

MAGNETRONSKA IONSKO-RAZPRŠEVALNA ČRPALKA

Alenka Vesel, Miran Mozetič

Institut "Jožef Stefan", Odsek za tehnologijo površin in optoelektroniko, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

POVZETEK

V prispevku prikazujemo konstrukcijo novega tipa ionske-razprševalne črpalke, ki je sestavljena iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic. Raziskovali smo odvisnost razelektritvenega toka v novi črpalci od delovne napetosti in tlaka. Rezultati so pokazali, da dobimo stabilno razelektritev v območju med $1 \cdot 10^{-8}$ mbar in $1 \cdot 10^{-6}$ mbar. Pri razmeroma nizki napetosti je odvisnost toka od tlaka linearna, pri višji napetosti pa se karakteristika zlomi pri tlaku okoli $1 \cdot 10^{-7}$ mbar.

Magnetron sputter-ion pump

ABSTRACT

In this contribution we describe a new type of sputter-ion pump that consists of a combination of Penning and magnetron cells. The dependence of discharge current versus the anode voltage and the pressure was investigated. Results showed that a stable discharge was established in the pressure range between $1 \cdot 10^{-8}$ mbar and $1 \cdot 10^{-6}$ mbar. At low voltage the dependence of discharge current versus pressure was linear, while at high voltage the curve broke at the pressure of $1 \cdot 10^{-7}$ mbar.

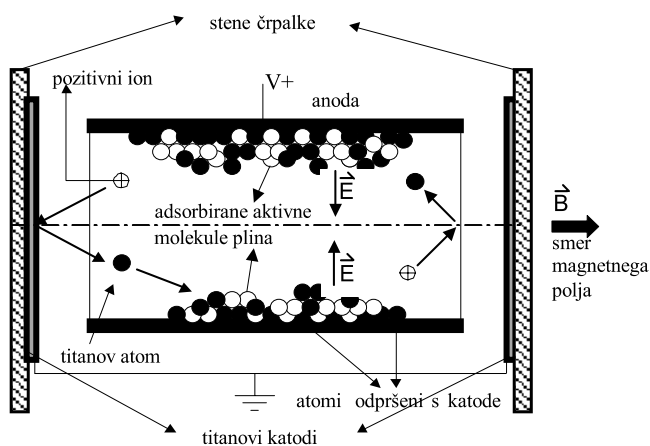
1 UVOD

Za doseganje in vzdrževanje ultravisokega vakuumu se največ uporabljajo ionsko-razprševalne črpalke.^(1,2) Delovanje teh črpalk sloni na vzpostavitvi plazovite ionizacije (razelektrenja) med dvema kovinskima elektrodama, med katerima je velika potencialna razlika (nekaj kV). V razelektritvi ob neprožnih trkih hitrih elektronov z molekulami plina nastajajo pozitivni ioni, ki se v električnem polju pospešijo. Ioni z veliko energijo se lahko vrinejo v kovinsko kristalno mrežo katode, kjer ostanejo ujeti, ali pa izbijejo iz nje atome kovine. Izbiti atomi se napršijo na površino anode, kjer kemijsko reagirajo s plini. Tako dosežemo črpalni učinek. Za črpanje plinov je zato potreben stalen dotok izbitih kovinskih atomov, ki jih dobimo le ob zadostnem obstreljevanju katode z ioni. To pa

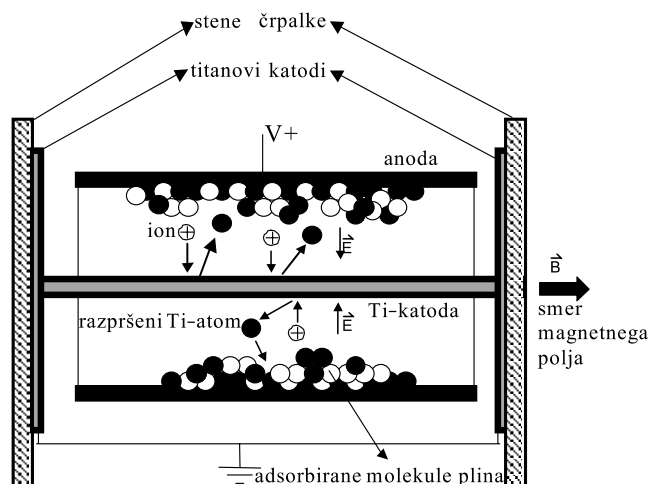
lahko zagotovimo le, če z ustrezno kombinacijo električnega in magnetnega polja podaljšamo poti elektronov in s tem povečamo verjetnost trka z molekulo plina in nastanka iona. Celice, ki sestavljajo ionsko-razprševalne črpalke, so zato konstruirane tako, da delujejo kot past za elektrone.

Najbolj preprosta oblika celice je Penningova celica (slika 1), ki je sestavljena iz anode v obliki valja. Anoda je na obeh straneh omejena s katodnimi ploščama, ki sta navadno izdelani iz čistega titana. Titan se uporablja kot naprševalni material zaradi izredne sposobnosti vezave plinov v čvrsto vezane spojine. Velikost Penningove celice je nekaj cm, razdalja med anodnim valjem in katodno ploščo pa nekaj mm. Celica se nahaja v zunanjem magnetnem polju gostote okoli 0,1 T, ki je vzporedno z osjo anode in tako pravokotno na električno polje. V prečnem električnem in magnetnem polju se elektroni gibljejo po cikloidah okoli anodne osi.^(3,4) Elektron se približa anodi le, če trči ob molekulo, pri čemer izgubi kinetično energijo in se poveča radij njegovega kroženja. Tako se poveča možnost trka s plinsko molekulo in s tem nastanka iona. Sčasoma se v celici ustvari osno simetričen oblak visokoenergijskih elektronov, katerih prostorski naboj spremeni električno polje v celici tako, da kaže radialno proti osi in je pravokotno na magnetno polje.^(3,5)

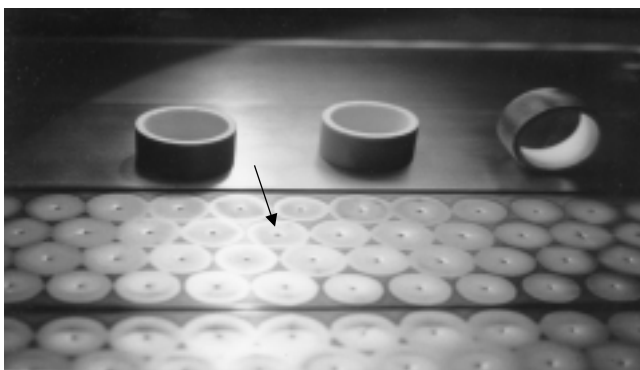
Magnetronska celica (slika 2) se od Penningove razlikuje po tem, da ima na osi anode dodatno katodno palico, ki povezuje stranski katodni plošči. Električno polje v tej celici je tako vseskozi radialno in ni odvisno od vzpostavitve oblaka elektronov kot v Penningovi celici. Razelektritev v magnetronski celici je zato veliko bolj stabilna od navadne Penningove



Slika 1: Prikaz črpanja v Penningovi celici ¹



Slika 2: Prikaz črpanja v magnetronski celici



Slika 3: Fotografija površine katod iz ionske črpalke. Na sliki so opazna močno erodirana področja na katodi (označeno s puščico), zaradi njenega stalnega obstreljevanja.

celice, pri nizkih tlakih pa razelektritev tudi hitreje vžge. Penningova celica ima poleg nestabilnosti⁽⁶⁾ in časovno zakasnjene vžiga razelektritve⁽⁷⁾ še druge slabosti v primerjavi z magnetronsko. Ioni, ki nastajajo v razelektritvi in se nato v električnem polju pospešijo, trkajo v ozko območje na stranskih katodah (slika 1), medtem ko je druga površina katode popolnoma neizkoriščena. Na mestu, kjer ioni trkajo v katodo, pride do močne erozije katodnega materiala, zato tam sčasoma nastanejo luknjice (slika 3), in taka katoda postane neuporabna. V magnetronski celici je situacija popolnoma drugačna. V njej poteka obstreljevanje in razprševanje osrednje katode po vsej njeni površini, medtem ko na stranskih katodnih ploščah pride celo do naprševanja razpršenega titana, zato sta lahko le-ti v magnetronski celici opuščeni, saj nimata takega pomena kot v Penningovi celici. Zaradi stalne erozije katodne palice v magnetronski celici je njena površina veliko bolj čista kot površina katod v Penningovi celici, kar ugodno vpliva na črpanje vodika.⁽⁸⁾ Vodik se namreč črpa z difuzijo v notranjost katod, ki je v primeru kontaminirane površine otežena.^(9,10)

Zaradi omenjenih prednosti magnetronskih celic pred Penningovimi in zaradi dejstva, da se na trgu dobijo le navadne Penningove črpalke, smo se odločili za konstrukcijo in preizkušanje nove črpalke, sestavljene iz magnetronskih celic.⁽¹¹⁾ Zaradi težav, ki nastopijo pri natančni poravnavi katodne palice z osjo anode,⁽¹²⁾ smo se odločili narediti črpalko, sestavljeno iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic.

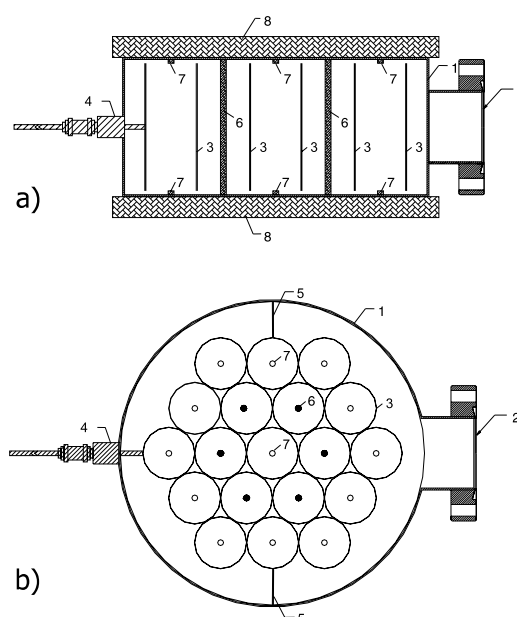
2 KONSTRUKCIJA EKSPERIMENTALNE MAGNETRONSKE IONSKO-RAZPRŠEVALNE ČRPALKE

Za preučevanje karakteristik magnetronske črpalke smo konstruirali preskusno črpalko, ki je bila sestavljena iz 19 celic (slika 3). Ohišje črpalke je bilo narejeno iz nerjavnega jekla debeline 1 mm. Anodni valji so bili narejeni iz 0,5 mm debele folije nerjavnega jekla AISI 314L. Z uporabo tankostenskih materialov smo pridobili pri manjši masi črpalke. Premer anodnih

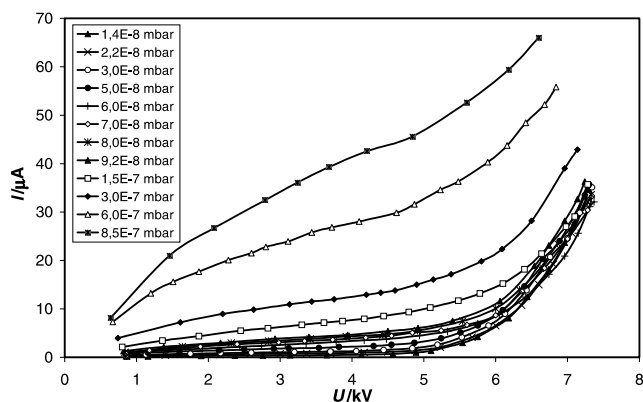
valjev je bil 27 mm, dolžina pa 66 mm. Na ohišje črpalke smo postavili Arnoldove feritne magnetne, ki jih je obdajal železni jarem, tako da smo v črpalke dosegli gostoto magnetnega polja okoli 0,15 T. Črpalka je bila sestavljena iz 13 Penningovih in 6 magnetronskih celic. Magnetronske celice so vsebovale okrogle titanove katodne palice debeline 3 mm. Stranski titanovi katodni plošči sta bili opuščeni. Namesto tega smo v Penningovih celicah uporabili majhne titanove čepke ϕ 3 mm, ki smo jih pričvrstili na ohišje črpalke na mestu, kjer os anodnih valjev seka ohišje črpalke in kjer poteka najintenzivnejše razprševanje katodnega materiala. Z opustitvijo stranskih katodnih plošč se je povečal razelektritveni volumen celice in zmanjšala masa črpalke. Premer črpalke je bil 158 mm.

3 EKSPERIMENT

Raziskovali smo odvisnost razelektritvenega toka in novi magnetronski črpalke od napetosti in tlaka. Črpalke smo s prirobnico CF40 namestili na vakuumski sistem, ki je bil črpan z ionsko črpalke Varian Starcell z nazivno črpalno hitrostjo 120 l/s. Za predčrpanje smo uporabili turbomolekularno in rotacijsko črpalke. Tlak v sistemu smo merili z Bayard-Alpertovim merilnikom tlaka, sestavo atmosfere pa z masnim spektrometrom. Z njim smo izvajali tudi kontrolo netesnosti. Da bi zmanjšali razplinjevanje sten in dosegli boljši vakuum, smo sistem predhodno pregrevali na 150 °C. Po pregrevanju sistema, ki je potekalo 40 h, smo dosegli končni tlak okoli $5 \cdot 10^{-9}$ mbar.



Slika 4: Shematični prikaz nove ionsko-razprševalne črpalke, sestavljene iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic: a) stranski ris in b) tloris: 1 – ohišje črpalke, 2 – prirobnica za pritrditev na vakuumski sistem CF40, 3 – anodni valj, 4 – visokonapetostna električna prevodnica, 5 – držalo, 6 – katodna palica, 7 – čep, 8 – magnet.⁽¹¹⁾



Slika 5: Razelektritveni tok v preskusni črpalki v odvisnosti od napetosti. Parameter je tlak v mbar.

Residualno atmosfero je pri tem tlaku sestavljal večinoma le še vodik, kar je pokazal masni spektrometer. Tlak v sistemu smo spreminjali z dovajanjem dušika v sistem skozi precizni dozirni ventil. Spreminjali smo ga v območju od $1 \cdot 10^{-8}$ mbar do $1 \cdot 10^{-6}$ mbar. Črpalko smo z visokonapetostno prevodnico priključili na napetost, ki smo jo lahko spreminjali od 1 kV do 7 kV.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Na sliki 5 prikazujemo odvisnost razelektritvenega toka I od napetosti U na anodi. Krivulje $I = I(U)$ so bile izmerjene pri različnih tlakih. Iz slike je razvidno, da tok z napetostjo narašča. Pri napetostih, nižjih od 5 kV, je tok zelo šibek, nato pa začne strmo naraščati. Večji razelektritveni tok pomeni močnejše razprševanje in s tem tudi boljše črpalno hitrost črpalke. Če želimo imeti v črpalki močno razelektritev, potem delovna napetost take črpalke ne bi smela biti nižja od 5 kV. Povezavo med jakostjo razelektritve I/p in črpalno hitrostjo S nam podaja zveza:⁽¹³⁾

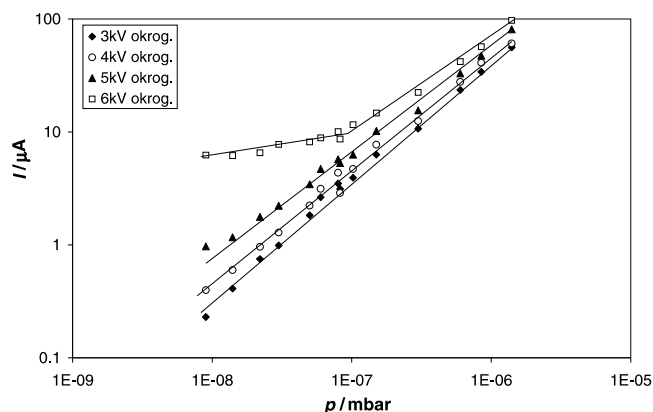
$$S = c \frac{I}{p}$$

kjer je p tlak in c konstanta, ki je odvisna od magnetnega polja, napetosti, geometrije celice in vrste plina.^(14,15) Za navadno črpalko za plin dušik je konstanta c pri 3 kV enaka $0,07$ mbar l / (s A), pri 6 kV pa $0,11$ mbar l / (s A).⁽¹⁴⁾ Z upoštevanjem zgornje enačbe lahko dobimo grobo oceno za črpalno hitrost črpalke, ki je pri 6 kV okoli 20 l / s.

S slike 5 je tudi razvidno, da pri višjih tlakih tečejo večji tokovi. Odvisnost toka od tlaka je prikazana na sliki 6. Kot vidimo, tok pri napetostih nižjih od 5 kV monotono narašča s tlakom, pri višjih napetostih pa pride na prehodu iz 10^{-8} mbar v 10^{-7} mbar do spremembe naklona krivulje.

5 SKLEP

V prispevku podajamo primerjavo črpalke, sestavljene iz Penningovih oziroma magnetronskih



Slika 6: Odvisnost toka od tlaka v preskusni črpalki. Parameter je anodna napetost.

celic. Magnetronske celice imajo določene prednosti pred klasičnimi Penningovimi, kot so stabilna razelektritev, večji razelektritveni tok in večja površina katode, izpostavljena razelektritvi, kar ugodno vpliva na njene črpalne lastnosti. Kot so pokazale preliminarne raziskave, lahko tako črpalko uporabimo za črpanje UVV-sistemov. Na osnovi sedanjih rezultatov nameravamo v nadaljevanju izmeriti črpalno hitrost preskusne črpalke, sestavljene iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic, in jo primerjati s črpalno hitrostjo navadne Penningove črpalke. V pripravi so tudi magnetronske črpalke z različnimi oblikami katodnih palic.

ZAHVALA

Raziskave je financiralo Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport v okviru projekta št. L2-4484. Zahvaljujemo se tudi podjetju Vacutech, d. o. o. za izdelavo preskusne črpalke.

6 LITERATURA

- ¹VARIAN, *Varian Vacuum Products, The Complete Solution To All Ion Pumping Needs*, Varian SpA, Torino, 1993
- ²J. M. Lafferty, *Foundations of Vacuum Science and Technology*, Wiley, New York, 1998
- ³R. L. Jepsen, *Appl. Phys.* **32** (1961), 2619-2626
- ⁴P. A. Redhead, *Can. J. Phys.* **36** (1958), 255-270
- ⁵W. Knauer, M. A. Lutz, *Appl. Phys. Lett.* **2** (1963), 109-111
- ⁶W. Schuurman, *Investigation of a Low Pressure Penning Discharge*, Ph. D. Thesis, Rotterdam, (1966)
- ⁷R. N. Peacock, N. T. Peacock, D. S. Hauschulz, *J. Vac. Sci. Technol.* **A9** (1991) 1978-1985
- ⁸M. Mozetič, B. Praček, A. Pregelj, B. Zorko, *Kovine, zlitine, tehnologije* **33** (1999), 1-2, 161-163
- ⁹J. H. Singleton, *J. Vac. Sci. Technol.* **6** (1969), 2, 316-321
- ¹⁰J. H. Singleton, *J. Vac. Sci. Technol.* **8** (1971), 1, 275-282
- ¹¹A. Vesel, M. Mozetič, *SI patent*, No. 20840 A2, (2002)
- ¹²H. Hartwig, J. S. Kouptsidis, *J. Vac. Sci. Technol.* **11** (1974), 1154-1159
- ¹³M. Pierini, *J. Vac. Sci. Technol.* **A2(2)** (1984), 195-197
- ¹⁴H. Hartwig, J. S. Kouptsidis, *J. Vac. Sci. Technol.* **11** (1974), 1154-1159
- ¹⁵W. Ho, R. K. Wang, T. P. Keng, *J. Vac. Sci. Technol.* **20** (1982), 1010-1013