

Vpliv vključkov v materialu elektrod na njihovo vedenje v močnem električnem polju

The Influence of Inclusions in Electrode Material to their Behaviour in Strong Electric Field

Nemanič V., L. Županc-Mežnar, M. Žumer, IEVT, Ljubljana

Stabilnost delovanja elektronsko-optičnega (EO) sistema v visokem vakuumu je zelo odvisna od stanja elektrod. V močnem električnem polju pride lahko do pojavov hladne emisije (HE), kopičenja površinskega naboja na izolatorjih, ipd, kar privede v danem trenutku do preboja. Priprava elektrod za delovanje na predpisanih napetostih, t.i. kondicioniranje, je zadnja faza obdelave. Enako pomembne pa so zgodnejše faze izdelave. Poznan je vpliv izbire materiala, mehanske in kemijske obdelave površin in možen vpliv naključnih delcev na površini. Manj raziskano pa je vedenje vključkov izolatorjev, ki so nastali v zlitini ob metalurškem procesu. Robove elektrod iz nerjavnega jekla, ki jih nismo uspeli kondicionirati z visoko napetostno obdelavo, smo kemijsko pojedkali. Vključke, ki so postali na slikah, dobljenih z vrstičnim mikroskopom, razločno vidni, smo preiskali z elektronskim mikroanalizatorjem. Pokazalo se je, da je titanov karbid nastal pri izdelavi jekla kot dodatek za stabilizacijo ogljika in preprečitev interkristalne korozije. Njegove lastnosti nam pojasnijo težave pri kondicioniranju elektrod oz. nestabilno vedenje elektronsko optičnega sistema. Prekritje kritičnih delov elektrod z zlatom se je pokazalo za eno od sprejemljivih in dokaj uspešnih metod za odpravo pojavov, ki jih lahko povzročajo vključki.

Ključne besede: elektronsko-optični sistem, močno električno polje, visoki vakuum, stabilno delovanje

Stable operation of electro-optical system in high vacuum is mainly dependent on electrode surface condition. In strong electric field, several surface phenomena can arise: field emission, surface charging of dielectric particles, ionization and finally break down or arcing. The most important step in electrode's surface preparation before switching on the high voltage is called conditioning, when surface defects, which are responsible for undesired phenomena, are destroyed. All other manufacturing steps are nearly of same importance, starting from material selection, mechanical treatment and cleaning. Edges of electrodes, from which field emission have arised, were inspected by scanning electron microscope and electron microanalyzer after chemical etching. Microinclusions of titanium carbide were found which could be responsible for field emission and inefficient high voltage conditioning. Some test electrodes were prepared with golden layer in order to diminish influence of carbide inclusions. Improved characteristics of high voltage gap were observed.

Key words: electro-optical system, strong electric field, high vacuum, stable operation

1. Uvod

Elektronsko optične naprave so v zadnjih desetletjih doživele mnogo izboljšav, povezanih z boljšim poznavanjem materialov in ustrežnejšimi metodami kontrole pri procesiranju. Morda je to najbolj izraženo pri katodnih elektronkah (CRT),

danes široko uporabljenih kot računalniški monitorji in TV zaslone. V obeh tipih naprav je bistvena lastnost vedenja elektrod v močnem električnem polju, ki je potrebno za visoke zahteve po svetlosti in resoluciji slike¹. Elektronsko optični sistem ne sme doživeti nikakršnega preboja v celotnem času delovanja. Celo več, med elektrodami so dopustni minimalni tokovi, ki ne smejo preseči zahtevanih meja, saj sicer lahko posredno povzročajo nestabilno delovanje EO sistema, parazitno svetenje na zaslon, lahko pa so vzrok za električni preboj².

mag. Vincenc NEMANIČ, dipl. inž. fiz.
Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko
Testova 30, 61111 Ljubljana

2. Teoretične osnove

Pri zasnovi elektronsko optičnih naprav je v praksi potrebno upoštevati, da se začnejo v reži med elektrodama oz. na njihovih površinah procesi, ki vodijo do hladne emisije in kasneje do preboja mnogo prej kot bi pričakovali. Za takšno vedenje niti ni odločilna sestava ali tlak plina, saj so pojavi podobni v visokem in ultravisokem vakuumu, ki je standardno okolje za delovanje EO naprav.

Danes je najbolj zadovoljiv in z meritvami potrjen opis procesov med elektrodama sledeč: na še tako skrbno obdelanih površinah se pojavijo lokalni defekti (iz materiala elektrod, delci prahu ali adsorbat), ki zaradi oblike in sestave lokalno povečajo električno polje, da lahko pride do hladne emisije. Po Fowler-Nordheimovi enačbi¹⁴ je potrebna jakost električnega polja na vrhu kovinskega emiterja $5 \cdot 10^7$ V/m. Iz merjenega toka in znane makro jakosti polja sledi, da je površina emiterja reda 10^{-12} cm².

Spremljajoči pojavi, ki lahko privedejo do preboja pa si slede takole: emisijsko mesto se zaradi Joulovega segrevanja ogreje do razmeroma visoke temperature, ki sprosti na površini in v materialu ujetе pline. Tok elektronov, ki teče na anodo, jo na mestu curka lokalno segreje, saj prenaša moč UI. Tudi na anodi se sprostijo plini, ki lokalno povečajo tlak v reži. Zaradi ionizacije ob trkih elektronov in nasproti gibajočih se elektronov pride do nastanka prevodne plazme oz. obloka. Od jakosti električnega napajalnika je odvisno, kakšne posledice bo imel preboj. Za EO sistem katodne elektronke ni dopusten niti pojav hladne emisije, kaj šele preboj, ki lahko uniči poleg sistema še napajalnik.

Za vakuumška stikala, ki so bila v času razvoja predmet obširnih raziskav HE in prebojev, in o katerih najdemo največ literature¹⁵ je posamični preboj le eden od mnogih dopustnih, z edino zahtevo da na elektrodah ni pretiranih sledi. Dopustni tokovi pri razklenjenih elektrodah so v stikalih mnogo večji, poleg tega so večino časa stikala sklenjena.

Pri delovanju EO sistema v miniaturnih katodnih elektronkah lahko pride do dodatnih mehanizmov vzbujanja lokalnih mikro emiterjev:

- naelektritev neprevodnih delcev, ki lebdijo ali so vključeni v material elektrod z elektroni, ki se odbijajo od anode. Delež sekundarnih elektronov je močno odvisen od materiala anode. Koeficient sekundarne emisije pri dielektrikih je v območju napetosti od 3–10 kV med 3 in 5, pri kovinah pa je vedno nižji od 1. V katodnih elektronkah, ki smo jih preučevali, moramo za razumevanje vedenja elektrod upoštevati vsaj elastično odbite elektrone.

- optično oz. UV vzbujanje je po novejših teorijah in eksperimentih upoštevanja vreden mehanizem, ki privede do HE¹. Del svetlobe, ki nastane ob trku primernih elektronov, osvetljuje izpostavljena mesta elektrod. Spekter svetlobe pa ima dokaj izraženo UV komponento.

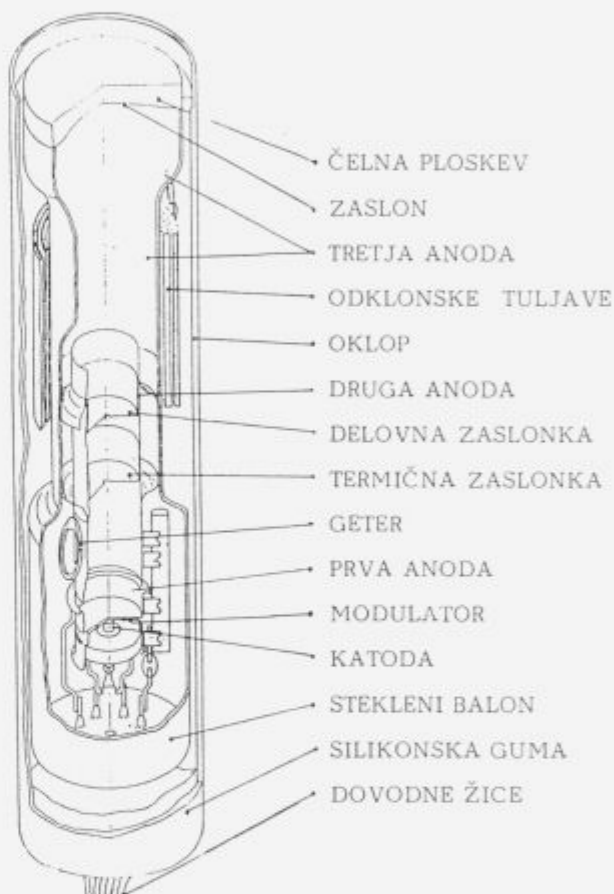
Naelektrni polprevodniki oz. izolatorji zaradi nižjega izstopnega dela emitirajo lažje kot kovine. HE iz površine kovinske katode pojasni nastanek mest, prekritih s tanko plastjo dielektrika. Ta je lahko adsorbat, ki je po nezadostnem čiščenju ostal na površini tudi po vakuumskem procesiranju, lahko je to naključni delec prahu ali vključek, ki je nastal v metalurškem procesu. Dinamika pojavljanja HE in natančnejši eksperimenti zadnjih let potrjujejo veljavnost teorije¹⁶. Razvoj dogodkov, ki privedejo do preboja, pa je enak kot pri nestimuliranih emiterjih.

Prilagojeno elektrod za delovanje na visoko napetost imenujemo kondicioniranje. S kratkim pulzom, ki privede do preboja, želimo emisijsko mesto uničiti. Dovedene energije naj bi bilo dovolj ravno za izparitev mikrodefekta, ne pa za uničenje večje

površine in nastanka novih emiterjev. Namesto pulzne napetosti se lahko uporabi VF napetost s podobnim načinom delovanja. Težava v obeh načinih je lahko kapacitivnost elektrod, ko nakopičen naboj ob zadostni napetosti za preboj presega optimalni odmerek energije.

3. Eksperimentalni del

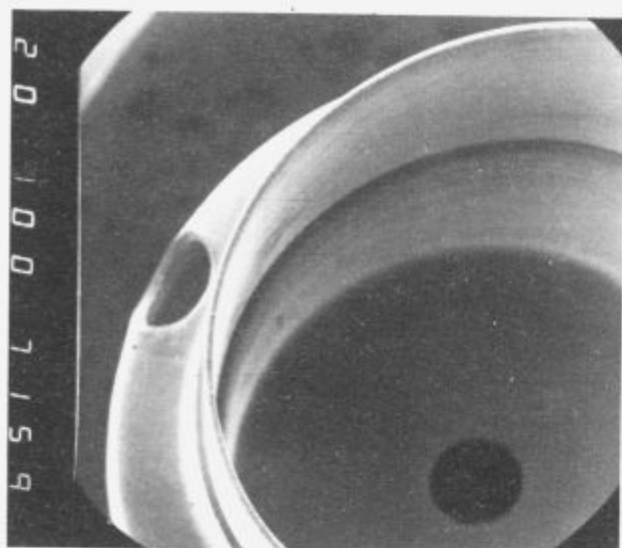
V miniaturni katodni elektronki tvorita glavno bipotencialno lečo EO sistema kovinski valj (na potencialu +1,5 kV) in na stekleno cev nanosen grafitni premaz (na potencialu od +7 do +10 kV), **slika 1**. Poljska jakost med njima je le $6 \cdot 10^7$ V/m.



Slika 1: Prezerna slika miniaturne katodne elektronke z glavnimi sestavnimi deli. Močno električno polje nastopi med kovinskim valjem druge anode in grafitnim valjem tretje anode na ekranskem potencialu

Figure 1: Crosssection of miniature cathode ray tube with main elements. Strong electric field arises between metal cylinder and aquadag third anode, which is on screen potential

Geometrijski faktor ojačanja zaradi roba kovinskega valja dvigne poljsko jakost na robu cilindra do 10^8 V/m². Vseeno pa smo kljub skrbni mehanski obdelavi in čiščenju pogosto ob priklopu vzbudili hladno emisijo, ki je lepo vidna na bližnjem luminescentnem zaslonu, **slika 2**. Vakuum zataljene elektronke je bil vedno boljši od $5 \cdot 10^{-7}$ mbar. Elektrodo smo kondicionirali s kratkim napetostnim pulzom (15–30 kV, 5–10 ms) z enako polariteto kot jo ima DC napetost med delovanjem. Grafitna elektroda namreč ne vzdrži kondicioniranja z obratno polariteto, ker lokalna sila lahko iztrga delce. Rezultati kondicioniranja so bili dokaj različni, zato smo obdelane elektronke razvrstili na štiri skupine, odvisno od tega, pri katerih pogojih se je oz. se ni pojavila HE. Kriterij je bil vezan na določene predpisane pogoje testiranja, ki so:



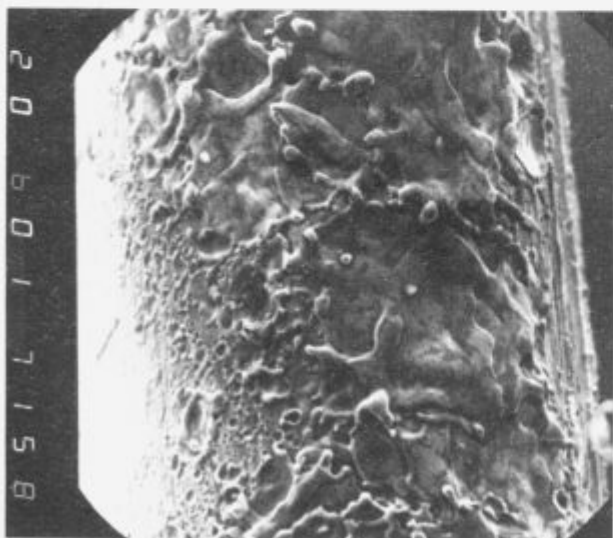
Slika 2: Emisijska mesta ležijo na skrajnem robu druge anode
Figure 2: Emission sites lie on extreme edge of second anode

- a) delovanje na sobni temperaturi brez delovnega toka, nominalna napetost anode 7.5 kV
- b) enako kot v a), napetost anode 10 kV
- c) delovanje na sobni temperaturi z obremenitvijo zaslona z min. 2 μ A na površini rastra 2cm² pri nominalni napetosti
- d) delovanje na -40°C oz. +70°C z obremenitvijo zaslona kot v c)

Prvo skupino predstavljajo elektronke, ki so po enem ali dveh napetostnih pulzih ostale brez hladne emisije v vseh predpisanih pogojih delovanja.

Drugo skupino tvorijo elektronke, ki so neomenjeno dolgo vzdržale na pogojih a) hladna emisija se je pojavila pri b). Ponovno kondicioniranje je skoraj vedno prineslo izboljšanje.

Tretjo skupino predstavljajo elektronke, ki so brez HE delovale neomenjeno dolgo v pogojih a) in b), pojavilo pa se je po krajšem času npr. 10 min v pogojih c) ali d.) Opažen je hitrejši



Slika 3: Rob druge anode po daljšem delovanju obloka. Vidni so ostanki pretaljenega materiala v obliki kapljic, mnogi robovi pa so dovolj ostri da izzovejo hladno emisijo
Figure 3: The edge of second anode after some seconds of arcing. Melted material is seen in the form of droplets and sharp edges, able to further induce field emission

pojav HE pri +70°C kot na -40°C: Po izklopu in daljšem čakanju se elektronka vede znova normalno, HE se pojavi po enakem času od vklopa elektronskega snopa.

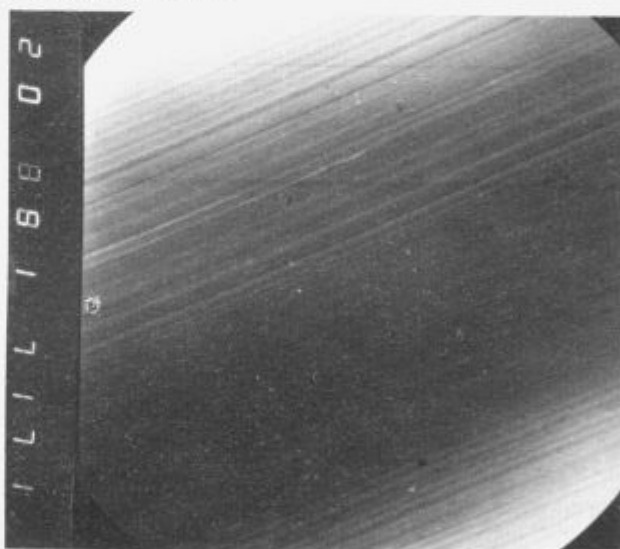
V četrto skupino lahko uvrstimo elektronke v katerih je kondicioniranje povzročilo trajne poškodbe elektrod in se HE pojavlja že v pogojih a) in b). Takšne poškodbe lahko povzroči preboj, ki se razvije v oblok. Ta lahko površino močno spremeni, kar prikazuje **slika 3**.

4. Diskusija

V prvi skupini elektronk je HE posledica kovinskih mikroprotruzij ali rahlo vezanih delcev na površini, ki jih z enim ali več napetostnimi sunki izparimo oz. razpršimo v okolico. Za njimi ni več ostankov z ostrimi robovi¹².

V drugi skupini elektronk smo primarne emitterje delno uničili, a so lahko nastali novi, ki smo jih uničili z nadaljnim pulznim kondicioniranjem.

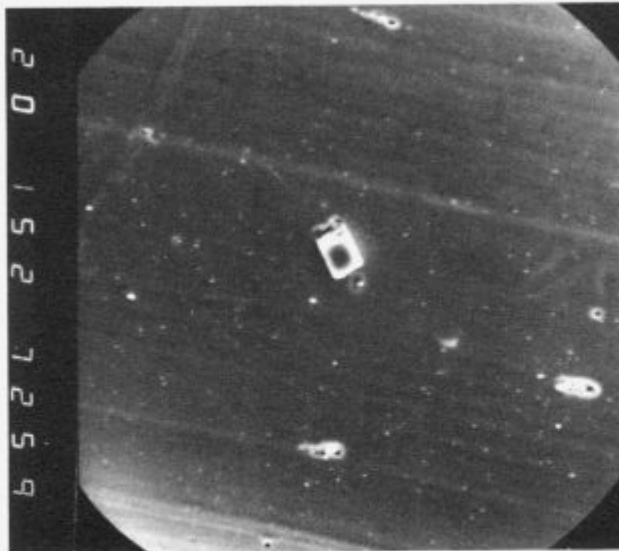
Za razlago pojava HE v tretjem primeru nismo imeli oprijemljivih literarnih podatkov. Avtorji niso izvajali meritev ob predhodnem ali hkratnem bombardiranju površine katode z elektroni, ki ne izvirajo od nje same. To pa se je dogajalo pri nas. Primarni elektronski curek je skeniral po anodnem zaslonu, ki ga predstavlja 100 nm debela plast aluminija, neparjenega na luminescentni zaslon. Od tu se je delno reflektiral v prostor proti drugi anodi, s stališča HE je to proti katodi. Nerjavno jeklo iz katerega je ta izdelana, je imelo po domnevi na površini delno adsorbirano plast nečistoče ali vgrajen vključek dielektrika, ki se je v določenem času naelektril in pričel emitirati¹³. Zaradi dielektrične narave in dobrega toplotnega stika z okolico, kondicioniranje nanj nima vpliva.



Slika 4: Mehansko polirana površina druge anode nima vidnih vključkov
Figure 4: Mechanically polished edges of the second anode shows no inclusions

Za potrditev domneve smo izbrali nekaj elektronk iz tretje skupine, kjer se je HE pojavila vedno po enakem času od začetka vklopa elektronskega snopa. Stekljeni balon smo odprli in rob druge anode natančno pregledali z elektronskim mikroskopom. Pri pregledovanju površine smo zaznali dokaj gladko ploskev, brez vidnih štrlečih vključkov, **slika 4**. Po elektro eroziji v ustreznem jedkalu so se začele prikazovati dobro skrita zrna, ki smo jih prepoznali kot TiC, **slika 5**. Njihova velikost je bila v območju 1 μ m določitve, natančnejše oblike kristalov metoda SEM

ne omogoča. Izvor TiC v nerjavnem jeklu je poznan, saj izvira iz postopka izboljševanja materiala in sicer že v fazi priprave zlitine, torej že v metalurškem procesu. Drug možen vzrok vnosa zrn bi bila mehanska obdelava elektrod, a smo to možnost eliminirali. Titanov karbid ima poleg trdnosti še visoko tališče, zaradi česar ga je s kondicioniranjem težko obdelati.



Slika 5: Kemijsko jedkanje razkrije mikrovkjučke TiC
Figure 5: Chemically etched surface shows several microinclusions of TiC

Za dokaj uspešno metodo zmanjšanja HE se je v našem primeru izkazalo prekritje dela anode, kjer nastopi ojačano električno polje, z nanosom zlata debeline cca. 1 μm . Omenjeno število vzorcev in možnost pojava HE zaradi prej opisanih

vzrokov, pa žal ne potrujeta, da je metoda vedno uspešna. Še ustrežnejša metoda bi verjetno bila izdelati elektrodo iz materiala z nizkim deležem trdnih vključkov, pretaljenega v vakuumu. Takšno rešitev so ubrali pri izdelavi RF celic pospeševalnika, kjer druge rešitve niso zadoščale^{2/}.

Analiza vzrokov HE v četrti skupini elektronk se da pojasniti s pomočjo slike 3, saj že makroposnetek nakazuje razdejanje, ki nastopi pri premočnem kondicioniranju ali delovanju obloka.

5. Zaključek

Stabilno delovanje EO sistema katodnih elektronk je odvisno od izbire materiala, mehanske obdelave, čiščenja elektrod in kondicioniranja pred vklopom visoke napetosti. V večletnem delu smo z zasledovanjem postopkov obdelave in rezultati meritev uspeli razvrstiti tipe HE na več skupin, od katerih se nekatere dajo odpraviti, pri drugih pa kondicioniranje ne prinese izboljšave. Med ustaljene postopke za zmanjšanje pojava HE smo uvrstili še zlatenje izpostavljenega roba kovinske elektrode, ki je pri testni skupini elektronk prinesla optimistične rezultate.

Literatura:

- ¹ H. Blume, H. Roehrig: High resolution high brightness CRT display systems; Update on the state of the art, SID Int. Symp. Digest of Technical papers, Vol. XXV, June 1994
- ² K. G. Hernquist: High voltage processing and arc suppression for color picture tubes, 11th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum, Berlin, Sept. 1984
- ³ R. V. Latham: Vacuum, 32, 1982, 3
- ⁴ G. A. Farrall: EI 20, 1985, 5
- ⁵ J. Halbritter: Appl. Phys. A39, 1986
- ⁶ R. V. Latham: High-voltage vacuum insulation. New horizons, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 23, 1988, 5, 881-895
- ⁷ J. M. Lafferty: Vacuum Arcs, John Wiley & Sons, 1980
- ⁸ B. Bonin: Field emission and surface conditioning. Vacuum, v tisku.