

# IONSKI IZVIRI

Peter Panjan, Anton Žabkar in dr. Boris Navinšek, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

## ION SOURCES

### Abstract

The most frequently used ion sources and the problems of generation, extraction and propagation of ion beam are described. The applications of these sources are also briefly reviewed.

### Povzetek

V članku so opisani najpogosteje uporabljeni ionski izviri. Poizkušali smo pojasniti, kako ioni nastanejo, kako jih potegnemo iz plazme, pospešimo in oblikujemo v curek. Naredili smo tudi krajši pregled uporabe ionskih izvirov.

## 1 Uvod

Obstreljevanje površin trdnih snovi z ioni spremlja različni procesi, med katerimi so najbolj znani: razprševanje, izbijanje sekundarnih ionov, elektronov in fotonov, sipanje primarnih ionov, implantacija ionov itd. /1/. Naštete interakcije ionov s površinami trdnih snovi lahko uporabimo v številnih analitskih tehnikah in tehnoloških postopkih.

Tako npr. proces razprševanja izkoriščamo za:

- nanašanje tankih plasti
- plazemsko čiščenje podlag
- suho jedkanje
- litografijo z ionskim curkom
- jedkanje vzorcev pri profilnih analizah itd.

Sekundarni ioni so osnova sekundarne ionske masne spektroskopije (SIMS), ki je ena izmed metod za določanje sestave površin trdnih snovi /1/. V isti namen se izkorišča tudi sipanje primarnih ionov.

Implantacija ionov pa je standarden postopek dopiranja polprevodnikov, pogosto pa se uporablja tudi za izboljšanje površinskih lastnosti specialnih zlitin.

V vseh naštetih primerih in še mnogih drugih, ki jih nismo omenili (pospeševalniki, magnetni separatorji izotopov, injektorji nevtralnih delcev v fuzijskih reaktorjih), potrebujemo curek ionov s točno določeno energijo, maso in smerjo. Za te namene so razvili več deset različnih vrst ionskih izvirov, ki se razlikujejo po načinu delovanja kakor tudi po karakteristikah ionskega curka. Od plazemskih naprav za jedkanje in naprševanje se razlikujejo po tem, da je plazma v ionskem izviru fizično ločena od podlage (vzorca), zato le-ta ne vpliva na karakteristike plazme. To nam omogoča, da neodvisno kontroliramo energijo, gostoto toka in smer ionov. Bistvena prednost je tudi v tem, da je delovni tlak v posodi praktično neodvisen od tlaka v ionskem izviru.

Osnovna vprašanja, na katera bomo poskušali odgovoriti v tem prispevku so naslednja: (a) kako ioni nastanejo v izviru, (b) kako jih potegnemo iz plazme in (c) kako jih pospešimo ter usmerimo v curek. V tem članku bomo poskušali odgovoriti na ta vprašanja in na kratko opisali nekatere najbolj pogosto uporabljene izvire.

## 2 Opis delovanja ionskih izvirov

Pri večini ionskih izvirov na tak ali drugačen način naredimo v določenem prostoru plazmo, potem pa ione z ustreznimi potenciali sesamo in pospešimo do zelene energije. Lastnosti ionskega curka so močno odvisne od načina vzbujanja plazme in od ionsko optičnih lastnosti izbranega sistema elektrod. Ionski curek označimo z energijsko razmazanostjo, porazdelitvijo mase in naboja, gostoto ionov in s premerom. Prvi dve lastnosti sta pogojeni z dinamičnim ravnovesjem (koncentracije ionov), ki se vzpostavi okrog ekstrakcijske odprtine. To ravnovesje pa je odvisno od delovnih pogojev, konstrukcije izvira in od vrste materialov, iz katerih je izvir izdelan. Tako ima npr. steklo v primerjavi z kovinami majhen koeficient rekombinacije, kar vpliva na sestavo plazme.

V nadaljevanju si bomo nekoliko podrobneje ogledali delovanje tistih ionskih izvirov, ki jih najpogosteje srečujemo v praksi.

### a) Duoplazmatron /2-4/

Delovanje duoplazmatrona je prvi opisal von Ardenne leta 1956. Shematsko je prikazan na sliki 1. Elektroni, ki jih oddaja žareča nitka, so pospešeni proti anodi. Med potjo ionizirajo plin, ki se nahaja v izviru pri tlaku 15 do 70 mbar. Pri tem se med žarečo nitko in anodo prižge nizkonapetostni lok. Le-ta je omejen na področje blizu sesalne (ekstrakcijske) odprtine v anodi, kar dosežemo:

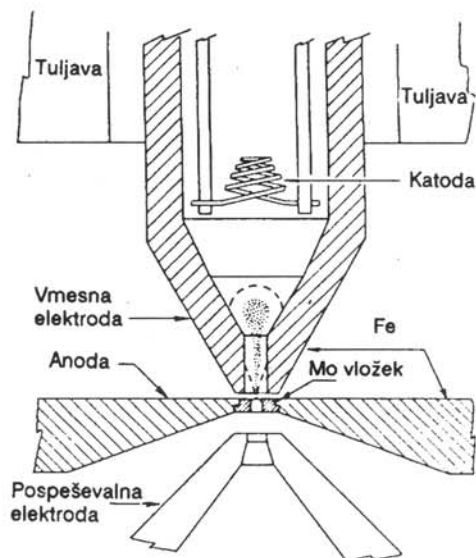
- i) s posebno konično oblikovano elektrodo, ki se nahaja med žarečo nitko in anodo
- ii) z magnetnim poljem, ki konvergira proti sesalni odprtini v anodi.

Gostota plazme je v tem področju ekstremno velika, zato mora biti anoda izdelana iz materiala z visokim tališčem (npr. Mo).

Z duoplazmatroni lahko dobimo ionski tok do nekaj A in gostoto toka do nekaj  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Slabost izvira je, da je delež molekularnih ionov glede na število enoatomskih ionov velik, medtem ko je energijska razširitev lahko manjša od 10 eV in je določena s potencialno razliko v plazmi ob anodi.

Značilni delovni parametri duoplazmatrona so:

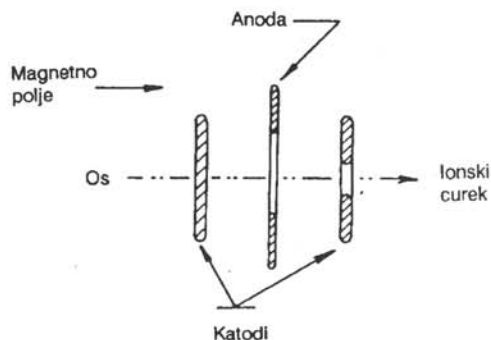
- razelektritveni tok: 0.25-0.75 A
- napetost loka: 40-70 V (odvisno od vrste plina v izviru)
- tlak: 70 mbar
- sesalna napetost: 2-3 kV
- gostota toka na tarčo:  $100-400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
- energijska razmazanost: 6-10 eV



Slika 1. Shema duoplazmatrona [2]

**b) Penningov ionski izvir /2-4/**

Bistven element Penningovega izvira je plinska razelektritev v magnetnem polju pri nizkem tlaku. Izvir je shematsko prikazan na sliki 2. Katodi sta dve vzporedni ploščici, ki sta pravokotni na magnetno polje z jakostjo nekaj sto Gaussov. Med obema katodama je anoda, ki ima v sredi luknjo, tako kot ena izmed katod.



Slika 2. Penningov ionski izvir

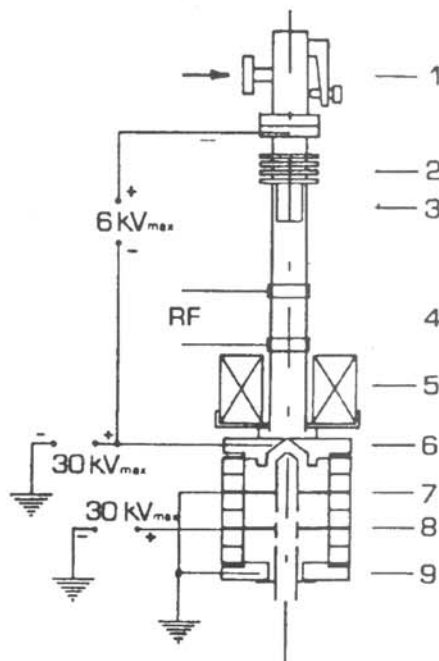
Elektroni ki nastanejo ob katodi se pospešijo v smeri anode, potujejo skozi in se na poti proti drugi katodi zaustavijo ter ponovno pospešijo v nasprotni smeri. Med osciliranjem v tem prostoru elektroni ionizirajo plin. Tlak le-tega je v izviru  $10^{-5}$  mbar in manj. Napetost izvira je kritično odvisna od materiala iz katerega je katoda, in je manjša, če uporabimo material z visoko sekundarno emisijo. Tako je delovna napetost v izviru z nikljevimi elektrodami 3600 V in le 350 V, če uporabimo aluminijeve katode. Ta izvir je pravzaprav posebna izvedba Penningovega merilnika tlaka, le da je v eni od katod odprtina, skozi katero dobimo ione s sesalnimi elektrodami. Ioni v curku imajo energije, ki so približno 10 do 30% nižje od ustreznega sesalnega potenciala. Razmazanost energije je okrog 10 do 15% povprečne vrednosti energije. Prednost izvira je v dolgem času uporabnosti.

Značilni delovni parametri Penningovega izvira so naslednji:

- napetost med anodo in katodo: 7.5 kV
- sesalna napetost: -5 kV glede na katodo
- magnetno polje: 600 Gauss
- tok ionov: 1 mA ali več (znotraj razelektritve)
- energijska razmazanost: 25 eV
- tlak v izviru:  $10^{-4}$  do  $10^{-3}$  mbar

**c) Radiofrekvenčni ionski izvir /2-4/**

Pri radiofrekvenčnih izviri (sl. 3) ustvarimo plazmo v stekleni cevi z visokofrekvenčnim elektromagnetnim poljem (12.6 MHz). Plazmo lahko vzbujamo z induktivno ali s kapacitivno sklopljenim oscilatorjem. Gostoto plazme zelo povečamo z magnetnim poljem. Ione potegnemo iz plazme s sesalno elektrodo, ki je na visokem potencialu in se nahaja v plazmi (ekstrakcija s sondo), lahko pa tudi tako, da imamo obe elektrodi na enem koncu plazme; tedaj imamo v anodi odprtino, z drugo elektrodo, ki je na nižjem potencialu pa privlačimo ione. Na tarčo jih fokusiramo s sistemom elektrostatičnih leč. Intenziteto ionskega snopa pojačamo, če povečamo sesalno odprtino (omejitev je pretok plina iz izvira v sistem), če povečamo moč oscilatorja ali sesalno napetost (omejitev so preboji in pregrevanje). Energijska razmazanost ionskih izvirov z radiofrekvenčnim vzbujanjem plazme je velika (20-100 eV), zato so izviri te vrste uporabni za eksperimente, kjer potrebujemo visokoenergijske ione. Delež atomarnih ionov je 80 do 90%, kar je posledica dejstva, da je plazma pretežno omejena s steklenimi deli.



Slika 3. Shema radiofrekvenčnega ionskega izvira, ki smo ga naredili na IJS [6] (1 - igelni ventil, 2 - anoda, 3 - kremenova cev, 4 - kapacitivni sklop z oscilatorjem, 5- magnet, 6 - prirobnica s sesalnim kanalom, 7 - pospeševalna elektroda, 8 - spremenljivi potencial leče, 9 - nosilna prirobnica)

Značilni delovni parametri rf izvira so:

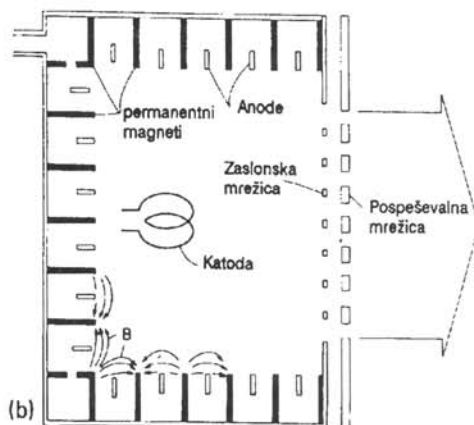
- tlak v izviru:  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  mbar
- rf moč: 300 W
- sesalna napetost 3 kV
- magnetno polje: 40 Gauss
- gostota ionov:  $10^{11}$  ionov/cm<sup>3</sup>
- ionski tok: 10 mA
- energijska razmazanost: 20-100 eV

Prednost rf izvira je enostavnost konstrukcije, izredna stabilnost in zanesljivost delovanja v daljših časovnih obdobjih (trajnost je celo do 1500 ur).

#### d) Kaufmanov ionski izvir s širokim snopom /2,6-11/

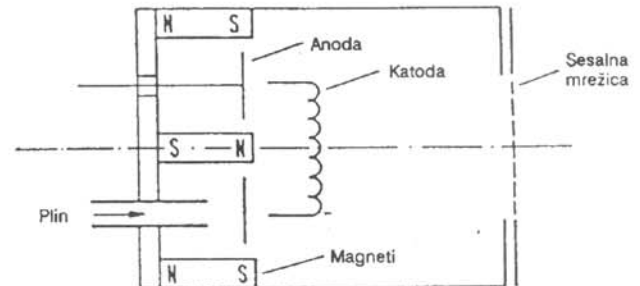
Ionske izvire s širokim snopom so v začetku razvijali predvsem za pogonske motorje vesoljskih plovil, v sedemdesetih letih pa so že postali široko uporabni za raziskovalne in proizvodne namene. Danes se najbolj pogosto uporabljajo za ionsko jedkanje in naprševanje tankih plasti. Obstaja cela vrsta komercialno dosegljivih izvirov, ki imajo premer curka tudi več kot 60 cm. Ionski izviri s širokim snopom so se uveljavili kot alternativa diodni plazmi, v primerjavi z njo pa imajo pomembne prednosti. Z njimi lahko tvorimo curke nevtraliziranih ionov, ki jim neodvisno kontroliramo energijo in smer pa tudi ionski tok.

Med več različnimi tipi ionskih izvirov, ki so bili zgrajeni in opisani v zadnjih desetletjih, se bomo tukaj omejili le na t.i. Kaufman-ove izvire. Kaufmanov ionski izvir s širokim snopom je shematsko prikazan na sliki 4. Elektrone, ki jih seva ena ali več žarečih nitk, pospešimo proti anodi z napetostjo ~50 V. Napetost na anodi (razelektrivna napetost) je pri vseh ionskih izviri približno 50 V, to pa zato, ker elektroni s tako energijo najbolj učinkovito ionizirajo plin. Pri višji napetosti se pojavi težava zaradi nastajanja dvakrat ioniziranih ionov, ki pa so nezaželeni. Tlak plina v izviru mora biti  $\sim 10^{-4}$  mbar. Ionizacijo povečamo z magnetnim poljem, ki ga ustvarijo magneti, razporejeni po plašču izvira (sl. 4), tako da je gostota plazme



Slika 4. Shema Kaufmanovega ionskega izvira z dvema mrežicama, ki ima magne razporejene tako, da ustvarijo zapleteno multipolno polje /5/

v izviru čimbolj enakomerna. Izviri z velikim premerom curka imajo magnetne, razporejene v zapleteno multipolno polje, pri manjših izviri pa je mogoče magnetno polje poenostaviti tako, da ima pretežno radialno smer z manjšo gostoto ob sesalni elektrodi (slika 5).



Slika 5. Shema ionskega izvira z radialnim magnetnim poljem in eno mrežico /11/

Nastale ione pospešimo z izbranim sistemom elektrod proti tarči, ki jo želimo obstreljevati. Elektrode imajo ponavadi veliko število odprtin (zato ponavadi govorimo o mrežicah), kar omogoča večje ionske tokove kot v primeru ene same sesalne odprtine.

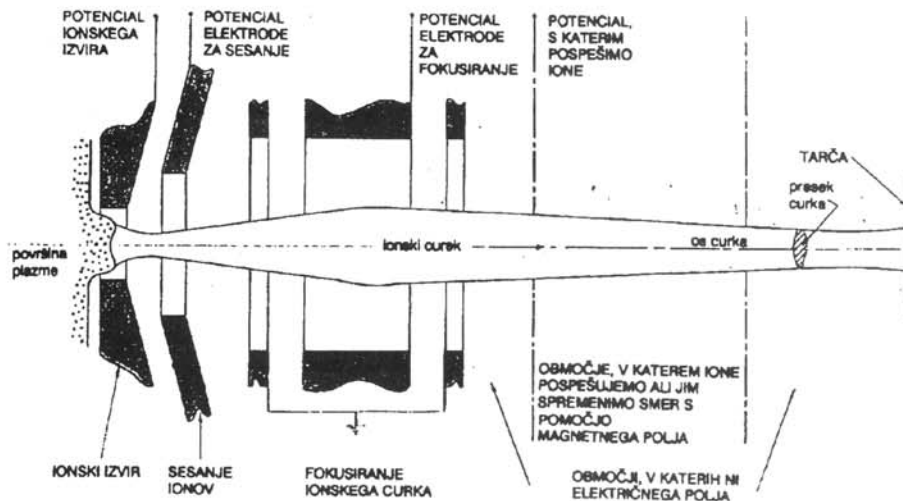
### 3 Ionska optika

Sesanje, fokusiranje in transport ionskega curka so shematsko prikazani na sliki 6. Prva in najpomembnejša ionska leča je površina plazme. Aberacije, ki jih vnesemo na tej stopnji, ostanejo in jih ne moremo odpraviti pri kasnejšem pospeševanju ionov in transportu curka. Površina plazme je določena s parametri, ki jih ne moremo meriti direktno. Odvisna je od koncentracije nabitih delcev, temperature le-teh v plazmi, od oblike in položaja plazme v odprtini na izhodu izvira, sesalne napetosti, itd.

Za pospeševanje in fokusiranje ionskega curka lahko uporabimo kombinacijo ("gap" in "einzel") leč. Pri tem imamo ionski izvir na visokem potencialu, prva pospeševalna elektroda pa je na potencialu, ki je nižji za 1 do 2 kV ("gap" leča). Sledi simetrična ("einzel") leča, ki je sestavljena iz treh valjastih elektrod in rabi za dodatno fokusiranje snopa. Napetost na srednji elektrodi lahko spreminjamo, drugi dve pa sta ozemljeni. Druga faza pospeševanja ionov je torej prehod le-teh skozi prostor med prvo pospeševalno in ozemljeno elektrodo "einzel" leče. S tako razporeditvijo elektrod dosežemo bolj enakomeren profil ionskega curka, posebno če imamo opravka z večjimi tokovi.

Osnovne parametre leč je mogoče izračunati /11-13/ in na osnovi dobljenih podatkov izbrati najugodnejšo geometrijo.

Medtem ko imajo pri ionskih izviri za ozke curke elektrode, ki sestavljajo ionsko optiko, cilindrično obliko, so pri izviri s širokim curkom mrežice. Če so dimenzije luknjic v mrežici manjše od Debye-jeve dolžine ( $\lambda_D$  (cm) =  $743 \sqrt{T_e \text{ (eV)} / n \text{ (cm}^{-3}\text{)}}$ ), kjer je



Slika 6. Shematski prikaz sesanja, fokusiranja in transporta ionov [12]

n go-stota in  $T_e$  temperatura elektronov v plazmi), potem plazma ne prodre na drugo stran mrežice, medtem ko posamični ioni lahko potujejo skozi luknjice.

Kaufman-ov ionski izvir lahko deluje z eno, dvema ali tremi mrežicami. Pri izvihu z dvema mrežicama, je na drugi (pospeševalni) negativna električna napetost (-50 do -300 V) glede na prvo (zaslonsko); ioni se na poti skozi njo pospešijo in oblikujejo ionski curek. Notranja (zaslonska) mrežica je na potencialu razelektritvene posode ali pa na "plavajočem" potencialu. Pomembno pri tem je, da sta mrežici postavljeni tako, da se luknjice prekrivajo, sicer se del ionov ujame na drugo mrežico. Energijo ionov, ki preletijo potencial pospeševalne mrežice, določa napetost na razelektritveni posodi. Pospeševalna mrežica ne vpliva na energijo ionov; toliko energije kot jo ioni pridobijo na poti do te elektrode, jo tudi izgubijo, ko se od nje oddaljijo. Vloga le-te je zgolj v tem, da potegne ione iz izvira.

Za nizke energije ionov je ugodna ena (pospeševalna) mrežica. S tem ohranimo razmeroma velik ionski tok, pomanjkljivost pa je erozija mrežice oz. kratka obstojnost.

Pri izviri s tremi mrežicami je tretja, tj. zunanja, ozemljena. S to mrežico lahko popravimo divergenco ionskega curka. Prednost pred izviro z dvema mrežicama je, da lahko dela pri nižjih energijah, ne da bi se pri tem gostota toka znatno zmanjšala. Problem je seveda, kako namestiti več mrežic tako, da se luknjice pokrivajo. Če pri tem nismo uspešni, se izgubi precej ionskega toka.

Teoretični izračuni ionske optike pri izviri s širokim curkom izhajajo iz ti. Child'ovega zakona, ki povezuje gostoto ionskega toka s potencialno razliko (V) med dvema elektrodama in razdaljo (d) med njima ( $j = konst. \cdot e V^{3/2} / m d^2$ , e in m sta naboj in masa iona). Pri izbranem potencialu V je torej gostota toka tem večja, čim manjša je razdalja med mrežicama. Ta razdalja pa je po drugi strani omejena z največjim, še dopustnim električnim poljem (2 kV/mm).

Pri izbiri materialov za izdelavo mrežic imamo več možnosti. Najpogosteje so narejene iz pirolitskega

grafita in molibdena, v nekaterih primerih pa tudi iz volframa ali nerjavečega jekla.

#### 4 Sklep

Ionske izvire so pred nekaj desetletji uporabljali izključno za znanstvene poizkuse. Danes pa so sestavni del številnih tehnoloških postopkov v mikroelektroniki, optiki pa tudi na drugih področjih (modifikacija materialov, nanašanje tankih plasti). V Sloveniji srečujemo ionske izvire predvsem v raziskovalnih laboratorijih, le redko v proizvodnih organizacijah (Iskra Elektrooptika).

V članku smo opisali, kako delujejo nekateri najpogosteje uporabljeni ionski izviri. Kolikor je bilo mogoče, smo posredovali praktične izkušnje, ki smo si jih pridobili z konstruiranjem in uporabo le-teh.

#### 5 Literatura

- /1/ P. Panjan, Vakuumist št.17/1, 1989
- /2/ T.T. Forrester, Large Ion Beams, John Wiley & Sons, New York, 1988
- /3/ L. Vally, Atom and Ion Sources, John Wiley & Sons, Budapest, 1977
- /4/ G. Carter and J.S. Colligon, Ion Bombardment of Solids, Heineman Educational Books Ltd, London, 1968
- /5/ H.R. Kaufman, J.J. Cuomo and J.M.E. Harper, J. Vac. Sci. Technol., 21 (3) (1982) 725
- /6/ B. Navinšek, N. Tanović in A. Žabkar, Bilten JUVAK št. 17, 1979, 391
- /7/ J.M.E. Harper, J.J. Cuomo and H.R. Kaufman, J. Vac. Sci. Technol., A4 (3) (1986) 7644
- /8/ H.R. Kaufman, J. Vac. Sci. Technol., A4 (3) (1986) 764
- /9/ H.R. Kaufman and R.S. Robinson, Vacuum, 39, 11/12 (1989) 1175
- /10/ J. Vossen and W. Kern, Thin Film Processes II, Academic Press, San Diego, 1991
- /11/ A. Žabkar, P. Panjan in B. Navinšek, Bilten JUVAK št.22, 1986, 76
- /12/ N.J. Tanović, Doktorska disertacija, Elektrotehniški fakultet, Univerza u Sarajevu, 1978
- /13/ F.H. Read, A. Adams and J.R. Soto-Montiel, J. Phys. E: Sci. Instr., 4 (1971) 625
- /14/ D. Čirić, I. Terzić and J. Vukanić, J. Phys. E: Sci. Instr., 9 (1976) 839