

## KANALNA FOTOPOMNOŽEVALKA CPM - NOVA GENERACIJA VISOKO ZMOGLJIVIH FOTODETEKTORJEV

**Raimund Barden**, Perkin Elmer Optoelectronics, Heimann Optoelectronics GmbH, Wiesbaden, Nemčija

**Bojan Erjavec**, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, d.d., Teslova 30, 1000 Ljubljana

### CPM Channel Photomultiplier - A New Generation of High-efficiency Photodetectors

#### ABSTRACT

In this paper we are presenting a new generation of photomultipliers exhibiting high sensitivity, fast time response, low background and extended dynamic range. The new photodetector is of very compact design and very rugged. Due to small volume, the maintenance of ultra-high vacuum conditions is of great importance for the tube storage and operational life. All available photocathodes are processed and hermetically sealed using the transfer technique. Electron multiplication is enabled by a high-gain and extremely low-background channel electron multiplier serving also as an enclosure of the new mini electron tube. The applied channel electron multipliers exhibit good single electron response, i.e. narrow pulse height distribution and high peak-to-valley ratio, and are therefore, able to distinguish single electron events. The new channel photomultipliers are very useful in single photon counting applications, especially when detecting very weak light signals.

#### POVZETEK

V članku predstavljamo novo generacijo fotopomnoževalk, ki se odlikujejo z veliko občutljivostjo, hitrim časovnim odzivom, nizkim ozadjem in razširjenim dinamičnim obsegom. Novi fotodetektor je zelo kompakten in zelo odporen proti mehanskim obremenitvam. Zaradi majhnega volumna je vzdrževanje ultra visokovakuumskih razmer zelo pomembno za trajnostno dobo elektronke, tako v stanju mirovanja kakor med njenim delovanjem. Vse razpoložljive fotokatode so procesirane in hermetično zatesnjene s transferno tehniko. Elektronsko pomnoževanje poteka v kanalni elektronski pomnoževalki, za katero sta značilna zelo velik elektronski pomnoževalni faktor in ekstremno nizko ozadje. To je kontinuirna elektronska pomnoževalka, ki je obenem tudi ohišje nove mini elektronke. Odlikuje se tudi z dobrim enoelektronskim odzivom oziroma dobro ločljivostjo porazdelitve višine pulzov in visokim razmerjem vrh proti dolini, kar omogoča razločevanje posamičnih elektronskih dogodkov. Nove kanalne fotopomnoževalke so zelo primerne za delovanje v posamično-fotonsko-števem načinu, posebej v primeru detekcije zelo šibkih svetlobnih signalov.

#### 1 Uvod

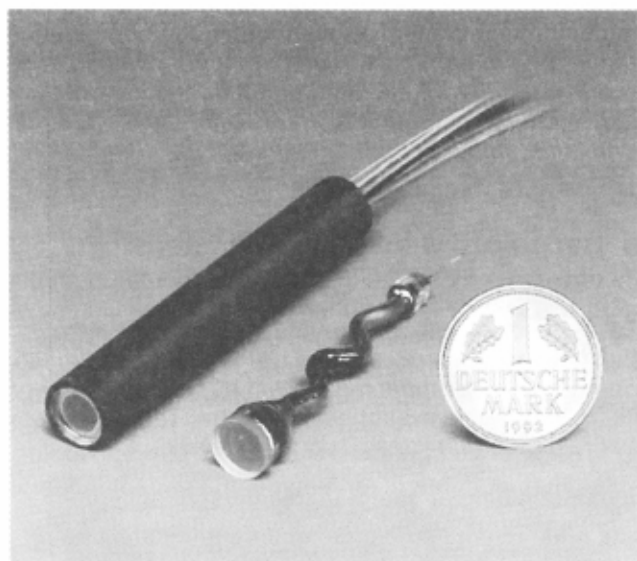
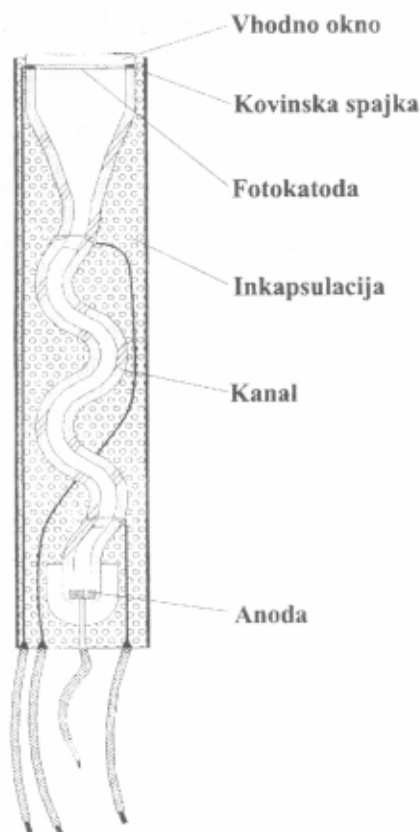
Fotopomnoževalke se uporabljajo za detekcijo sevanja in merjenje sevalne energije v ultravijoličnem, vidnem in bližnjem infrardečem območju elektromagnetnega spektra. Skupaj s scintilatorji in Čerenkovimi radiatorji se fotopomnoževalke uporabljajo tudi za detekcijo in merjenje energije x-žarkov,  $\gamma$ -žarkov in jedrskih delcev. Glede na namen uporabe fotopomnoževalke delujejo v analognem (tokovnem), scintilacijsko-števem in posamično-fotonsko-števem načinu. Pri aplikacijah, kot so UV-, vidna- in IR-spektrofotometrija, emisijska spektrofotometrija, atomska absorpcijska spektrofotometrija, beta in gama spektroskopija, detekcija plina radona, detekcija kozmičnih žarkov, detekcija Čerenkovega sevanja, pozitronska emisijska tomografija, fluorescenca, bio- in kemiluminiscenca ter fotometrija v astronomiji, naraščajo potrebe po visoko zmogljivih fotopomnoževalkah. Te so tako najbistvenejši del sodobne analize opreme in najrazličnejših sistemov za scintilacijsko ter fotonsko štetje. V več naštetih primerih

uporabe je potrebna detekcija posamičnih fotonov. V nekaj primerih je zaželena detekcija zelo šibkih svetlobnih tokov velikostnega reda 1 foton na sekundo in manj, za kar so potrebne fotopomnoževalke z visokim kvantnim izkoristkom, velikim elektronskim pomnoževalnim faktorjem, nizkim ozadjem, hitrim časovnim odzivom in dobrim enoelektronskim odzivom.

Sedem desetletij po izumu fotopomnoževalke predstavljamo novo generacijo visoko zmogljivih fotopomnoževalk, ki po karakteristikah ne le presegajo najboljše karakteristike konvencionalnih fotopomnoževalk, temveč istočasno izkazujejo bistvene prednosti. Občutljivost novega fotodetektorja je močno povečana, še močneje pa je znižan nivo ozadja in poboljšana stabilnost nivoja ozadja, kar ima za posledico zelo širok dinamični obseg in znižano spodnjo mejo detekcije. Fotodetektor je kompaktno oblike, je enostaven za uporabo in vgradnjo. V primerjavi s konvencionalnimi fotopomnoževalkami je tudi bolj odporen proti mehanskim obremenitvam. Za delovanje ne potrebuje uporovne verige kot zunanega delilnika napetosti.

#### 2 Princip delovanja kanalne fotopomnoževalke CPM

Na sliki 1 je shematsko prikazan prerež nove kanalne fotopomnoževalke CPM (Channel Photomultiplier). Podobno kot pri konvencionalnih fotopomnoževalkah z vgrajenimi polprepustnimi fotokatodami vpade svetloba skozi vstopno okno na polprevodniško fotokatodno plast, ki je nanosena na notranji površini vstopnega okna. Z zunanjim fotoefektom se svetloba v fotokatodni plasti spremeni v fotoelektrone, ki potujejo do površine fotokatodne plasti in izstopijo v vakuum. Zaradi visoke napetosti in ustreznega električnega polja se fotoelektroni pospešijo v smeri anode. Na svoji poti proti anodi morajo preiti ozek, nekajkrat upognjjen polprevoden kanal. Vsakokrat, ko posamezni fotoelektron zadene steno kanala, se iz njegove površinske plasti emitirajo sekundarni elektroni. Ti se ravno tako pospešijo vzdolž kanala. Pri tem vsak sekundarni elektron, ki trči ob steno kanala, znova proizvede sekundarne elektrone. Ta proces se večkrat ponovi. Tako nastane iz vsakega fotoelektrona plaz sekundarnih elektronov, ki se odrazi v obliki izhodnega pulza z elektronskim pomnoževalnim faktorjem, večjim od 100 milijonov. Rezultirajoči tok se zbere in odčita na anodi. Upognjena oblika kanala omogoča definirano elektronsko pomnoževanje, obenem pa onemogoča dodatno emisijo sekundarnih elektronov zaradi ionskega bombardiranja stene vhoda kanala in fotokatodne plasti (ion feedback). Povraten ionski tok in ionsko bombardiranje sta posledica morebitne desorpcije plinskih molekul s površine stene v bližini izhoda kanala ter njihove ionizacije, ki potekata med procesom elektronskega pomnoževanja.



Slika 1: Zgoraj: shematski prikaz prereza kanalne fotopomnoževalke CPM (Channel Photomultiplier)  
 Spodaj: Na fotografiji je prikazana nova kompaktna kanalna fotopomnoževalka z zelo veliko občutljivostjo, ekstremno nizkim ozadjem in z razširjenim dinamičnim obsegom. V sredini je nezalita elektronka. V ospredju je vidno vstopno okno s fotokatodo, v sredini kanalna elektronska pomnoževalka in v ozadju anodni del. Na levi je inkapsulirana elektronka. Kanalna fotopomnoževalka je bila razvita pri Heimann Optoelectronics (Perkin Elmer Optoelectronics) iz Wiesbadna v sodelovanju s Schott Glaswerke iz Mainza in Inštitutom za elektroniko in vakuumsko tehniko iz Ljubljane.

Opisani princip elektronskega pomnoževanja se uporablja že mnogo let v tako imenovanih kanalnih elektronskih pomnoževalkah CEM (Channel Electron Multiplier). Te se lahko kot odprti detektorji uporabljajo za detekcijo posamičnih elektronov, ionov, vakuumske UV-svetlobe in mehkih x-žarkov. Poznana je njihova uporaba v kvadrupolnih masnih spektrometrih za detekcijo ionov po izstopu iz masnega filtra /1/. V sedemdesetih letih je bilo pri konvencionalnih fotopomnoževalkah izvedenih več poskusov zamenjave diskretne dinodne sistema s kontinuirno kanalno elektronsko pomnoževalko, toda zaradi različnih težav, kot sta kontaminacija s parami alkalijskih kovin in uporno segrevanje kanala, ni bil dosežen omembe vreden uspeh.

Kot je prikazano na sliki 1, je steklena kanalna elektronska pomnoževalka ob enem ohišje elektronke, ki je na prednji strani hermetično zaprto z vstopnim oknom, na zadnji strani pa se konča z anodnim delom. Spajanje okna je izvedeno z mehko kovinsko spajko. Ta se plastično deformira tudi pri nižjih temperaturah, kar omogoča kompenziranje razlike ekspanzijskih koeficientov v primeru, ko se med seboj spajajo različni materiali. Tako se lahko spojijo ohišja elektronk z vhodnimi okni, izdelanimi iz različnih materialov. Na izbiro so vstopna okna iz različnih vrst stekel, kremenovega stekla kakor tudi nekaterih kristalov, kot je  $MgF_2$ . Z izbiro slednjega in ustrezne fotokatodne plasti se spektralna občutljivost kanalnih fotopomnoževalk pomakne v vakuumsko UV-območje s spodnjo mejo 115 nm.

Elektronka s priključnimi žicami je inkapsulirana v plastično ohišje, v katerega je vložena in zalita s silikonskim zalivnim materialom z dobro toplotno prevodnostjo. Zalivanje ima tri prednosti: prvič, zagotovljena je odpornost proti močnejšim mehanskim obremenitvam, drugič, zagotovljena je visoka električna napestna trdnost, in tretjič, uporabljeni zalivni material zagotavlja termično stabilnost elektronke.

Za učinkovito delovanje kanalne elektronske pomnoževalke je potrebna sprotna dobava elektronov, potrebnih za proces elektronskega pomnoževanja. Zaradi tega je stena steklenega kanala prevlečena s polprevodno plastjo. Po priključitvi kanala na visoko napestost teče skozi to plast delovni tok. Ker je pri kanalnih fotopomnoževalki uporabljeni zalivni material v direktnem termičnem kontaktu s steklenim kanalom, se lahko toplota, ki nastaja zaradi uporabnega segrevanja, preko njega sproti odvaža v okolico. V primerjavi z odprto kanalno elektronsko pomnoževalko, ki deluje v vakuumu, se lahko s to tehniko dosežejo od 3- do 30-krat večji delovni tokovi. To vodi k znatno večjemu maksimalnemu linearnemu anodnemu toku, ki je navadno od 5 do 10 % delovnega toka, in razširjenemu dinamičnemu obsegu elektronke.

Kanalna fotopomnoževalka je zelo kompaktna. Njen premer, skupaj z inkapsulacijo, je 10,5 mm in njena dolžina 75 mm. Premer vstopnega okna je 9 mm. V sredini 1999. leta je bila predstavljena na več mednarodnih razstavah, njene osnovne karakteristike so bile istočasno objavljene v več mednarodnih revijah, znanstveni srenji pa je bila prvič predstavljena oktobra istega leta na strokovni konferenci v Magdeburgu, Nemčija /2/.

### 3 Tehnologija izdelave

Aktivacija polprepustnih fotokatodnih plasti pri konvencionalnih fotopomnoževalkah poteka *in situ*, in sicer z naprevanjem izbrane kovine na vstopno okno, ki je del steklenega ohišja, in razvijanjem par izbranih alkalijskih kovin. Stekleno podnožje elektronke s kovinskimi prevodi je nosilec elektronsko-optičnega vhodnega sistema, dinodnega sistema, kolektorskega sistema, getra in izvirov za naprevanje, potrebnih za aktivacijo fotokate. Podnožje vsebuje tudi steklen črpalni pecelj, skozi katerega poteka črpanje elektronke. Z uporabo steklenih vilic se lahko hkrati črpa več elektronk. Po vsaki posamezni aktivaciji fotokate se ustrezna elektronka s pretalivitvijo črpalnega pečlja loči od črpalnega sistema.

Zaradi kompaktnosti kanalne fotopomnoževalke in načrtovanja izdelave velikega števila elektronk v enem ciklu smo razvili in uvedli v proizvodnjo tehnologijo izdelave kanalnih fotopomnoževalk na osnovi tako imenovane transferne tehnike, poznane iz tehnologije izdelave slikovnih ojačevalnikov druge generacije z bližinsko preslikavo. Proizvodnja kanalnih fotopomnoževalk tako že poteka v velikih UVV transfernih napravah. Vsaka izmed teh naprav vsebuje komoro za aktivacijo fotokatod, komoro za pripravo anodnih podsklopov, transferni mehanizem in ustrezno število vakuumskih črpalk, ventilov, manipulatorjev ter merilnikov totalnega in parcialnih tlakov. Osnovni tlak je velikostnega reda  $1,0 \cdot 10^{-10}$  mbar. Vzdrževanje UVV razmer je zelo pomembno, na eni strani zaradi velike kemijske reaktivnosti nanosenih fotokatodnih plasti in na drugi zaradi potrebe po ekstremno razplinjenih podsklopih elektronke. V komori za aktivacijo fotokatod istočasno poteka naprevanje fotokatodnega materiala na veliko število vhodnih oken. Dosežena je velika enakomernost pri ploskovni porazdelitvi fotokatodne občutljivosti. Po aktivaciji se vhodna okna v vakuumu prenesejo v komoro za pripravo anodnih podsklopov. Sledi spajanje katodnih in anodnih podsklopov, ki se ravno tako izvede v vakuumu z uporabo mehkih kovinskih spajk. Tehnologija izdelave kanalnih fotopomnoževalk na osnovi transferne tehnike je bila razvita s sodelovanjem Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko iz Ljubljane.

Nanos polprevodne prevleke na notranjo površino kanala poteka po postopku, poznanem iz tehnologije izdelave kanalnih elektronskih pomnoževalk. Osnovni material kanala je steklo z visoko vsebnostjo svinčevega oksida. Po oblikovanju lijaka na vhodu kanala, preoblikovanju ravnega v nekajkrat upognjeni kanal in spajanju izhoda kanala z anodnim delom sledi postopek žarjenja v atmosferi vodika. Med žarjenjem poteka na površini kanala delna redukcija svinčevega oksida. Po žarjenju je površinska plast polprevodna. Za vrhnji del te plasti, ki vsebuje več  $\text{SiO}_2$ , je tudi značilen povečan koeficient sekundarne emisije. Zaradi zanesljivega doseganja predpisane upornosti kanala in optimalnega koeficienta sekundarne emisije smo izhodni material razvili v sodelovanju s Schott Glaswerke iz Mainza, Nemčija.

### 4 Ultra visokovakuumska tehnika kot izziv

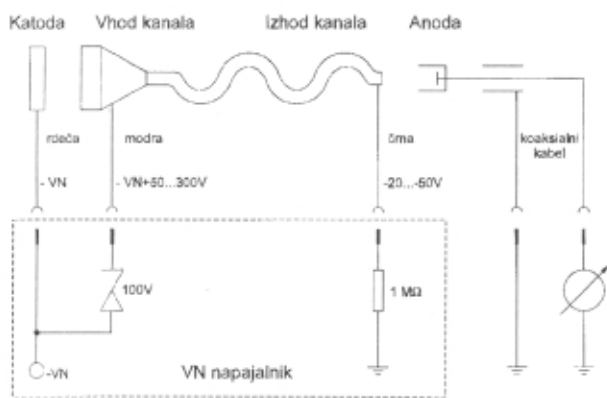
Ocenjeni volumen kanalne fotopomnoževalke je samo  $0,3 \text{ cm}^3$ , ki je tako ena izmed najmanjših elektronk. Za primerjavo navajamo, da je volumen konvencionalnih fotopomnoževalk od nekaj deset do nekaj sto  $\text{cm}^3$ . Še enkrat moramo poudariti, da so ekstremno razplinjene komponente eden izmed osnovnih pogojev za delovanje elektronke, kajti vsako najmanjše sproščanje plina lahko povzroči znaten porast tlaka v njej. Pomembna je izbira UVV kompatibilnih materialov. Razviti smo morali mehanske in kemijske čistilne postopke, optimizirati postopek termičnega razplinjevanja v vakuumu, kakor tudi preučiti efekt vzbujanja anodnih podsklopov s širokim elektronskim curkom in UV- svetlobo v komori za pripravo anodnih podsklopov na njihovo razplinjevanje med delovanjem elektronke. Pomembna sta tudi izbira getskega materiala in postopek za njegovo aktivacijo, ki omogoča dolgo trajnostno dobo elektronke.

### 5 Razpoložljivi fotokatodni materiali in vstopna okna

Za vrsto raznih aplikacij so na razpolago različni fotokatodni materiali in vstopna okna, ki pokrivajo spektralno območje od vakuumskega UV-(115 nm) do bližnjega IR-(850 nm) dela svetlobnega spektra. Tabela 1 je spisek razpoložljivih kanalnih pomnoževalk.

Tabela 1: Razpoložljive kanalne fotopomnoževalke za delovanje v analognem načinu. Kanalne fotopomnoževalke, ki so izbrane za delovanje v posamično-fotonsko-števem načinu, imajo pri oznaki tipa pripet P, npr. C 944P.

Tip	Fotokatoda	Vhodno okno	Spektralno območje
C 911	CsJ	$\text{MgF}_2$	115 - 200 nm
C 922	CsTe	kremen	165 - 320 nm
C 942	bialkalijska (KCsSb)	kremen	165 - 650 nm
C 943	bialkalijska (KCsSb)	UV-steklo	185 - 650 nm
C 944	bialkalijska (KCsSb)	borosilikatno steklo	300 - 650 nm
C 962	multialkalijska (NaKCsSb)	kremen	165 - 850 nm



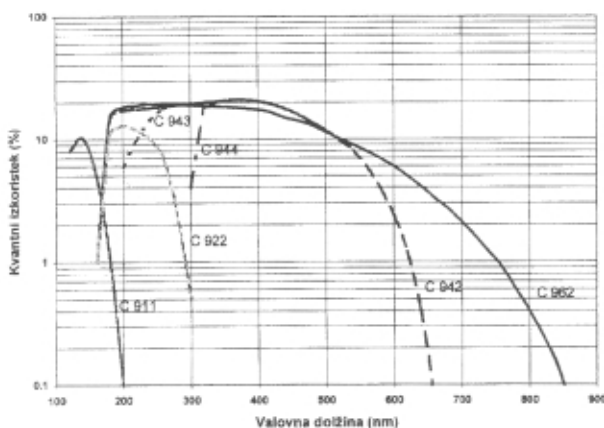
Slika 2: Shema električnega kroga kanalne fotopomnoževalke

## 6 Podatki o zmogljivosti kanalne fotopomnoževalke

Na sliki 2 je prikazana priporočena shema električnega kroga za delovanje fotopomnoževalke v analognem načinu, ki ga sestavljajo visokonapetostni napajalnik, precizni elektrometer in kanalna fotopomnoževalka. Na katodo je priključena negativna visoka napetost od -1,5 do -2,5 kV (-3 kV za delovanje v fotonsko-števni načinu). Vhod kanala leži na nekoliko višjem potencialu, za kar se lahko uporabi Zenerjeva dioda za 100V. S tem je omogočeno učinkovito zbiranje fotoelektronov, ki izstopajo iz fotokatodne plasti. Anoda je ozemljena. Signal se preko koaksialnega kabla (50 Ω) odčita z elektrometrom. Izhod kanala je postavljen na nizko negativno napetost (od -20 do -50 V), s tem da se uporabi ustrezen upor (1 MΩ).

### 6.1 Katodna občutljivost

Na sliki 3 je prikazana spektralna občutljivost, kot kvantni izkoristek v odvisnosti od valovne dolžine, različnih fotokatodnih plasti, ki so nanese na vhodna okna, izdelana iz različnih materialov. Izbira določene kombinacije materialov je odvisna od posamezne aplikacije. Pri tem je spodnja meja spektralnega območja določena z izbiro materiala vhodnega okna, zgornja pa

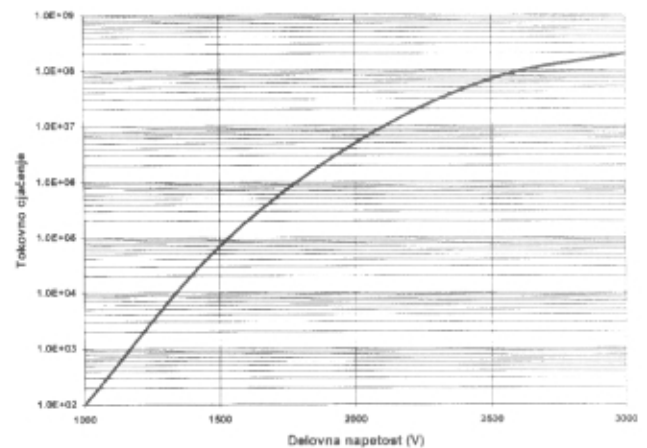


Slika 3: Spektralna občutljivost fotokatod pri različnih tipih kanalnih fotopomnoževalk

z izbiro materiala fotokatode. Prikazane spektralne občutljivosti so primerljive s tistimi pri sodobnih standardnih fotopomnoževalkah, ki se proizvajajo z drugimi tehnologijami /3/. Prednost tehnologije izdelave kanalnih fotopomnoževalk na osnovi transferne tehnike ni samo pri doseganju enakomerne ploskovne porazdelitve fotokatodne občutljivosti pri posamezni kanalni fotopomnoževalki, temveč tudi pri doseganju enakomerne porazdelitve fotokatodne občutljivosti pri večjem številu kanalnih fotopomnoževalk. V teku je razvoj posebnih postopkov za sintezo multialkalijskih fotokatod, s katerimi bomo povečali spektralno občutljivost v bližnjem IR- področju.

### 6.2 Elektronski pomnoževalni faktor in anodna občutljivost

Slika 4 prikazuje elektronski pomnoževalni faktor kot tokovno ojačenje kanalne fotopomnoževalke v odvisnosti od delovne napetosti. Pri maksimalni napetosti -3 kV območje tokovnega ojačenja sega preko  $1,0 \cdot 10^8$ . Pri napetosti -2400 V se za tokovno ojačenje doseže značilna vrednost  $5,0 \cdot 10^7$ . To ustreza anodni občutljivosti  $3,0 \cdot 10^6$  A/W pri 400 nm za kanalno fotopomnoževalko z bialkalijsko fotokatodo. Pri -3 kV se za anodno občutljivost lahko dosežejo značilne vrednosti preko  $1,0 \cdot 10^7$  A/W. V primerjavi s konvencionalnimi fotopomnoževalkami je anodna občutljivost presežena za en do dva velikostna reda.

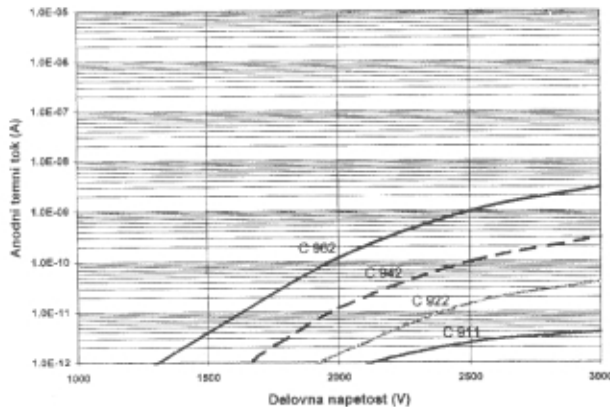


Slika 4: Tokovno ojačenje kanalne fotopomnoževalke v odvisnosti od delovne napetosti

### 6.3 Nivo ozadja

Posebnost tehnologije izdelave kanalnih fotopomnoževalk na osnovi transferne tehnike je tudi doseganje zelo nizkega nivoja ozadja. Pri tem se izraz ozadje fotopomnoževalke nanaša na anodni signal, ki se lahko izmeri, ko je fotopomnoževalka v popolni temi. Slika 5 prikazuje odvisnost anodnega temnega toka od delovne napetosti. Pri kanalni fotopomnoževalki z bialkalijsko fotokatodo je npr. anodni temni tok pri tokovnem ojačenju  $1,0 \cdot 10^6$  samo 3 pA. Značilne vrednosti anodnega temnega toka pri konvencionalnih fotopomnoževalkah so večinoma v spodnjem nA-področju. Značilne vrednosti anodnega temnega toka pri kanalnih fotopomnoževalkah z UV-fotokatodo pri tokovnem

ojačenju  $1,0 \cdot 10^6$  so celo v fA področju. Posledica nizkega nivoja ozadja je razširjen dinamični obseg, ki je pri tokovnem ojačenju  $1,0 \cdot 10^6$  značilen: šest velikostnih redov pri kanalnih fotopomnoževalkah z bialkalijsko fotokatodo in sedem do osem velikostnih redov pri kanalnih fotopomnoževalkah z UV-fotokatodo.



Slika 5: Anodni temni tok pri različnih tipih kanalnih fotopomnoževalk v odvisnosti od delovne napetosti

Prvi vzrok za zelo nizko ozadje je v bistvu v tem, da v kanalu poteka proces elektronskega pomnoževanja navidezno tiho. Meritve ozadja pri kanalni elektronski pomnoževalki so dale vrednosti, ki ustrezajo ekvivalentnemu vhodnemu toku od 0,01 do 0,1 elektrona na sekundo. Pri konvencionalnih fotopomnoževalkah je ozadje, ki je posledica poljsko-emisijskega efekta in izvira iz elektronsko-optičnega vhodnega in dinodnega sistema, navadno znatnejši delež celotnega ozadja. Poljsko-emisijski efekt je namreč zelo odvisen od hrupavosti kovinskih elektrod in množine par alkalijskih kovin, adsorbiranih na kovinskih elektrodah.

Drugi vzrok za zelo nizko ozadje so majhni izolacijski tokovi v anodnem krogu, kajti anoda je električno dobro izolirana predvsem zaradi preprečitve kontaminacije steklenih izolatorjev anodnega podsklopa s parami alkalijskih kovin. Signal se tudi odčita preko koaksialnega kabla ( $50 \Omega$ ) z majhnim šumom.

Naslednji vzrok za zelo nizko ozadje leži v pravilni izbiri materialov kanalne fotopomnoževalke. Posebno je treba paziti, da izbrani materiali ne vsebujejo elementov z naravnimi radioaktivnimi izotopi, kot je  $^{40}\text{K}$ . Edina izjema je vhodno okno iz UV-stekla pri kanalni fotopomnoževalki tipa C 943.

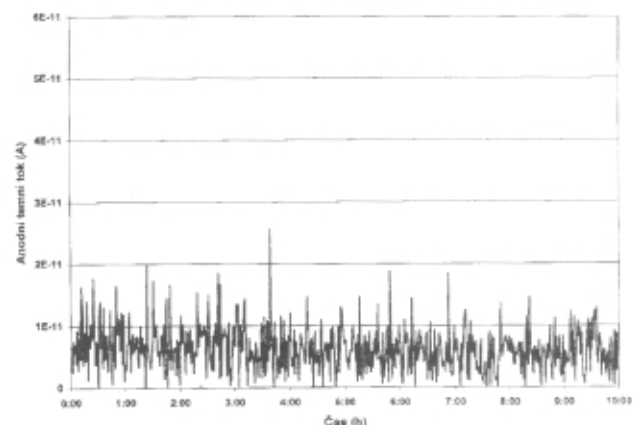
Iz navedenih dejstev lahko sklepamo, da pri kanalni fotopomnoževalki k ozadju praktično prispeva le fotokatoda zaradi termično-emisijskega efekta. Termični emisijski tok je pri obeh tipih UV-fotokatod zanemarljiv in pri bialkalijski fotokatodi zelo majhen. Pri multialkalijski fotokatodi se hkrati s povečano fotokatodno občutljivostjo v bližnjem IR-področju ustrezno poveča tudi njen termični emisijski tok. S kontrolirano sintezo multialkalijske fotokatode, ki jo omogoča tehnologija izdelave kanalnih fotopomnoževalk na osnovi transferne tehnike, lahko dosežemo povečano in stabilno fotokatodno občutljivost v bližnjem IR-področju kakor tudi definiran fotokatodni temni tok /4/.

## 6.4 Stabilnost nivoja ozadja

Nenadne razelektritve elektrostatičnega naboja so vzrok nestabilnosti nivoja ozadja oziroma porasta temnega šuma in so značilen pojav pri konvencionalnih fotopomnoževalkah. V nasprotju z njimi, ki imajo za svoja ohišja steklene bučke z dobrimi električnimi izolacijskimi lastnostmi, pa pri kanalnih pomnoževalkah elektrostatično nabijanje steklenih delov ni možno. Meritve časovnega poteka anodnega temnega toka pri kanalni fotopomnoževalki kažejo na njegovo zelo visoko stabilnost. Pri tem je temni šum samo posledica statističnih fluktuacij anodnega temnega toka. Notranjo površino kanala namreč sestavlja polprevodna plast, ki preprečuje kopičenje in spontano razelektritev elektrostatičnega naboja. S tem je odstranjena pomembna pomanjkljivost klasičnih fotopomnoževalk.

Na sliki 6 je prikazan anodni temni tok izbrane kanalne fotopomnoževalke C 942P z nizkim ozadjem, ki je bil izmerjen v časovnem obdobju desetih ur. Nivo anodnega temnega toka je ekstremno stabilen. Majhni vrhovi v spektru odgovarjajo eno- in večelektronskim dogodkom. Meritev anodnega temnega toka je narejena pri tokovnem ojačenju  $3,0 \cdot 10^7$ . Izmerjena srednja vrednost anodnega temnega toka je 5 pA. Če se ta vrednost deli s faktorjem elektronskega pomnoževanja, je ocenjena vrednost ekvivalentnega katodnega temnega toka približno  $1,6 \cdot 10^{-19}$  A ali 1 elektron na sekundo. To pomeni, da se s kanalno fotopomnoževalko lahko detektira posamične fotone tudi v analognem načinu delovanja! Meritev, narejena pri delovanju fotopomnoževalke v posamično-fotonsko-števni načinu, potrjuje ta rezultat: pri isti kanalni pomnoževalki je izmerjena frekvenca sunkov ozadja 1 cps (counts per second).

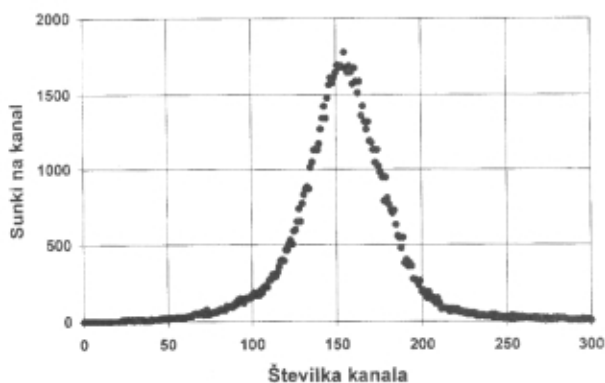
Zgoraj opisane meritve zelo impresivno prikazujejo zmogljivost nove kanalne fotopomnoževalke, ki lahko tudi v analognem načinu delovanja izkazuje zelo nizko ozadje, primerljivo z ozadjem fotopomnoževalk, izbranih za delovanje v posamično-fotonsko-števni načinu.



Slika 6: Časovna odvisnost anodnega temnega toka: nivo ozadja 5 pA pri tokovnem ojačenju  $3,0 \cdot 10^7$  ustreza ekvivalentnemu katodnemu temnemu toku 1 elektron na sekundo.

### 6.5 Ločljivost porazdelitve višine pulzov

Pri tokovnih ojačenjih, ki presegajo  $1,0 \cdot 10^7$ , se pri kanalni fotopomnoževalki enofotoelektronski pulz zelo jasno loči od elektronskega šuma. Pri tokovnih ojačenjih, večjih od  $1,0 \cdot 10^8$ , se zaradi porasta prostorskega naboja blizu izhodne strani kanala pojavi efekt nasičenja, ki je značilen za konvencionalne kanalne elektronske pomnoževalke. Pri delovanju kanalnih fotopomnoževalk v nasičenju postanejo tako izhodni pulzi po višini skoraj enaki. Slika 7 prikazuje porazdelitev višine izhodnih pulzov, ki so posledica enofotonskih dogodkov, posnetih z večkanalnim analizatorjem, ki vsakemu pulzu na osnovi njegove višine določi vrednost in prešteje ter prikaže število pulzov, zaznanih pri vsaki vrednosti. Za prikazano porazdelitev, ki je po videzu Gaussove oblike, je značilna odlična ločljivost in zelo visoko razmerje vrh proti dolini. Vzrok za to leži v velikem elektronskem pomnoževalnem faktorju in ekstremno nizkem ozadju kanalne elektronske pomnoževalke (slednje je brez prispevka, ki je značilen za konvencionalne fotopomnoževalke in izvira iz elektronsko-optičnega vhodnega in dinodnega sistema).



Slika 7: Porazdelitev višine pulzov pri kanalni fotopomnoževalki, posneta z večkanalnim analizatorjem. Opazna je dobra ločljivost porazdelitve in zelo visoko razmerje vrh proti dolini.

Zelo visoko razmerje vrh proti dolini, ki se nahaja na levi strani porazdelitve, znatno olajša nastavitvev nivojev diskriminatorja, kar vodi k bistveno boljši stabilnosti in večji natančnosti, posebno pri aplikacijah, ki temeljijo na posamično-fotonskem šteju.

### 7 Sklep

Nova kanalna fotopomnoževalka je visoko zmogljiv fotodetektor za detekcijo zelo nizkih svetlobnih nivojev. Kombinacija zelo velike anodne občutljivosti in ekstremno nizkega ozadja lahko pri mnogih analitskih metodah znatno zniža spodnjo mejo detekcije, kar zagotavlja identifikacijo elementov, ki so v manjših sledeh. Kompaktnost in robustnost novega fotodetektorja olajšujeta njegovo praktično uporabo. Serijska proizvodnja predstavljene kanalne fotopomnoževalke se je začela poleti 1999. leta v Wiesbadnu, Nemčija.

### 8 Načrtovanje

V bližnji prihodnosti nameravamo razširiti spekter kanalnih fotopomnoževalk s povečanjem dimenzij vstopnih oken in z novimi fotokatodnimi materiali. V načrtu je razvoj in proizvodnja linijskih in mrežnih večkanalnih fotopomnoževalk. V kratkem bodo na voljo tudi moduli, ki so sestavljeni iz visokonapetostnega napajalnika, kanalne fotopomnoževalke in elektronike za posamično-fotonsko štetje.

### 9 Literatura

- /1/ CHANNELTRON® Electron Multiplier, Handbook for Mass Spectrometry Applications, GALILEO Electro-optics Corp., 1991
- /2/ R. Barden, "Miniaturization of vacuumelectronic components: The new CPM - Channel Photomultiplier - a mini electron tube with high sensitivity and low noise", Fachkonferenz: "Festkörper-Gas-Wechselwirkung unter dem Gesichtspunkt vakuumelektronischer und vakuummikroelektronischer Anwendungen", ITG(VDE)-Fachausschuß 8.6 "Vakuumelektronik und Displays", Magdeburg, 15. Okt. 1999
- /3/ Photomultiplier Tubes, Principle to Application, HAMAMATSU, 1994
- /4/ B. Erjavec, Thin Solid Films 303, (1997), 4-16

### Delovanje organov IUVESTA

V letu 1999 je naša mednarodna organizacija imela dve seji svojega izvršnega odbora in sicer v Bains de Saillon (Švica) februarja in v Cancunu (Mexico) konec avgusta. Od Slovencev se je prve udeležil Andrej Pregelj, druge pa Monika Jenko. Taki sestanki trajajo navadno dva do tri dni. To niso le seje izvršnega odbora (Executive Council Meeting - ECM), ampak skupek sestankov vseh strokovnih in tehničnih pododborov. Najštevilnejša udeležba je tam, kjer je govor o aktualnih znanstveno-tehničnih področjih in načrtovanju kongresov, izobraževanja ter financah. Tu so podana poročila o posameznih dejavnostih, snujejo pa se tudi ideje za nadaljnje delo. Naslednji seji ECM 85 in ECM 86 v letu 2000 sta predvideni v Namurju v Belgiji (konec marca) in v Portorožu ob priliki 8. konference o tehnologijah in materialih ter 20. slovenskega posvetovanja o vakuumski tehniki. V Namurju bo letos nekoliko bolj slovesno zaradi obletnice pričetka delovanja mednarodne vakuumske organizacije. Tu je bil namreč leta 1958 v sklopu svetovne razstave prvi mednarodni kongres za vakuumsko tehnologijo in takrat je prišlo do pobude za ustanovitev mednarodne organizacije, imenovane IOVST, ki je vključevala posamezne vakuumske strokovnjake. Čez štiri leta pa je bila ta organizacija spremenjena tako, da jo sestavljajo le zastopniki iz držav članic in se preimenovala v IUVESTA. Tudi to se je zgodilo v Belgiji, in sicer 8. decembra 1962 v Bruslju. Doslej smo bili Slovenci že dvakrat lokalni organizatorji sestankov organov IUVESTA, in sicer leta 1988 v Portorožu (EMC) in leta 1995 na Brdu pri Kranju (EMC 73), obakrat v nadaljevanju združenih vakuumskih konferenc sosednjih dežel (Avstrije - Madžarske - Hrvaške in Slovenije). Želimo, da bi nam tudi letošnja ECM 86 v Portorožu uspelo organizirati tako dobro kot prejšnji dve.

A. P.