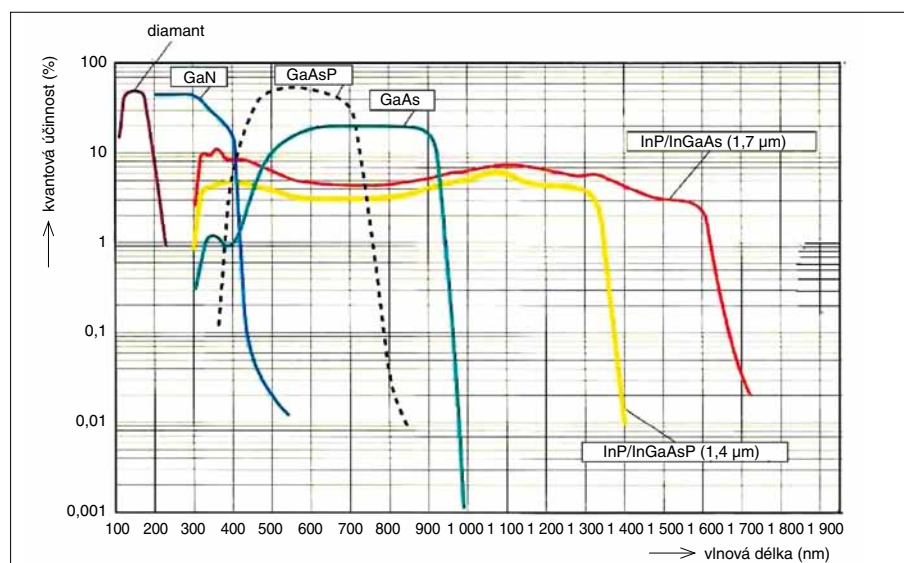
Pro mnohé účely je nutné znát časovou konstantu fotonásobiče. Předpokládáme, že na fotokatodu násobiče dopadne svě-

telný záblesk, jehož trvání je téměř nekonečně krátké. Trvání proudového impulsu na výstupu fotonásobiče je pak ovlivněno těmito činiteli: rychlostním rozdělením sekundárních elektronů, různými délkami průletových drah elektronů a časovou konstantou sekundární emise, tj. dobou, která uběhne od dopadu primárního elektronu k emisi sekundárního elektronu. Ve skutečnosti je třeba brát v úvahu pouze první dva činitele, které mohou být řádu nanosekund, zatímco časová konstanta jevu sekundární emise je o několik řádů menší. Přestože absolutní hodnota průletové doby není příliš podstatná, je to právě její časový rozptyl, který udává horní mez kmitočtové charakteristiky fotonásobiče. Časový rozptyl je větší u násobičů bez fokusace, protože změny délky elektronových drah od dynod k dynodě jsou větší než u násobičů s fokusací. U žaluziových a síťkových typů mohou také některé elektrony proletět mezerami v dynodě na další stupeň. Předpokládáme, že fotokatodu opustí jeden elektron. Na výstupu násobiče se pak objeví náboj o velikosti  $Me$ . Vzhledem k časovému rozptylu průletové doby nepřicházejí však všechny elektrony, které tvoří tento náboj, na anodu současně. Jejich časové rozdělení se blíží známé Gaussově křivce. Největší výstupní proud impulsu se tedy rovná

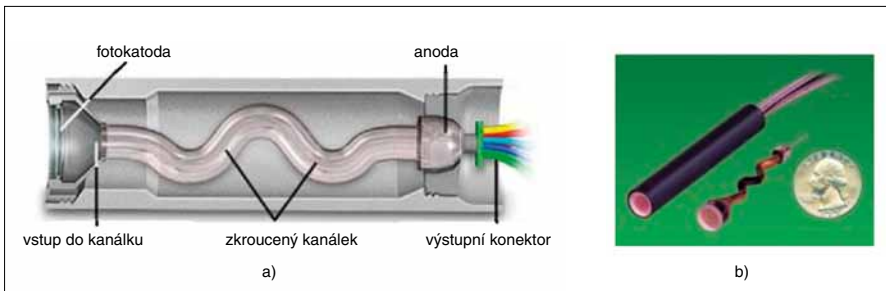
$$I_{\max} = Me / \tau \sqrt{2} \pi \quad (\text{A; C, s}) \quad (5)$$

kde  $\tau$  je standardizovaná odchylka, určená vztahem  $\tau = \Delta t / 2,36$ ,  $\Delta t$  šířka impulsu v jeho poloviční amplitudě, která se často označuje jako FWHM (Full-width-at-half-maximum), v české literatuře také *pološířka*.

Hodnoty  $\Delta t$  se liší podle různých násobících soustav; zpravidla se pohybují v rozmezí 1·10<sup>-9</sup> až 20·10<sup>-9</sup> s



Obr. 5. Spektrální charakteristiky některých fotokatod s negativní elektronovou afinitou a diamantu



Obr. 6. Jednokanávkový fotonásobič  
a - konstrukční schéma, b - skutečné rozměry channeltronu v porovnání s mincí

#### 4.5 Linearita

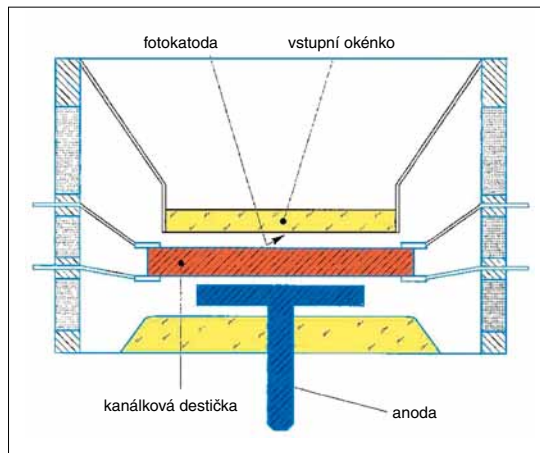
Linearitou fotonásobiče se označuje přímá úměrnost mezi světelnou (zářivou) veličinou na vstupu a výstupním proudem. Fotonásobiče obvykle bývají lineární v rozsahu deseti řádů vstupní veličiny ( $10^{-14}$  až  $10^{-4}$  lm). Při větších zářivých tocích na vstupu se linearita začne omezovat vlivem velkého prostorového náboje shluku elektronů u posledních dynod. Maximální velikost výstupních proudů ve standardním provozu závisí na druhu fotonásobiče a počtu dynod a pohybuje se v rozmezí 5  $\mu$ A, v krajních případech až 100  $\mu$ A.

#### 4.6 Stabilita, únava a doba života

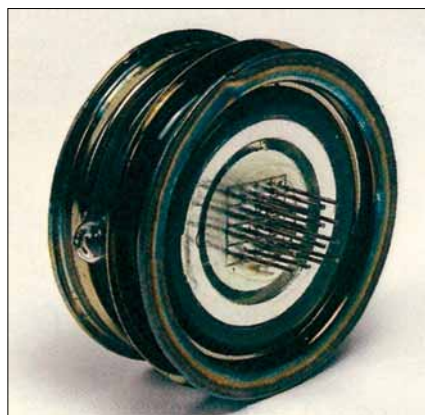
Při malých výstupních proudech a při dodržování podmínek pečlivého provozu bývají fotonásobiče stabilní po dlouhou dobu. Spíše než přetěžování fotokatody je příčinou nestability přetížení posledních dynod. Při provozu by v okolí fotonásobiče neměla být žádná – zejména proměnná – elektrostatická nebo magnetická pole, která by mohla ovlivňovat dráhy elektronů. Jestliže není fotonásobič v provozu, měl by být uchováván ve tmě, protože krátkovlnné záření může časem způsobit nevratné změny zejména v emitujícím povrchu fotokatody, který zásadním způsobem ovlivňuje velikost výstupní práce fotokatody.

Další příčiny únavy a nestability fotonásobičů, pokud se vyskytnou, jsou rozmanité. Například bombardování povrchu fotokatody ionty zbytkových plynů ve vyčerpané baňce i jejich neutrálními atomy, drift sodíku ze skleněné podložky fotokatody, oteplování fotokatody průchodem fotoelektrického proudu atd. Podrobnosti jsou např. v [3], [4], [5]. Při standardním provozu je doba života fotonásobičů v řádu tisíců hodin.

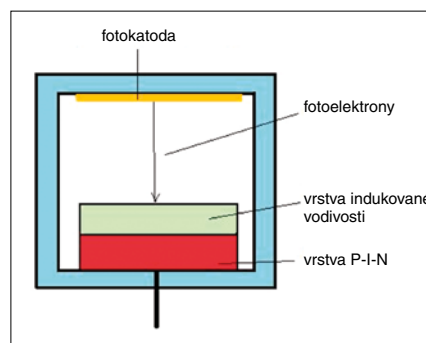
Podrobněji o těchto i jiných vlastnostech fotonásobičů pojednává četná literatura, např. [7], [8], [9].



Obr. 7. Fotonásobič s kanávkovou destičkou



Obr. 8. Multianodový fotonásobič s kanávkovou destičkou; na snímku jsou patrné výstupní kolíky od šestnácti anod



Obr. 9. Struktura hybridního fotonásobiče využívajícího indukovanou vodivost a lavinový jev v přechodu P-I-N

### 5. Zvláštní druhy fotonásobičů

#### 5.1 Fotonásobiče s kanálky (channeltrony)

Verze fotonásobiče s jedním kanálkem, jehož funkce je naznačena na obr. 2, je na obr. 6a. Z obr. 6b je patrná skutečná velikost takového fotonásobiče porovnáním s velikostí mince. Zkroucený kanálek umožňuje fotonásobič značně zkrátit. Při celkovém napětí 3 kV se dosahuje zesílení často převyšujícího hodnotu  $10^8$ . S bialkalickou fotokatodou bývá spektrální citlivost fotonásobiče přibližně  $3 \cdot 10^6$  A/W při vlnové délce 410 nm [10].

Konstrukce fotonásobiče s kanávkovou destičkou podle obr. 3 je na obr. 7. Fotoelektrony z fotokatody vnikají prostřednictvím proximální fokusace elektrickým polem mezi fotokatodou a destičkou do kanálků. V každém kanálku destičky roste původní počet fotoelektronů v důsledku procesu sekundární emise – velikost zesílení je určena napětím na destičce. Z výstupního povrchu destičky směřují sekundární elektrony k anodě. Pro speciální účely se vyrábějí kanávkové fotonásobiče s více anodami – snímek takového násobiče je na obr. 8.

#### 5.2 Hybridní fotonásobiče

Hybridní fotonásobiče se od ostatních liší tím, že pro zesilování nevyužívají sekundární emise, ale proces násobení nosičů proudu se odehrává v určité polovodičové vrstevné struktuře, např. v přechodu P-I-N. Vzhledem se takový násobič podobá fotonásobiči s kanávkovou destičkou. Místo této destičky je ale dioda P-I-N, na niž dopadají fotoelektrony urychlené napětím přibližně 15 kV. Mezi fotokatodou a diodou jsou fokusační elektrody, které zaostřují tok fotoelektronů na malé místo na diodě. V jiných případech je místo fokusačních elektrod umístěna v těsné blízkosti fotokatody destička s plošnou soustavou diod P-I-N a elektronka pracuje v režimu tzv. proximální (blízkostní) fokusace, kdy jsou dráhy fotoelektronů velmi krátké a žádná jiná fokusace není zapotřebí. Při vniku fotoelektronů do diody P-I-N se v ní ve velkém počtu tvoří páry elektron-díra, obvykle až 3 500 párů na jeden fotoelektron [11].

Objevily se také takové koncepce hybridních fotonásobičů, při nichž fotoelektrony s energií 8 až 10 keV dopadají na dvouvrstevnou strukturu (obr. 9), v níž se první vrstva vyznačuje indukovanou vodivostí a druhá vrstva má vlastnosti přechodu P-I-N. V procesu indukované vodivosti předávají rychlé fotoelektrony svou energii pářím elektron-díra, a tvoří tak velké množství nových nosičů náboje. Ty driftují do vrstvy P-I-N, kde se lavinovým efektem tvoří další nosiče. Celko-



vé zesílení je součinem obou dílčích zisků a dosahuje velikostí přesahujících  $10^5$ .

## 6. Závěr

Využívání fotonásobičů je stále velmi rozsáhlé a rozmanité. Fotonásobiče se používají k přímé detekci a měření – většinou slabého – záření v ultrafialové, viditelné a infračervené oblasti spektra a k nepřímému určování korpuskulárních částic a záření gama. Bývají používány při fotometrických a kolorimetrických měřeních, při měření činitele odrazu a prostupu, v astronomii a experimentálním kosmickém výzkumu, ve spektroskopii, dříve i v televizi atd. Důležitý význam mají ve spojení se scintilačními krystaly jako počítače v jaderné technice. Pro jednotlivé způsoby použití mají fotonásobiče různé tvary, které jsou např. na obr. 10, který představuje část sortimentu firmy Hamamatsu.

V dřívějším Československu se od roku 1953 až do poloviny devadesátých let dvacátého století vyráběly různé druhy fotonásobičů v podniku TESLA – Vakuová technika, viz [5], [12], [13]. Mnoho z nich je pravděpodobně stále v provozu.

### Literatura:

- [1] JEDLIČKA, M.: *Fotoelektrický jev*. SNTL, Praha, 1975.
- [2] JEDLIČKA, M.: *Fotokatody*. Slaboproudý obzor, 1961, 22, č. 8, s. 469.
- [3] JEDLIČKA, M.: *Únava a nestabilita fotokatod ve fotoelektrických násobičích*. Jemná mechanika a optika, 1988, 33, č. 11, s. 311–315.
- [4] JEDLIČKA, M.: *Fatigue and stability of photocathodes in photomultipliers*. In: Proc. of 11. Tri annual World Congress of IMEKO. Re. Triangl Park, N.C.: ISA 1988, s. 731–744.



Obr. 10. Část sortimentu fotonásobičů japonské firmy Hamamatsu [9]

- [5] JEDLIČKA, M. – RAUŠ, J.: *Stability of Photomultipliers*. TESLA Electronics, 1971, 4, č. 4, s. 99–106.
- [6] www.electrontubes.com.
- [7] FLYCKT, S. O. – MARMONIER, C.: *Photomultiplier Tubes. Principles and Application*. Dostupné na www.photonis.com (2002).
- [8] *Photomultiplier Handbook*. Dostupné na www.burle.com.
- [9] *Photomultiplier Tubes. Principles and Application*. Dostupné na www.hamamatsu.com.
- [10] *Channel Photomultipliers*. Dostupné na www.olympusfluoview.com/java/channelpmt/.
- [11] SUYAMA, M. – LARES, M.: *Photo-*

*multipliers: Hybrid detector combines PMT and semiconductor-diode technologies*. Laser Focus World, 2008, 45, č. 3, s. 80–83.

- [12] BERÁNEK, I.: *Vývoj fotonásobičů československé výroby*. In: Sborník prací elektrovakuového oboru, 3, Praha, TESLA Rožnov – VÚVET, 1961, s. 5–15.
- [13] STRATONOV, O. – BERÁNEK, I.: *Československé fotonásobiče a jejich použití*. Sdělovací technika, 1962, č. 5, s. 162–164.
- [14] JEDLIČKA, M. – KULHÁNEK, P.: *Photocathodes – contemporary state and trends*. Vacuum, 1986, 36, č. 7-9, s. 515–521.

Recenze: Ing. Jan Rauš

**Odborné časopisy s tradicí**  
zdroj aktuálních informací



FCC PUBLIC

**AUTOMA**

automatizace, regulace a průmyslové informační technologie

**ELEKTRO**

silnoproudá elektrotechnika v praxi – provoz, údržba, trendy, inovace

**SVĚTLO**

informace o osvětlování a využití světla

vydavatelství

FCC Public s. r. o.

Pod Vodárenskou věží 4

182 08 Praha 8

**objednací lístek**

objednávky na [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz) nebo tímto objednacím lístkem