

VAKUUMSKA MIKROELEKTRONIKA

Vinko Nemanič, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana

Vacuum Microelectronics

ABSTRACT

Vacuum microelectronics (VM) is a new scientific and technological discipline where technology which enables to make details below micron (microelectronics) is applied for realization of densely packed field emitters (vacuum). Such a structure represents a very bright cathode (emission density exceeds 1000 A/cm²) which enables someone to create better electron beam devices, like electron guns for microscopes and other devices, klystrons to operate in THz range, flat HDTV displays etc.

Several technical and technological problems should be overcome before benefits of VM could be widely applied. Dynamics of transfer from labs to industry will depend of course on economy in next years.

POVZETEK

Tehnološki napredek pri izdelavi polprevodniških mikrovezij je omogočil razvoj nove znanstvene in tehnične panoge, vakuumске mikroelektronike (VM). S postopki, kakršni se uporabljajo v izdelavi polprevodniških vezij, je izdelana struktura diskretnih elektronskih izvirov. Zaradi majhnih razdalj dobimo s hladno emisijo tok prostih elektronov že z napetostjo nekaj sto ali celo le nekaj deset voltov. Gostota emitiranega toka lahko presega 1000 A/cm², kar je nekaj velikostnih razredov več kot pri termičnih katodah.

Že današnje napovedi o možnostih izboljšanja znanstvenih analiznih metod (npr. AES) do uporabe v profesionalnih napravah (nove generacije klistronov za območje THz, elektronsko optične naprave za litografijo) in celo izdelkih za široko uporabo (ploščati zaslon za HDTV), nakazujejo, da bo VM izredno zanimivo področje raziskav in razvoja v naslednjih desetletjih. Dinamiko prenosa v prakso pa bo prej ali slej določalo ekonomsko stanje v družbi.

1 Uvod

Elektronski tunelski mikroskop (TSM), ki sta ga izdelala G. Binnig in H. Rohrer 1982 /1/ in je bil odmevno predstavljen širši javnosti ob podelitvi Nobelove nagrade 1986, ni bil razvit na podlagi odkritja novega fizikalnega pojava, temveč je njegovo izdelavo omogočil splošni napredek tehnike in tehnologije. Več kot pol stoletja po odkritju in teoretičnem opisu kvantnega pojava hladne emisije je postal TSM instrument, ki prikazuje mikrosvet na atomski skali in je dostopen takorekoč vsem velikim laboratorijem (glej prispevek Dr. V. Marinkoviča, "Tunelska mikroskopija", Vakuumist št. 26, 1992/1).

Precej podoben opis razvoja bo lahko veljal čez nekaj let za vakuumsko mikroelektroniko (VM). Kvantni pojav hladne emisije izkoristimo v VM tako, da ustvarimo gosto mrežo elektronskih mikroizvirov s kontrolno elektrodo in anodo. S tako strukturo pa lahko ustvarimo elektronski curek, kratek elektronski impulz ali prostorsko in časovno moduliran vzorec, ki ga zaznamo na anodi.

Struktura lahko deluje v visokem in ultravisokem vakuumu. Bistvena razlika med mikroelektroniko in VM je ravno v načinu interakcij oz. gibanju elektronov. V trdni snovi so elektroni vezani in

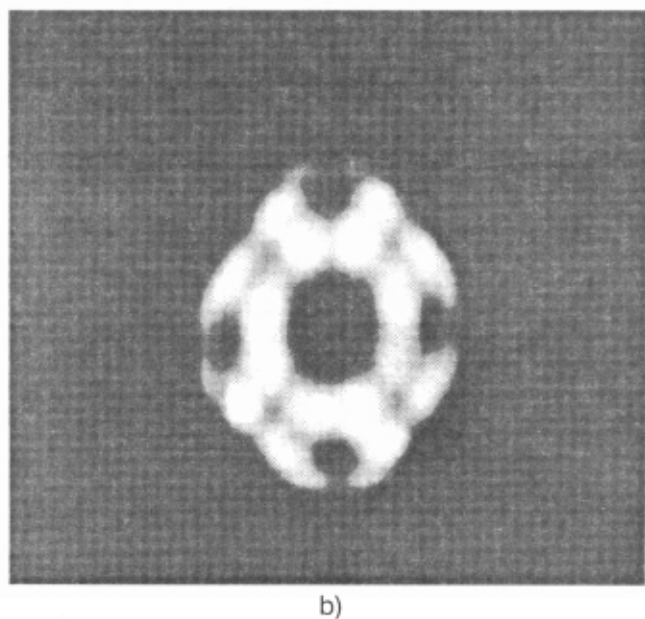
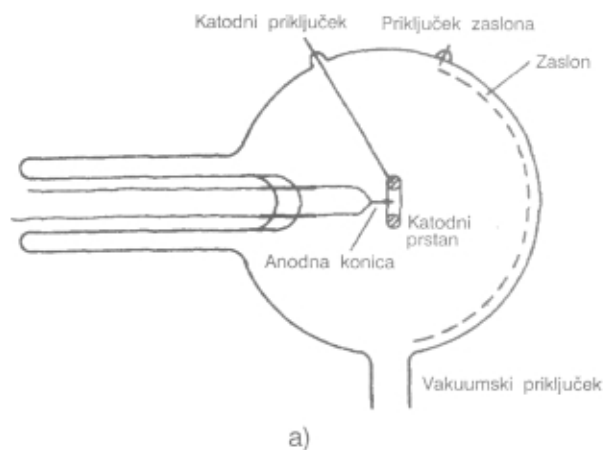
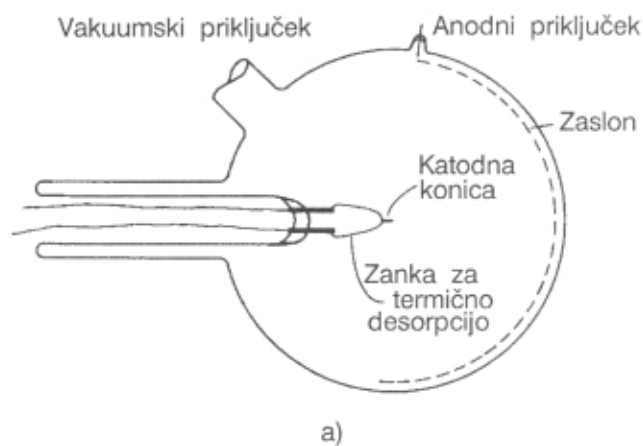
omejeni na trdno snov, VM pa temelji tudi na gibanju prostih elektronov v vakuumu. Predpona mikro se nanaša na dimenzije in se je zadnja desetletja manjšala: ob integraciji transistorjev je bila v področju nekaj mikrometrov, potem okrog mikrometra, v zadnjih letih pa le del le-tega. Za VM kot mlado vedo se "mikro" nanaša na obvladovanje podmikrometrskih detajlov in se spogleduje z nanotehnologijo. Že današnje napovedi o možnostih izboljšanja znanstvenih analiznih metod do uporabe v široko-porabnih izdelkih nakazujejo, da bo vakuumska mikroelektronika izredno zanimivo področje raziskav in razvoja v naslednjih desetletjih.

Tehnike nanosa tankih plasti z vakuumskimi metodami so bralcem poznane. V izdelavi mikrovezij, ki temelje na siliciju, pripravi njegovih oksidov, dopiranj in jedkanju, so danes dosegljive in nadzorovane dimenzije pod mikrometrom. Ponovljivost metod in zahteve po izločitvi defektov so na osupljivo visokem nivoju. Cena mikrovezij pa je v velikih serijah nepojmljivo nizka. S tem tehnološkim znanjem je ideja o mikroizvirih elektronov postala uresničljiva.

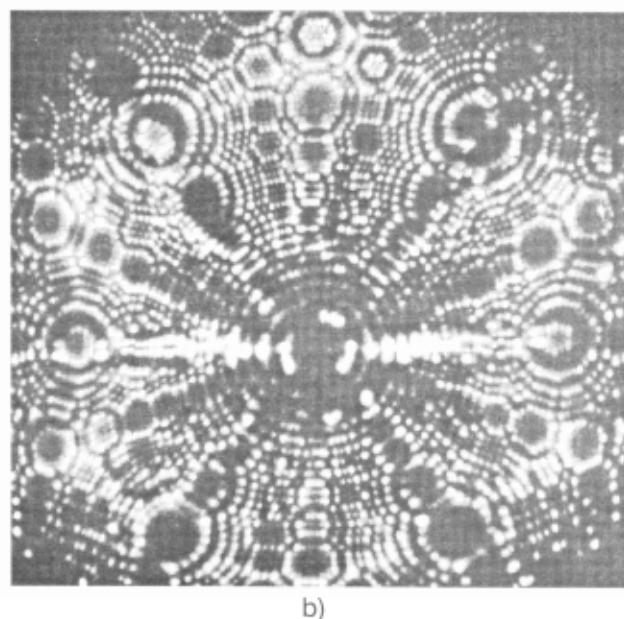
2 Fizikalni opis pojava in principi uporabe hladne emisije

2.1 Tunelski efekt

Tunelski efekt je eden od primerov uporabe kvantne fizike, nazorno opisan v učbenikih. Potencial, ki veže elektrone na snov, se v zunanem električnem polju spremeni. "Debelina" stene potencialne bariere se zmanjša, kar dopušča, da pri kratkotrajnem gibanju elektronov v prepovedanem območju, nekateri tudi brez potrebne energije zapustijo atom oz. trdno snov - tunelirajo. Pojav je praktično merljiv v električnem polju z jakostjo ~5.10⁷ V/m. S klasično fiziko ga ni moč opisati. V primeru, da ioniziramo atome plina, imenujemo to poljska ionizacija, v primeru da ioniziramo trdno snov, imenujemo pojav poljska ali hladna emisija (angl. field (cold) emission). Poglejmo si dva fizikalna instrumenta, ki sta desetletja omogočala vpogled v snov na atomski ravni. Prvi je neposredni predhodnik današnjih TSM, drugi nam daje nazoren prikaz vpliva močnega polja na pline in atome v srednjem vakuumu. Razumevanje dogajanja nam bo pomagalo razumeti težave v VM. Prve slike atomov so dobili z elektronskim emisijskim mikroskopom, ki ga je izdelal 1937 E. W. Müller, /2/, slika 1. Ostra konica katode v močnem električnem polju emitira elektrone (~1μA), ki zadevajo zaslon iz luminiscentne snovi, ki je na potencialu nekaj kilovoltov. Kotna porazdelitev elektronov je odvisna od zloga atomov na samem vrhu katode. Za delovanje tega mikroskopa z isto konico je treba v vakuumski komori s premerom decimeter ali dva vzdrževati tlak najmanj 10⁻⁷ mbar.



Slika 1. Emisijski mikroskop a) shema delovanja, b) značilna slika vrha konice železa



Slika 2. Ionski mikroskop a) shema delovanja b) slika vrha volframske konice, ki jo zariše helij

Tudi ionski mikroskop je bil desetletja zanimivo orodje za posredno opazovanje atomov trdne snovi [3], slika 2. V močnem polju ob konici pride do ionizacije razredčenega plina, ki je kotno znova odvisna od lokalnega polja ob samem vrhu. Nastale pozitivne ione usmerimo na zaslon, kjer tvorijo značilne vzorce, "podpis" reliefa konice. Zaradi kemijske inertnosti in majhne molekulske mase je delovni plin največkrat helij pri tlaku 10^{-3} - 10^{-4} mbar.

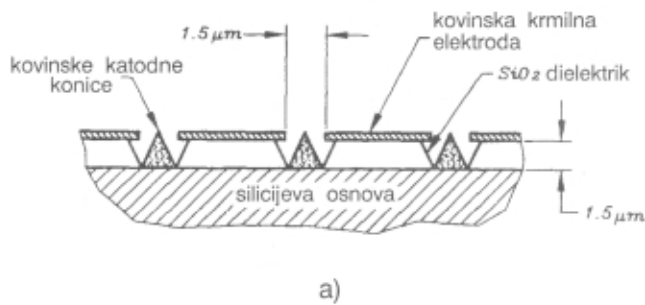
2.2 Hladna katoda

Hladna katoda kot stabilen izvir elektronov je bila davna želja načrtovalcev elektronsko - optičnih naprav. Tudi najskrbneje izdelane katodne konice so bile podvržene ionskemu jedkanju, prebojem, bodisi po vakuumski reži ali po izolatorjih. Zaradi tega se, razen v znanstveno eksperimentalnih napravah, širše niso nikoli uveljavile. Dovolj ostre katode se da izdelati s kemijskim jedkanjem monokristalov, whiskerjev ipd.

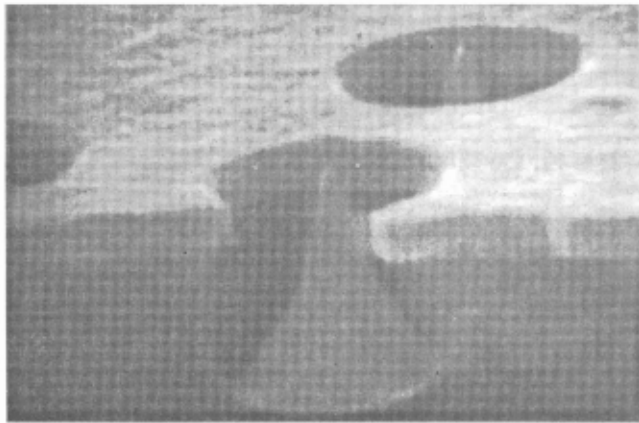
Hladne katode imajo vsaj dve bistveni prednosti pred vročimi (termionskimi). Prvo je večja gostota emisijskega toka, drugo pa ožja hitrostna porazdelitev elektronov. Praktična prednost je tudi zanemarljiva poraba energije, saj oksidne katode delujejo na 1100 K, kovinske na 1800-3000 K in porabijo za samo ogrevanje ogromno energije.

2.3 Delovanje mikroemitorjev

Oglejmo si princip delovanja in zunanost mikroemitorjev, za katere se je uveljavila okrajšava FEA (field emitter array), slika 3. Na silicijevi podlagi so nanosene katodne konice, obdane z modulacijsko elektrodo, od katode ločeno s plastjo silicijevega oksida. Anoda na tej sliki ni narisana na pravi razdalji. Za primer anodne napetosti 400 V, je razdalja, ki omogoča doseči ob vrhu katod dovolj močno lokalno električno polje, okvirno 0,2 mm. Modulacijska elektroda omogoča uravnavanje emisije od zaporne točke do maksimalne dovoljene vrednosti.



a)



b)

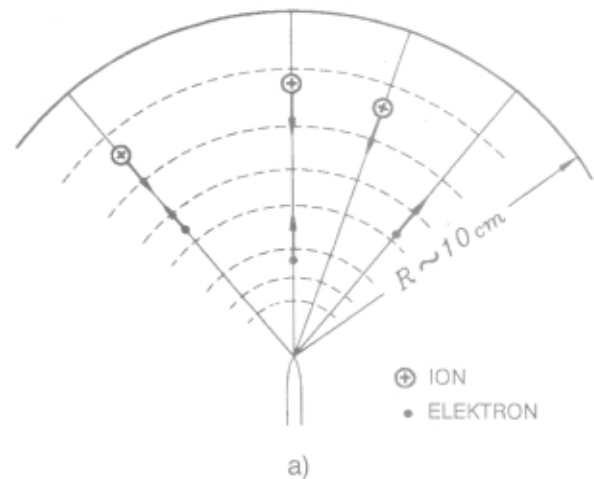
Slika 3. FEA: a) shema delovanja in okvirne dimenzije, b) detajl, posnet z vrstičnim elektronskim mikroskopom

Emisijski tok iz posamezne konice določata anodna in modulatorska napetost in izstopno delo materiala, iz katerega je narejena. Od temperature teoretično ni odvisna. Močno električno polje in znaten tok, ki izhaja iz majhne površine, omejujeta izbor materialov. Med kovinami so to le refrakcijske, npr. molibden, obetavne so še trdine, npr. titanov karbid, izbrani polprevodniki, npr. silicij, in nekateri dielektriki, npr. diamant. Konica je podvržena tako ionskemu jedkanju kot lokalnemu segrevanju, znatna je tudi sila, ki jo povzroča polje, kar jo lahko v kratkem času uniči. Razmere pri delovanju FEA so glede ionskega jedkanja pozitivnih ionov vseeno milejše kot pri emisijskem mikroskopu s slike 1. Pri sferični geometriji letijo ioni natanko v center, kjer se nahaja katoda, pri FEA pa ioni zaradi večje mase zadevajo njeno širšo okolico, slika 4.

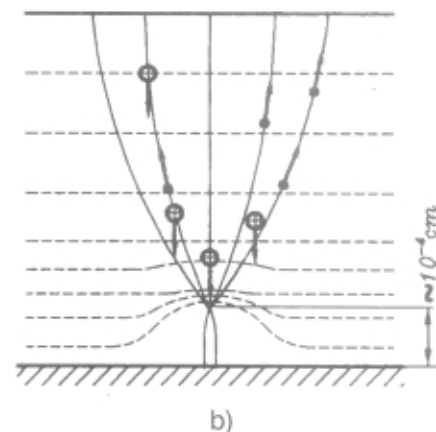
Tok iz posamezne konice je lahko do nekaj desetink μA , kar pomeni pri danes dosegljivi gostoti izdelave (razdalja med emitorji okvirno $10 \mu\text{m}$) gostoto toka nad 1000 A/cm^2 . Značilne vrednosti gostote toka za oksidno katodo so 1 A/cm^2 , za impregnirano $\sim 10 \text{ A/cm}^2$. Interes za uporabo FEA katod je torej več kot razumljiv, saj pred desetletjem še ni bilo obetov za povečanje emisivnosti za več razredov velikosti.

2.4 Postopki izdelave

VM je nastala na močni tehnološki osnovi izdelave integriranih vezij z najširšo paleto metod nanašanja, litografije, jedkanja, kontaktiranja in kontrole. Bistveni detajl, ki loči VM od navadne IC tehnologije je



a)



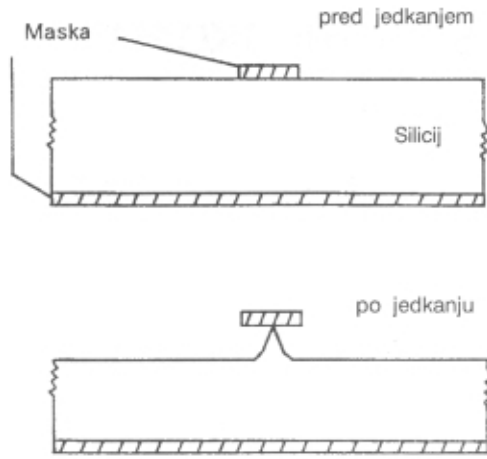
b)

Slika 4. Degradacija katodne konice je pri FEA (a) bistveno manjša kot pri emisijskem mikroskopu (b)

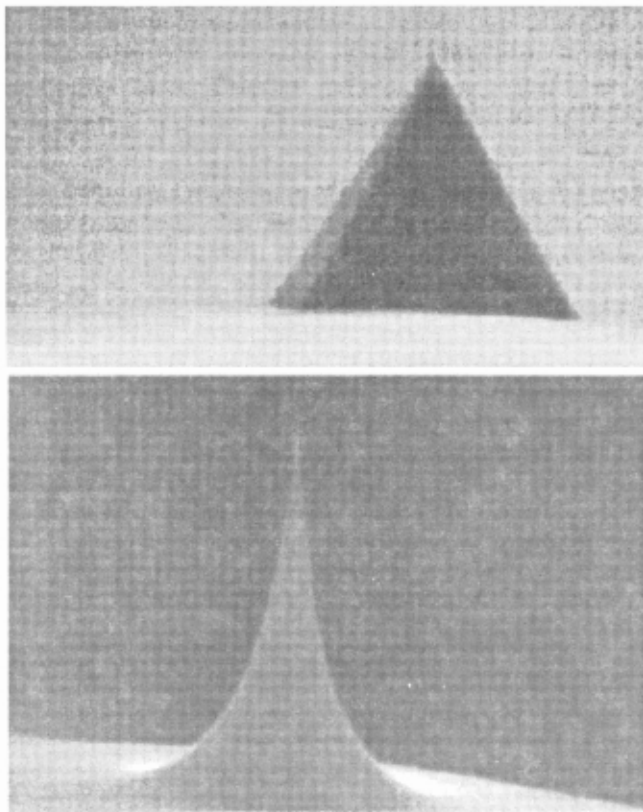
izdelava konic z radijem od 30 do 40 nm oziroma drugih možnih mikro konfiguracij, ki omogočajo hladno emisijo /4/. Oglejmo si bistvene faze izdelave konic z litografijo in jedkanjem, slika /5/.

2.5 Možnosti uporabe

Na podlagi merjenja karakteristik laboratorijskih vzorcev se mnoge od privlačnih možnosti uporabe FEA uresničujejo. Večja gostota emisijskega toka je le ena od izjemnih lastnosti FEA. Drugačni zakoni gibanja elektronov v vakuumu kot v trdni snovi omogočajo hitrejše odzive na spremembe električnega polja. Vakuumska mikroelektronika bo v doglednem času omogočila izdelati hitrejša vezja /5/, delovanje klistronov v THz območju, /6/, ustvarjanje in odklanjanje tanjših elektronskih curkov, primernih za novo generacijo mikrovezij (litografija) /7/, spominskih enot ipd, miniaturnih elektronskih mikroskopov, drugih vakuumskih optoelektronskih naprav in izdelavo resnično ploščatega TV zaslona z izjemno ločljivostjo in kontrastom. Poglejmo si za ilustracijo shemo njegovega delovanja, slika 6. Vsak slikovni element je sestavljen iz svojega FEA, krmilne modulatorske elektrode, ki v danem trenutku prepusti



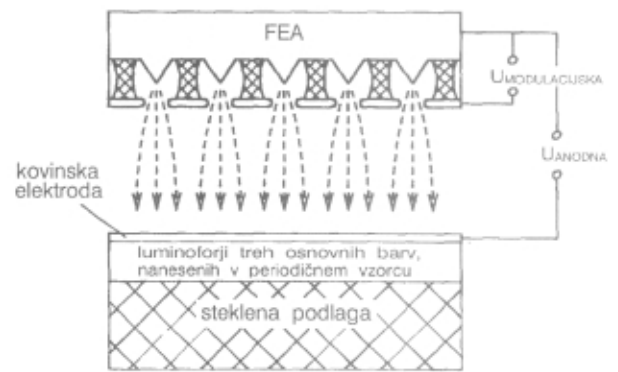
a)



b)

Slika 5. Izdelava silicijeve konice: a) pod okroglo masko zjedkamo silicij do zelene globine b) od razmer pri jedkanju sta odvisni ostrina in oblika piramide oz. stožca

ustrezno velik tok, in pripadajočega dela anode, to je zaslona, kakršnega uporabljamo v barvnih TV elektronkah. Današnji laboratorijski modeli, četudi skromnega premera /5/, omogočajo vzbuditi domišljijo o ploskem HDTV zaslonu premera meter in več, ki pa bo verjetno zaživel v 21. stoletju.



Slika 6. Princip delovanja ploščatega zaslona s FEA

3 Sklep

Doba VM se je torej začela, a mnoge od evforičnih prednosti zbledijo ob srečanju s prakso. Kot visokovakuumska komponenta je FEA podvržena vplivu delovanja residualne atmosfere, ki dobi v prisotnosti električnega polja še usodnejšo vlogo. Degradacija emisijskih mest, ki z otopitvijo izgubijo svoje lastnosti, je prva zahteva za kvaliteto vakuumu, slika 4. Ultra vakuumске razmere, pri katerih danes testirajo vzorce, bodo v prihodnje omiljeni, kljub temu bo visoki vakuum drago delovno okolje FEA. Prebojna varnost milijonov emisijskih mest bo zahtevala izredno skrbne postopke ves čas izdelave kateregakoli uporabnega izdelka s FEA. Brezprašnost, kot ena od zahtev za sprejemljiv izkoristek v mikroelektroniki, bo v VM kvečjemu zaostrena, saj snovalci načrtujejo zaslone velikih razsežnosti. Še te, druge plati je dinamika prenosa izsledkov raziskav v velikoserijske izdelke še vprašljiva. Nepredvideno velika vlaganja bodo odvisna od ekonomskih razmer v družbi v desetletju, ki se je že začelo.

4 Literatura

- /1/ G. Binnig, H. Rohrer, Helv. Phys. Acta 55, 726, 1982
- /2/ E.W. Müller, Ergeb. exakt. Naturwiss. 27, 290, 1953
- /3/ R. Gomer, Field Emission and Field Ionization, Harvard Univ. Press, 1961
- /4/ J.M. Kim et al, Fabrication and characterization of lateral "cusp-edge" and "knife edge" geometry cathodes, J. Vac. Sci. Technol. B11(2), Mar/Apr, 1993, 459
- /5/ T. Utsumi, Vacuum microelectronics for future display technology, Journal of the SID, 1/3, 1993, 313
- /6/ C.A. Spindt et al, Field-emitter-array development for high frequency operation, J. Vac. Sci. Technol. B11(2), Mar/Apr 1993, 468
- /7/ J. Ximen et al: Electron optical properties and aberrations of field emission microsources, J. Vac. Sci. Technol. B11(2), Mar/Apr 1993, 275

Dodatek

Avtor članka se je pri razvojno-raziskovalnem delu na področju miniaturnih katodnih elektronk zadnjih deset let srečeval s hladno emisijo med elektrodami kot stranskim in neželenim pojavom. Emitorji, ki jih je bilo najtežje uničiti pri napetostnem kondicioniranju, so bili vključki mikrokristalov karbida, preostanek razogličjenja nerjavnega jekla.