

MAGNETRONSKA VAKUUMSKA ČRPALKA Z NOVO GEOMETRIJO KATOD

A MAGNETRON VACUUM PUMP WITH A NEW CATHODE GEOMETRY

Alenka Vesel, Miran Mozetič

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
alenka.vesel@ijs.si

Prejem rokopisa – received: 2004-09-07; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-10-25

Za doseganje ultravisokega vakuumu se najpogosteje uporabljajo ionsko razprševalne črpalke, saj jih odlikuje izredna čistost, ne povzročajo tresljajev in hrupa, imajo dolgo trajnostno dobo in majhno porabo energije. Vse črpalke, ki se dobijo na trgu, so narejene iz satovnice Penningovih celic, ki so sestavljene iz votlega anodnega valja, na koncu katerega se nahajata dve katodni plošči. V prispevku prikazujemo karakteristike nove črpalke, sestavljene iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic. Le-te se od Penningovih razlikujejo po tem, da se v valju nahaja še dodatna katodna palica. Uporabili smo titanovo katodno palico pravokotne oblike. Njene dimenzije so 1 mm × 6 mm. Namesto katodnih plošč smo v Penningovih celicah uporabili majhne titanove čepke, ki se nahajajo na ohišju črpalke. Gustota magnetnega polja v črpalci je bila 0,15 T. Merili smo razelektritveni tok v črpalci v območju med 1×10^{-9} mbar in 1×10^{-6} mbar. Tok je bil pri napetostih, manjših od 5 kV, zelo šibek, nato pa je z nadaljnjim večanjem napetosti hitro naraščal. Merili smo tudi črpalno hitrost hitrost črpalke. Maksimalna črpalna hitrost je bila okoli 16 L/s.

Ključne besede: UVV, magnetronska celica, Penningova celica, črpanje, črpalna hitrost, ionsko-razprševalna črpalka, pravokotna katoda

Sputter ion pumps are widely used for pumping ultra-high-vacuum systems because of their cleanliness, vibration-free operation, long pumping life and low power consumption. The pump consists of an assembly of Penning cells, made of an anode cylinder positioned between two cathode plates, perpendicular to the anode. In this paper we present the characteristics of a new pump that consisted of a combination of Penning and magnetron cells. In the anode cylinders of the magnetron cells a titanium cathode rod with a rectangular shape was used. Its dimensions were 1 mm × 6 mm. Small titanium discs were used in the Penning cells. The magnetic field density was 0.15 T. The discharge current was measured in the pressure range between 1×10^{-9} mbar and 1×10^{-6} mbar. The discharge current was very small at the voltages below 5 kV. With increasing the voltage over 5 kV it sharply increased. The pumping speed of the pump was also measured. The maximum pumping speed was about 16 L/s.

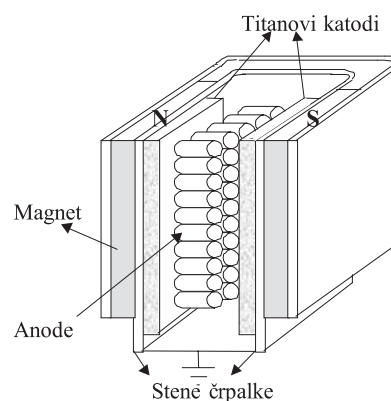
Key words: UHV, magnetron cell, Penning cell, pumping, pumping speed, sputter ion pump, rectangular cathode

1 UVOD

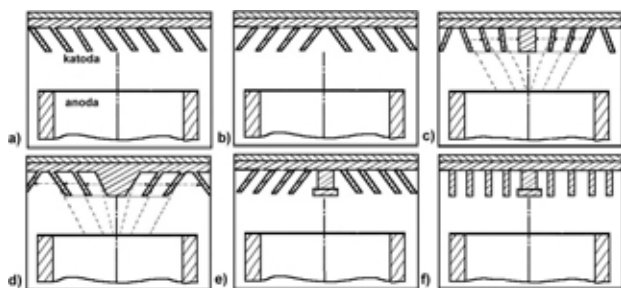
Uporaba ultravisokega vakuumu se je v zadnjih desetletjih razširila na mnoga področja, kot na primer v vesoljskih aplikacijah, pospeševalnikih delcev, v raznih napravah za analizo površin, v elektronski in masni spektroskopiji itd. Za doseganje ultravisokega vakuumu se najpogosteje uporabljajo ionsko razprševalne črpalke,¹ saj za svoje delovanje ne potrebujejo olj kot večina drugih črpalok, zato so izredno čiste in ni nevarnosti, da bi prišlo do onesnaženja vakuumskega sistema z oljnimi parami. Ker nimajo nobenih vrtečih se delov, ne povzročajo tresljajev in hrupa. Odlikuje jih tudi dolga trajnostna doba in majhna poraba energije. Največkrat se uporabljajo v tistih UVV-sistemih, ki se le občasno odpirajo.

Vse obstoječe črpalke so narejene iz satovnice Penningovih celic (slika 1), ki so sestavljene iz votlega anodnega valja, na koncu katerega se nahajata dve katodni plošči iz getskega materiala. Pod vplivom električnega polja pride v celici do nastanka razelektritve. Nastali ioni se pospešijo proti katodi in jo razpršujejo. Črpalni učinek dosežemo z reakcijo plinskih molekul z razpršenim katodnim materialom, ki se odlaga na notranje površine anodnega valja. Kot getski material

se je najbolje obnesel titan, ki se danes standardno uporablja, ali pa kombinacije titana in tantala (za črpanje žlahtnih plinov),^{2,3} čeprav so bile preizkušene tudi razne druge kombinacije materialov: Ti-Zr,⁴ Ti-Cu,⁵ Zr-Al.⁶ Kar se tiče geometrije katodnih plošč, so poskušali z različnimi konfiguracijami doseči čim večji vpadni kot ionov na površino,⁷⁻¹¹ ker je od tega odvisna količina razpršenega materiala. Vpadni kot so povečali tako, da



Slika 1: Shema ionsko razprševalne črpalke³
Figure 1: Schematic of ion sputtering pump³



Slika 2: Različne oblike katodnih plošč z lopaticami, nagnjenimi pod različnimi koti, kot so jih uporabili: Hall⁷ (a), Jepsen^{8,10} (b, c, d) in Rutherford (e, f)¹¹

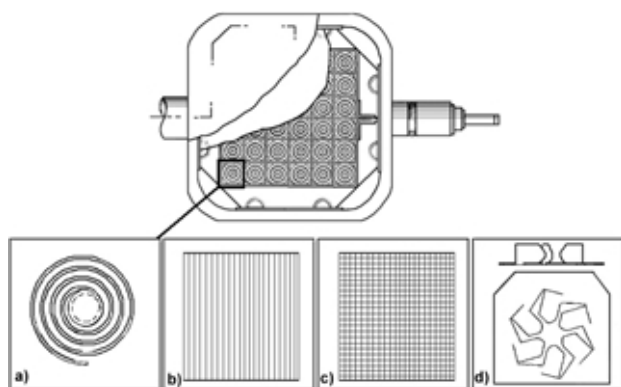
Figure 2: Various types of cathodes with slats as used by Hall⁷ (a), Jepsen^{8,10} (b, c, d) and Rutherford (e, f)¹¹

so na katodne plošče dodali lopatice, ki so bile nagnjene pod različnimi koti glede na normalo na površino katode (slika 2 a in b).⁹ Na osi katod, kjer je močna erozija, so dodali dodatne vstavke, s katerimi so podaljšali trajnostno dobo katodnih plošč (slika 2 c – f). Lopatice so lahko bile v obliki spirale (slika 3 a), koncentričnih krogov, katerih naklon se je z naraščajočim radijem spreminjal, ali pa v obliki rešeta (slika 3 b, c).^{8,10,11} Od tega se danes še vedno največ uporabljajo navadne ravne katodne plošče, plošče v obliki rešeta (triodne črpalke), zvezde (starcell – črpalke) (slika 3 d)¹² in spirale (galaxy – črpalke) (slika 3 a).¹³

V prispevku prikazujemo karakteristike nove črpalke, sestavljene iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic. Le-te se od Penningovih razlikujejo po tem, da se v valju nahaja še dodatna katodna palica.

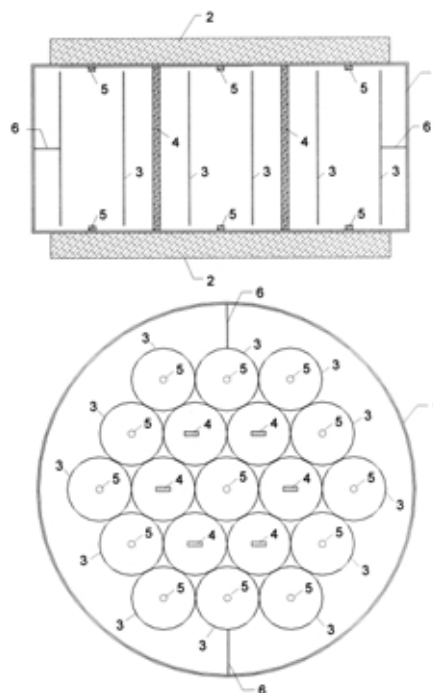
2 KONSTRUKCIJA NOVE ČRPALKE

Preskusna črpalka je bila narejena iz kombinacije 13 Penningovih in 6 magnetronskih celic (slika 4). Te so bile sestavljene iz anodnih valjev, izdelanih iz 0,5 mm debele folije nerjavnega jekla AISI 314L, v njih pa so se



Slika 3: Shema črpalke s katodami, katere lopatice so razporejene: a) v obliki spirale (Galaxy[®] Duniway),¹³ b) in c) v obliki rešeta^{8,10,11} ter d) v obliki zvezde (Starcell[®] Varian)¹²

Figure 3: Schematic of a pump with cathodes like: a) open spiral (Galaxy[®] Duniway),¹³ b), c) open grid^{8,10,11} and d) radially arranged blades (Starcell[®] Varian)¹²



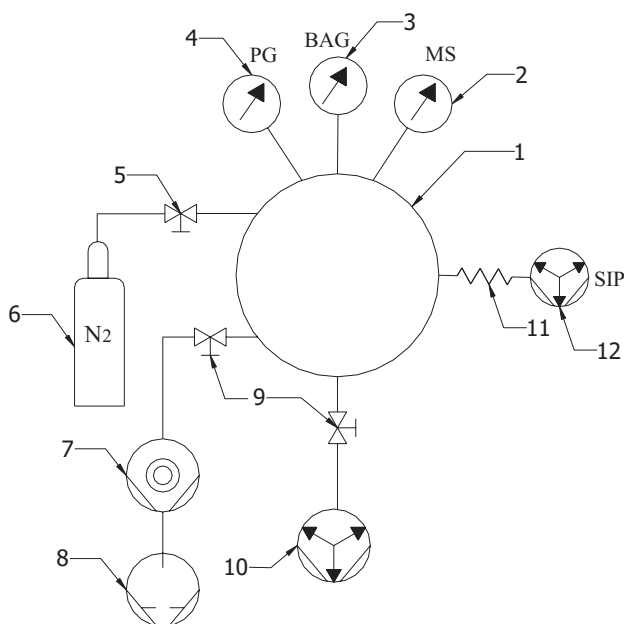
Slika 4: Shema konstrukcije ionske črpalke s kvadratnimi katodnimi palicami: 1 – ohišje črpalke, 2 – magnet, 3 – anodni valji, 4 – ploščate titanove katodne palice, 5 – titanovi čepki, 6 – izolator

Figure 4: Schematic of the construction of an ion pump with rectangular cathodes: 1 – body of the pump, 2 – magnet, 3 – anode cylinders, 4 – rectangular titanium cathode rods, 5 – titanium discs, 6 – insulator

nahajale pravokotne titanove katodne palice dimenzij 1 mm × 6 mm. Premer anodnih valjev je bil 27 mm, dolžina pa 66 mm. Celice so bile zaprte v ohišje črpalke, ki je bilo narejeno iz nerjavnega jekla debeline 1 mm. Namesto katodnih plošč smo v Penningovih celicah uporabili majhne titanove čepke, ki so bile na ohišju črpalke. Z uporabo tankostenskih materialov smo dobili manjšo maso črpalke. Masa črpalke, katere premer je bil 158 mm, je bila 1 kg. Na ohišju črpalke so bili Arnoldovi feritni magneti, ki jih je obdajal železni jarem, tako da smo v črpalki dosegli jakost magnetnega polja okoli 0,15 T.

3 EKSPERIMENTALNI SISTEM

Raziskovali smo odvisnost razelektritvenega toka v novi črpalke od napajalne napetosti in tlaka ter njeno črpalno hitrost. Shema eksperimentalnega sistema je prikazana na sliki 5. Črpalke smo s prirobnico CF40 spojili z vakuumskim sistemom, 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. Da bi zmanjšali razplinjevanje sten in dosegli boljši vakuum, smo sistem predhodno pregrevali na 150 °C. Po pregrevanju sistema, ki je potekalo 30 h, smo dosegli končni tlak okoli 5×10^{-9} mbar.



Slika 5: Eksperimentalni sistem: 1 – eksperimentalna komora, 2 – masni spektrometer, 3 – Bayard Alpertov merilnik tlaka, 4 – Piranijev merilnik tlaka, 5 – dozirni UVV-ventil, 6 – jeklenka z dušikom, 7 – turbomolekularna črpalka, 8 – rotacijska črpalka, 9 – ploščni UVV-ventil, 10 – ionsko-razprševalna črpalka Varian Starcell 150, 11 – meh, 12 – preskusna ionska črpalka

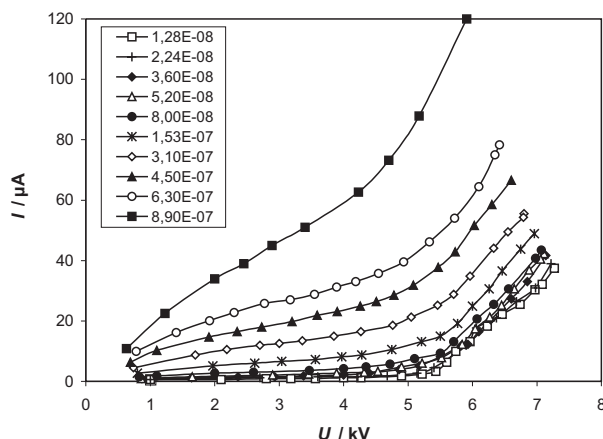
Figure 5: Experimental setup: 1 – experimental chamber, 2 – mass spectrometer, 3 – Bayard Alpert gauge, 4 – Pirani gauge, 5 – UHV valve, 6 – nitrogen, 7 – turbomolecular pump, 8 – rotary pump, 9 – UHV valve, 10 – ion pump Varian Starcell 150, 11 – flexible hose, 12 – experimental ion pump

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 1×10^{-8} mbar do 1×10^{-6} mbar. Napetost na anodah črpalke smo spreminjali v območju od 1 kV do 7 kV.

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Odvisnost razelektritvenega toka od anodne napetosti prikazujemo na **sliki 6**. Prikazane karakteristike $I(U)$ so bile izmerjene pri različnih tlakih v območju med 1×10^{-8} mbar in 9×10^{-7} mbar. S slike je razvidno, da je razelektritveni tok pri nizkih napetostih zelo majhen, pri napetosti okoli 5 kV pa začne strmo naraščati z naraščajočo napetostjo. Tako je bil tok pri tlaku 3×10^{-8} mbar in napetosti do 5 kV le 7 μ A, pri 6 kV pa že 21 μ A. Podobno odvisnost toka od napetosti smo dobili tudi v črpalci, ki je imela okrogle katodne palice namesto pravokotnih.¹⁴

Na **sliki 7** je prikazana odvisnost črpalne hitrosti od tlaka. Črpalno hitrost smo merili pri napetosti 6 kV. Določili smo jo z merjenjem končnega tlaka (p), ki ga je pri danem vpuščanju plina dušika (Q) lahko vzdrževala preskusna črpalka, pri čemer je bila Varianova ionska



Slika 6: Razelektritveni tok v črpalci v odvisnosti od anodne napetosti. Parameter je tlak v območju od 1×10^{-8} mbar do 9×10^{-7} mbar. Jakost magnetnega polja je 0,15 T.

Figure 6: The discharge current of a pump versus the anode voltage, measured in the pressure range between 1×10^{-8} mbar and 9×10^{-7} mbar. The magnetic field density is 0.15 T.

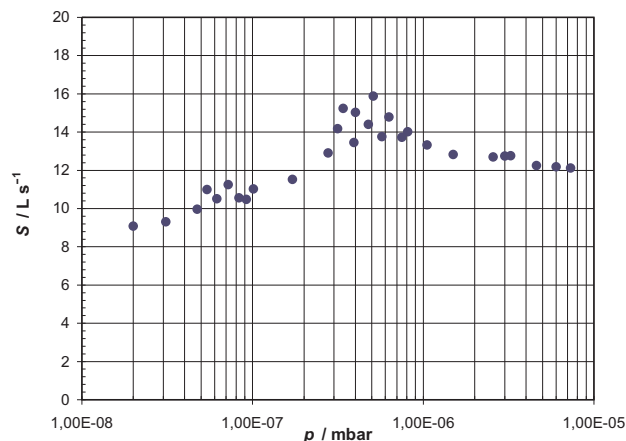
črpalka izklopljena. Črpalno hitrost (S) smo nato izračunali po enačbi (1):¹

$$S = \frac{Q}{p} \quad (1)$$

S **slike 7** je razvidno, da črpalna hitrost narašča s tlakom, doseže maksimum pri tlaku okoli 4×10^{-7} mbar, nato pa nekoliko pade. Maksimalna črpalna hitrost je bila okoli 16 L/s, pri nižjih tlakih pa okoli 12 L/s.

5 SKLEPI

V prispevku prikazujemo novo ionsko razprševalno črpalko, sestavljeno iz kombinacije Penningovih in magnetronskih celic, pri čemer so magnetronske celice vsebovale pravokotne katodne palice. Meritve toka v odvisnosti od anodne napetosti so pokazale, da mora biti minimalna delovna napetost najmanj 5 kV, saj je tok pri nižjih napetostih prešibek. Pri napetostih, višjih od 5 kV,



Slika 7: Črpalna hitrost preskusne črpalke v odvisnosti od tlaka

Figure 7: Pumping speed of a new pump versus the pressure

pa strmo naraste. Črpalka doseže maksimalno črpalno hitrost pri tlaku 4×10^{-7} mbar, torej nižje od navadnih Penningovih črpalk, ki dosežejo maksimum v območju 10^{-6} mbar. To napeljuje na misel, da bi lahko črpalke, sestavljene iz samih magnetronskih celic, imele maksimum pri še nižjem tlaku, torej v UVV-območju, kar bi ugodno vplivalo na doseganje nizkih končnih tlakov. Maksimalna črpalna hitrost preskusne črpalke je bila 16 L/s, kar da približno 0,85 L/s na eno celico.

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 ter podjetju Akrapovič – Exhaust system technology za vzorce titana.

6 LITERATURA

- ¹ Lafferty J. M., *Foundations of Vacuum Science and Technology*, Wiley, New York, 1998
- ² Tom T., James B. D., *J. Vac. Sci. Technol.*, 6 (1969), 304–307
- ³ VARIAN, Varian Vacuum Products, *The Complete Solution to All Ion Pumping Needs*, Varian SpA, Torino, 1993
- ⁴ Hall L. D., *J. Vac. Sci. Technol.*, 6 (1969), 44–47
- ⁵ Komiya S., Yagi N., *J. Vac. Sci. Technol.*, 6 (1969), 54–57
- ⁶ Okano T., Ohsaki A., Tuzi Y., *J. Vac. Sci. Technol.*, A2 (1984), 191–194
- ⁷ Hall L. D., *US patent*, 2.993.638, (1961)
- ⁸ Jepsen R. L., *US patent*, 3.070.719, (1962)
- ⁹ Jepsen R. L., *US patent*, 3.147.910, (1964)
- ¹⁰ Jepsen R. L., *US patent*, 3.331.975, (1967)
- ¹¹ Rutherford S. L., *US patent*, 3.091.717, (1963)
- ¹² Pierini M., *US patent*, 4.631.002, (1986)
- ¹³ Rutherford S. L., *US patent*, 6.004.104, (1999)
- ¹⁴ Vesel A., Mozetič M., *Materiali in tehnologije*, 37 (2003) 5, 221–223