

KARAKTERISTIKE MAGNETRONSKEGA IONIZACIJSKEGA MERILNIKA S HLADNO KATODO V VISOKOVAKUUMSKEM (VV) IN ULTRA VISOKOVAKUUMSKEM (UVV) PODROČJU

CHARACTERISTICS OF A MAGNETRON COLD-CATHODE IONIZATION GAUGE IN THE HIGH-VACUUM (HV) AND ULTRA HIGH-VACUUM (UHV) RANGES

Bojan Erjavec, Janez Šetina, Lidija Irmančnik-Belič

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija
bojan.erjavec@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2001-08-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-08-28

Model merilne glave z navadno magnetronsko geometrijo je bil konstruiran na osnovi standardne miniaturne ionsko-razprševalne črpalke z dodatnimi spremembami, kot so: bakreni katodni plošči, katodna palica iz nerjavnega jekla, električno izolirano ohišje, visokonapetostna prevodnica z veliko električno prebojno trdnostjo in oklopljen magnet iz zlitine Sm-Co. Zadnje tri spremembe so omogočile natančne meritve razelektritvenih tokov od 0,1 nA do 20 μ A. Karakteristike magnetronske celice so bile izmerjene z referenčnim ekstraktorskim merilnikom na UVV kalibracijskem sistemu za primerjavo merilnikov. Za preskusne pline smo izbrali dušik, vodik, argon in helij. Najprej smo izmerili jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti znotraj področja 10 kV pri različnih tlakih, izbranih v območju od 1×10^{-9} do 1×10^{-6} mbar. Potek jakosti razelektritve je približno enak za vse preskusne pline. Maksimum jakosti razelektritve, ki je izmerjen pri višjem tlaku, je pomaknjen k višji anodni napetosti. Nato smo izmerili razelektritveni tok v odvisnosti od tlaka dušika v UVV in VV področju pri različnih delovnih napetostih, izbranih v območju od 2,5 do 4,5 kV. Optimalna karakteristika razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka je bila izmerjena pri delovni napetosti 3,5 kV in se lahko aproksimira s potenčno funkcijo z eksponentom $n = 1,28$. V VV področju je bila pri različnih delovnih napetostih ugotovljena tudi črpalna hitrost magnetronske celice z merjenjem ravnotežnega tlaka dušika, kjer smo uporabili viskozno merilnik z lebdečo kroglico, in ravnotežnega pretoka dušika z metodo hitrosti naraščanja tlaka. Pri tlaku dušika 1×10^{-6} mbar in delovni napetosti 3,5 kV je občutljivost magnetronske celice 9,3 A/mbar in ustrezna črpalna hitrost 0,6 l/s.

Ključne besede: magnetronska celica, jakost razelektritve, potencialna porazdelitev, radialna električna poljska jakost, prečno polje, nelinearnost, nezveznosti

A model magnetron gauge was constructed based on the small-size 2 l/s sputter-ion Varian-type pump with additional changes, such as: copper cathode plates, a stainless-steel cathode rod, an electrically insulated housing, a highly electrically insulated high-voltage feed-through and a low stray-field Sm-Co magnet. The last three changes enabled accurate measurements of discharge currents from 0,1 nA to 20 μ A. The magnetron cell characteristics were measured against a reference extractor gauge on a UHV gauge comparison system. Nitrogen, hydrogen, argon and helium were selected as the test gases. First, the discharge intensity was measured vs anode voltage in the 10 kV range at different pressures selected in the range from 1×10^{-9} to 1×10^{-6} mbar. The discharge intensity behaviour was similar for all test gases. A maximum discharge intensity was measured at the higher pressure is shifted towards the higher anode voltage. Then the measuring of discharge current vs nitrogen pressure in UHV and HV at different operating voltages selected in the range from 2,5 to 4,5 kV was followed. An optimum discharge current vs pressure characteristic was measured at an operating voltage of 3,5 kV. It can be approximated, using a power law, with an exponent $n = 1,28$. A magnetron cell pumping speed in HV was also determined at different operating voltages by measuring the equilibrium nitrogen pressure using a spinning rotor gauge and an equilibrium nitrogen flow rate using the rate of pressure-rise method. At a nitrogen pressure of 1×10^{-6} mbar and an operating voltage of 3,5 kV, the magnetron-cell sensitivity and pumping speed are 9,3 A/mbar and 0,6 l/s, respectively.

Keywords: magnetron cell, discharge intensity, potential distribution, radial electric-field strength, crossed-field, non-linearity, discontinuities

1 UVOD

1.1 Primerjava magnetronske in Penningove geometrije

Model ionizacijskega merilnika s hladno katodo, ki temelji na magnetronski geometriji elektrodnega sistema, je prikazan na **sliki 1**. Osnova je Penningova celica, pri kateri elektrodni sistem sestavljajo kovinski katodni plošči in kovinski anodni valj, ki je vstavljen z osjo, pravokotno med njiju. Za magnetronsko geometrijo je potrebno, da sta katodni plošči mehansko in električno povezani s kovinsko palico, ki je v osi anodnega valja.

Za vzpostavitev prečnega električnega in magnetnega polja ter prostorskega naboja toka krožečih elektronov, ki je potreben za vzdrževanje razelektritve, moramo merilno glavo postaviti v homogeno magnetno polje, ki je usmerjeno vzdolž osi anodnega valja, in med elektrodi priključiti visoko napetost.

Rešitev Poissonove enačbe za dolgoanodno magnetronsko razelektritveno celico, upoštevajoč klasično mobilnost elektronov v prečnem polju in enakomerno porazdeljen prostorski naboj toka krožečih elektronov v prostoru med katodno palico z radijem r_c ter ničelnim

potencialom in anodnim valjem z radijem r_a ter potencialom V_a , je električni potencial $V(r)$ z naslednjo radialno odvisnostjo ¹:

$$V(r) = [V_a - (3e/16m)\beta B^2(r_a - r_c)^2][1/\ln(r_a/r_c)]\ln(r/r_c) + (3e/16m)\beta B^2(r - r_c)^2 \quad (1)$$

kjer je e osnovni naboj, m masa elektrona, B gostota magnetnega polja in β verjetnost za ionizacijo plinske molekule pri trku z elektronom. Ustrezno radialno električno poljsko jakost E_r , ki poleg gostote magnetnega polja določa kinetično energijo elektronov in višino cikloidnih skokov med kroženjem elektronov, predstavlja naslednji izraz:

$$E_r = [V_a - (3e/16m)\beta B^2(r_a - r_c)^2][1/\ln(r_a/r_c)]1/r + (3e/8m)\beta B^2(r - r_c) \quad (2)$$

Z meritvami karakteristik Penningovih merilnikov se je izkazalo, da je verjetnost za ionizacijo odvisna od tlaka ^{2,3}. Z naraščanjem tlaka pri konstantni anodni napetosti in naraščanjem verjetnosti za ionizacijo se v izrazih (1) in (2) zmanjšuje vpliv prvega člena in povečuje vpliv drugega. Pri nekem tlaku, pri katerem je:

$$V_a = (3e/16m)\beta B^2(r_a - r_c)^2 \quad (3)$$

postane potencialni profil parabolične oblike in radialna električna poljska jakost linearno odvisna od radija, kar je značilno za dolgoanodno Penningovo celico na prehodu iz LMF (low magnetic field)- v HMF (high magnetic field)-področje ⁴. Pri izpolnitvi pogoja (3) je radialna električna poljska jakost tik ob katodni palici enaka nič in je tako dosežena maksimalna jakost razelektritve. Jakost razelektritve je opredeljena z razmerjem med razelektritvenim tokom in tlakom ¹. Z nadaljnjim naraščanjem tlaka postane delovanje magnetronske celice podobno delovanju Penningove celice v HMF-načinu, pri katerem se elektronski oblak preseli v tanko plast ob anodnem valju, kar ima za posledico, da se anodni padec zoži in radialna električna poljska jakost močno poveča. Istočasno se v bližini katodne palice vzpostavi nevtralna plazma kot posledica konstantnega potenciala, ki je blizu ničelnega katodnega potenciala. Tako kot pri delovanju Penningove celice v HMF-načinu so tudi za magnetronsko celico značilne nezveznosti razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka, ki se izražajo v oscilacijah in nenadnih spremembah ter so posledica nestabilnosti razelektritve oziroma različnih načinov razelektritve v tanki plasti, ki je ob anodnem valju ⁵.

Pri nizki anodni napetosti, ki je višja od vžigne, deluje magnetronska celica v HMF-načinu. Z zviševanjem anodne napetosti pri konstantnem tlaku prehaja magnetronska celica iz HMF- v LMF-način delovanja. Z nadaljnjim zviševanjem anodne napetosti, ki je višja od tiste, ki je potrebna za izpolnjevanje pogoja (3) za prehod iz HMF- v LMF-področje, pričinja v izrazih (1) in (2) prevladovati prvi člen. Radialna električna poljska jakost ob katodni palici pričinja istočasno močno naraščati. Pri tem se zelo povečata kinetična energija

začetnih elektronov in višina cikloidnih skokov (v primeri z razdaljo med katodno palico ter anodnim valjem), kar ima za posledico močno dušenje jakosti razelektritve v magnetronski celici ¹. Pri dolgo-anodni Penningovi celici se jakost razelektritve z zviševanjem anodne napetosti ne spreminja, ker zaradi istočasnega zviševanja potenciala virtualne katode v osi anodnega valja radialna električna poljska jakost ostaja nespremenjena ⁴.

1.2 Nelinearnost razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka

Pri magnetronski celici je jakost razelektritve odvisna od gostote magnetnega polja, dimenzij razelektritvene celice, delovne napetosti in praktično tudi od tlaka izbranega plina. Z meritvami se je namreč izkazalo, da razelektritveni tok ni linearno odvisen od tlaka ⁵. Vzrok za nelinearno odvisnost je spreminjanje gostote elektronov s tlakom v prečnem električnem in magnetnem polju zaradi anomalne difuzije elektronov proti anodnem valju, ki je neodvisna od tlaka ⁵ in je posledica kolektivnih interakcij pri razelektritvi ². Navadno se lahko razelektritveni tok I_D v odvisnosti od tlaka P aproksimira s potenčno funkcijo:

$$I_D = kP^n \quad (4)$$

oziroma jakost razelektritve z naslednjim izrazom:

$$I_D/P = kP^{n-1} \quad (5)$$

pri čemer je k sorazmernostna konstanta, ki je odvisna od gostote magnetnega polja, dolžine razelektritvene celice in vrste plina, ter n eksponent, ki je nekaj večji od 1 in odvisen od gostote magnetnega polja, delovne napetosti ter radija razelektritvene celice ⁶.

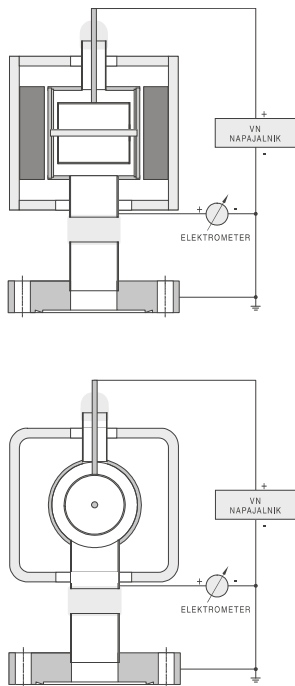
1.3 Namen raziskave

Zaradi velikega števila parametrov, ki pri magnetronskem ionizacijskem merilniku s hladno katodo vplivajo na jakost razelektritve oziroma razelektritveni tok, je bil namen dela, o katerem poročamo v tem članku, raziskati pri konstantni gostoti magnetnega polja in nespremenjenih dimenzijah razelektritvene celice njuno odvisnost od anodne napetosti pri različnih tlakih preskusnega plina. Jakost razelektritve oziroma razelektritveni tok smo raziskali tudi v odvisnosti od tlaka preskusnega plina pri različnih delovnih napetostih. Črpalno hitrost magnetronske celice smo ugotovili z merjenjem ravnotežnega tlaka in pretoka preskusnega plina. Pri merjenju slednjega smo uporabili metodo hitrosti naraščanja tlaka.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Konstrukcija merilne glave

Model merilne glave z navadno magnetronsko geometrijo smo konstruirali na osnovi standardne majhne



Slika 1: Vzdolžni (zgoraj) in prečni prerez (spodaj) modela ionizacijskega merilnika s hladno katodo, ki temelji na navadni magnetronski geometriji

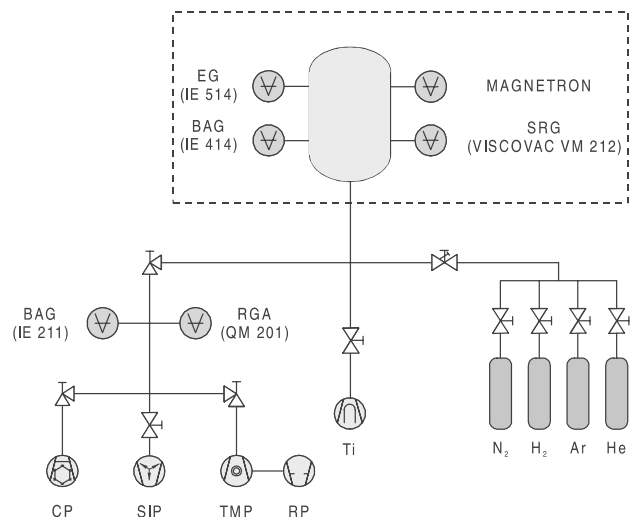
Figure 1: Longitudinal (above) and transverse section (below) of a model cold-cathode ionization gauge based on normal magnetron geometry

ionsko-razprševalne črpalke z nominalno črpalno hitrostjo 2 l/s. Konstrukcija merilne glave je prikazana na **sliki 1**. Razelektritveno celico sestavljajo anodni valj iz nerjavnega jekla z notranjim premerom 24 mm in dolžino 29 mm ter katodni plošči iz bakra, ki sta med seboj oddaljeni 33 mm in sta v mehanskem ter električnem stiku z ohišjem merilne glave. Velikost reže med posamezno katodno ploščo in anodnim cilindrom je 2 mm. Katodni plošči sta mehansko in električno povezani s palico iz nerjavnega jekla s premerom 2 mm. Ohišje merilne glave je električno izolirano od priključne CF-prirobnice s cevnim steklo-kovinskim spojem. Uporabljena je visokonapetostna prevodnica z veliko električno prebojno trdnostjo, ki je izvedena s posebnim steklo-kovinskim spojem. Ločitev katodnih plošč od ozemljitve in uporaba natančnega elektrometra, ki smo ga priključili med ohišje merilne glave ter ozemljitev, ter stabiliziranega visokonapetostnega napajalnika, ki smo ga priključili med ozemljitev in anodni valj, so nam omogočili natančne meritve razelektritvenih tokov v območju od 0,1 nA do 20 μ A. Ohišje obdaja oklopljen magnet iz zlitine Sm-Co z gostoto magnetnega polja približno 0,13 T. Uporabljeni magnet je povzročal zelo majhno motnjo v okolici. S tem smo se izognili možnim napakam pri merjenju tlaka z ekstraktorskim merilnikom. Izbrani magnet se zaradi svojih dimenzij (v primeri s premerom katodnih plošč) odlikuje tudi s homogenostjo magnetnega polja v razelektritveni celici.

Ocenjena prevodnost kovinske cevi z notranjim premerom 19 mm in dolžino 50 mm (vključujoč cevni steklo-kovinski spoj), ki povezuje ohišje merilne glave s priključno CF-prirobnico, je približno 17 l/s, kar nam je omogočilo direktno merjenje črpalne hitrosti magnetronske celice.

2.2 Vakuumski kalibracijski sistem

Merjenje karakteristik magnetronske celice je potekalo na UVV kalibracijskem sistemu za primerjavo merilnikov, ki je prikazan na **sliki 2**. Sistem je sestavljen iz kovinske preskusne komore s prostornino približno 6 l, kovinskega črpalnega sistema in kovinskega razdelilnega sistema z dozirnimi ventili za uvajanje preskusnih plinov (Ar, N₂, He in H₂) v vakuumski sistem. Na preskusno komoro s CF-prirobnicami smo priključili magnetronski ionizacijski merilnik s hladno katodo, ki je bil namenjen za preiskovanje karakteristik, ekstraktorski merilnik IE 514 (ionizacijski merilnik z vročo katodo s spodnjo merilno mejo - "rentgensko" mejo, nižjo od 1×10^{-12} mbar), s katerim smo izvajali kalibracije v območju tlakov od 1×10^{-10} do 1×10^{-5} mbar, in viskoznostni merilnik z lebdečo kroglico VISCOVAC VM 212, ki smo ga uporabljali kot referenčni etalon. S slednjim smo pri višjih tlakih (1×10^{-6} mbar) kalibrirali ekstraktorski merilnik in nato predpostavili njegovo konstantno občutljivost pri nizkih tlakih. Preskusno komoro smo med termičnim razplinjevanjem črpali s turbomolekularno in krio črpalko ter med potekom meritev s krio in pomožno titanovo sublimacijsko črpalko. Po termičnem razplinjevanju preskusne komore smo v njej vzpostavili končni tlak 1×10^{-10} mbar, pri čemer je preostalo atmosfero v glavnem sestavljala vodik.



Slika 2: UVV kalibracijski sistem za primerjavo merilnikov, ki vsebuje preskusno vakuumsko komoro, opremljeno z ekstraktorskim merilnikom in viskoznostnim merilnikom z lebdečo kroglico, in plinski uvajalni sistem z dozirnimi ventili

Figure 2: Gauge comparison UHV calibration system comprising a test chamber, equipped with an extractor gauge and a spinning rotor gauge, and a gas manifold with a leak valve

2.3 Način izvajanja meritev

Uvodoma smo pojasnili, da sta jakost razelektritve oziroma razelektritveni tok odvisna od gostote magnetnega polja, dimenzij razelektritivne celice, delovne napetosti ter tlaka izbranega plina. Zaradi velikega števila parametrov in uporabe standardnih magnetov smo v našem primeru obdržali konstantno gostoto magnetnega polja in dimenzije razelektritivne celice. Najprej smo izmerili razelektritveni tok v odvisnosti od anodne napetosti, ki smo jo v območju od 1 do 10 kV povečevali v koraku po 0,5 kV pri konstantnih tlakih približno 1×10^{-9} , 1×10^{-8} , 1×10^{-7} in 1×10^{-6} mbar. Za preskusni plin smo izbrali dušik in vodik ter argon in helij, ki so sestavljeni iz dvoatomnih molekul oziroma enoatomnih molekul, hkrati pa se zelo razlikujejo po ionizacijski zmogljivosti. Slednja je odvisna od kinetične energije elektronov in se navaja kot število ioniziranih molekul na en elektron ter na 1 cm poti pri 1,33 mbar in 0°C ⁷.

Pri različnih delovnih napetostih, ki smo jih izbirali v območju od 2,5 do 4,5 kV, smo izmerili razelektritveni tok v odvisnosti od tlaka, ki smo ga v območju od 1×10^{-10} do 1×10^{-5} mbar poviševali kvazi-zvezno (z izbiro tudi do 10 točk na dekada).

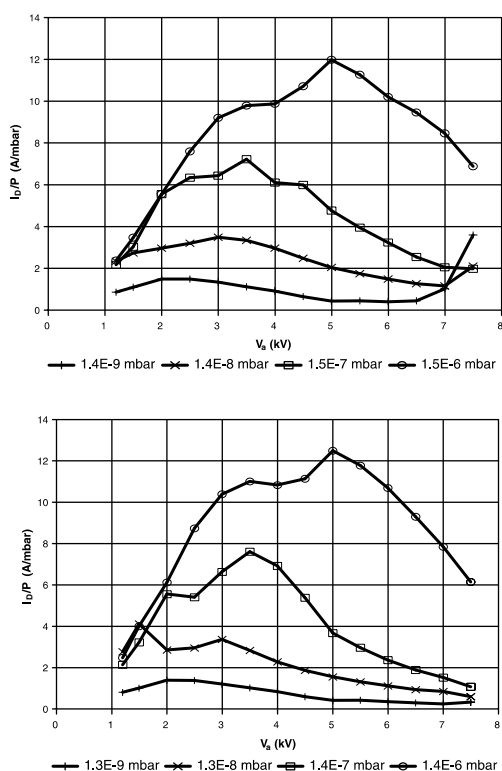
Po merjenju razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka preskusnega plina pri različnih delovnih napetostih smo pri določenem tlaku, izbranem v območju od 5×10^{-7}

do 2×10^{-6} mbar, in enakih delovnih napetostih ugotovili črpalno hitrost magnetronske celice. V preskusni komori, ločeni od vakuumskih črpalk, smo pri delujočem magnetronskega merilniku in izključenem ekstraktorskega merilniku vzpostavili ravnotežni tlak, ki smo ga izmerili z viskoznošnim merilnikom z lebdečo kroglico, poznanim po svoji inertnosti, natančnosti in stabilnosti. Pri merjenju ravnotežnega pretoka izbranega plina smo uporabili metodo hitrosti naraščanja tlaka. V preskusni komori z znanim volumnom smo pri nedelujočem magnetronskega merilniku in izključenem ekstraktorskega merilniku izmerili časovno naraščanje tlaka z uporabo viskoznošnega merilnika z lebdečo kroglico. Volumen preskusne komore smo predhodno izmerili z metodo statične ekspanzije.

3 REZULTATI

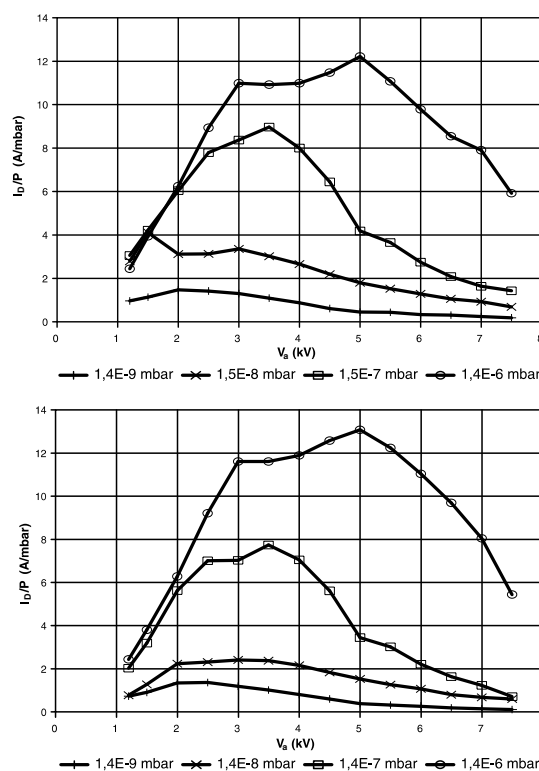
3.1 Merjenje jakosti razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti

Rezultati meritev jakosti razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih izbranih plinov v UVV in VV področju so prikazani na slikah 3 in 4. Na prvi sliki je prikazana jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih dušika (zgoraj) in približno enakih tlakih vodika, izraženih v ekvivalentih



Slika 3: Jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih dušika v UVV in UV področju (zgoraj) in približno enakih tlakih vodika, izraženih v ekvivalentih dušika (spodaj)

Figure 3: Discharge intensity vs anode voltage at different pressures of nitrogen in UHV and HV (above) and similar pressures of hydrogen expressed in terms of nitrogen equivalent (below)



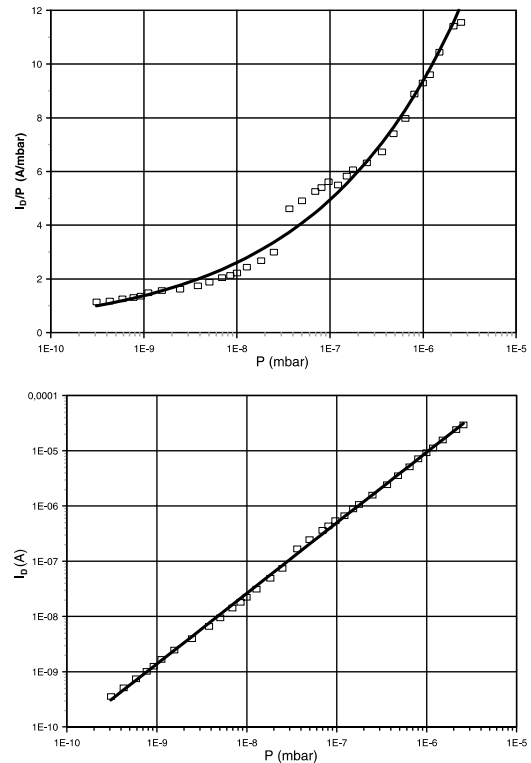
Slika 4: Jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih argona (zgoraj) in helija (spodaj) v UVV in VV, izraženih v ekvivalentih dušika

Figure 4: Discharge intensity vs anode voltage at different pressures of argon (above) and helium (below) in UHV and HV, expressed in terms of nitrogen equivalent

dušika (spodaj). Na drugi sliki je prikazana jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih argona (zgoraj) in helija (spodaj), približno enakim tlakom dušika, če so izraženi v ekvivalentih dušika. Za vse vrste plinov in pri vseh izbranih tlakih je značilno naraščanje jakosti razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti do maksimuma, ki je pri višjih tlakih pri višji anodni napetosti. Tako je pri tlaku približno 1×10^{-9} mbar (ekvivalent N_2) dosežena maksimalna jakost razelektritve pri anodni napetosti približno 2 kV in pri tlaku približno 1×10^{-6} mbar (ekvivalent N_2) pri anodni napetosti približno 5kV. Po dosegu maksimalne vrednosti pri vseh tlakih z nadaljnjim zviševanjem anodne napetosti jakost razelektritve zopet pojema (približno enako hitro, kot v začetku narašča).

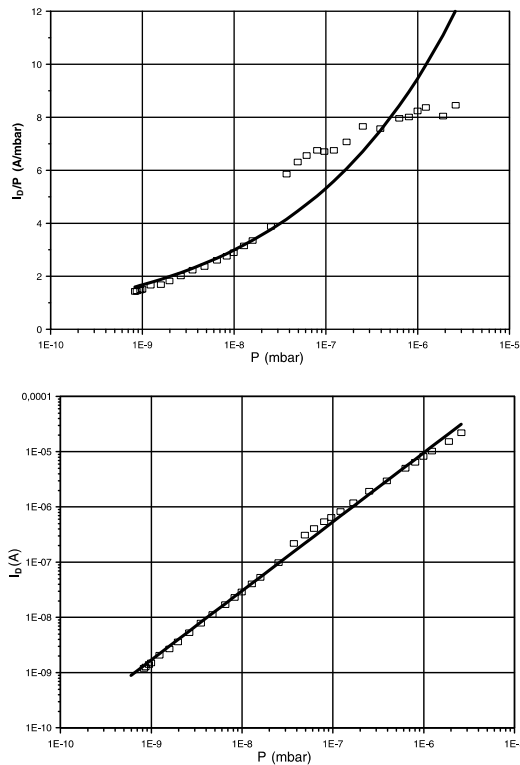
3.2 Merjenje jakosti razelektritve v odvisnosti od tlaka

Zaradi približno enakega poteka jakosti razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti za vse vrste preskusnih plinov smo se za nadaljnje merjenje karakteristik magnetronske celice odločili uporabiti dušik. Rezultati meritev jakosti razelektritve oziroma razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka dušika pri delovnih napetostih 2,5, 3,5 in 4,5 kV so prikazani na slikah 5, 6 in 7. Na vseh slikah je zgoraj prikazana jakost razelektritve v odvisnosti od logaritma tlaka dušika pri izbrani delovni



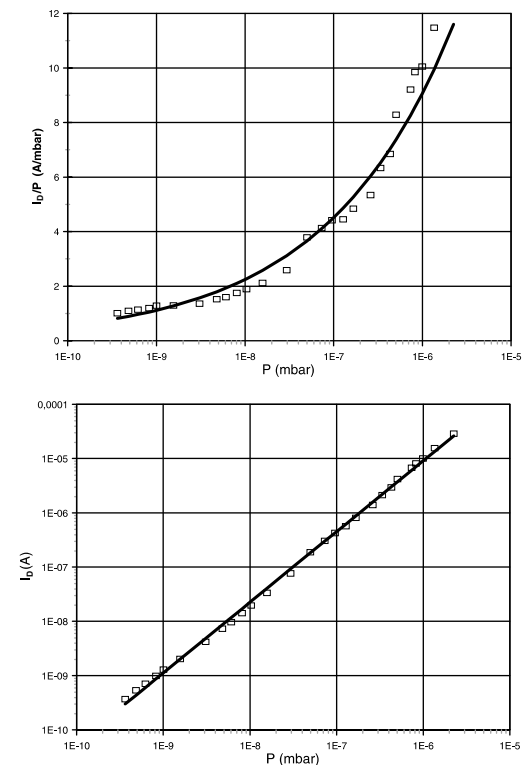
Slika 6: Jakost razelektritve (zgoraj) in razelektritveni tok (spodaj) v odvisnosti od tlaka dušika pri delovni napetosti 3,5 kV

Figure 6: Discharge intensity (above) and discharge current (below) vs nitrogen pressure at an operating voltage of 3,5 kV



Slika 5: Jakost razelektritve (zgoraj) in razelektritveni tok (spodaj) v odvisnosti od tlaka dušika pri delovni napetosti 2,5 kV

Figure 5: Discharge intensity (above) and discharge current (below) vs nitrogen pressure at an operating voltage of 2,5 kV



Slika 7: Jakost razelektritve (zgoraj) in razelektritveni tok (spodaj) v odvisnosti od tlaka dušika pri delovni napetosti 4,5 kV

Figure 7: Discharge intensity (above) and discharge current (below) vs nitrogen pressure at an operating voltage of 4,5 kV

napetosti in spodaj logaritem razelektrivnega toka v odvisnosti od logaritma tlaka dušika pri izbrani delovni napetosti. Izmerjena vrednost jakosti razelektritve oziroma razelektrivnega toka je pri tlaku približno 1×10^{-9} mbar relativno največja pri najnižji delovni napetosti, pri tlaku približno 1×10^{-6} mbar pa je izmerjena vrednost jakosti razelektritve relativno največja pri najvišji delovni napetosti. V vseh treh primerih smo potek jakosti razelektritve oziroma razelektrivni tok v odvisnosti od tlaka aproksimirali z izrazom (5) oziroma (4), pri čemer smo eksponent n in sorazmernostno konstanto k izračunali z linearno regresijo. Rezultati izračuna so prikazani v **tabeli 1**. Navedene vrednosti sorazmernostne konstante dajo razelektrivni tok v μA , če tlak izrazimo v mbar. Za posamezne pare izračunanih krivulj, ki so vrisane na **slakah 5, 6 in 7**, je značilno:

- dobro ujemanje z izmerjenimi točkami v UVV področju ter precejšnje neujemanje v VV področju pri delovni napetosti 2,5 kV
- ujemanje z izmerjenimi točkami v UVV in VV področju pri delovni napetosti 3,5 kV in
- ujemanje z izmerjenimi točkami v UVV in delno v VV področju ter neujemanje pri višjih tlakih VV področja pri delovni napetosti 4,5 kV.

Tabela 1: Rezultati izračuna eksponenta n in sorazmernostne konstante k za potenčno funkcijo, s katero je aproksimirana nelinearna odvisnost razelektrivnega toka od tlaka pri različnih delovnih napetostih

Table 1: Calculation of exponent n and proportionality constant k for the case of the power law approximation of non-linearity of discharge current vs pressure at different operating voltages

V_a (kV)	2,5	3,5	4,5
n	1,250	1,278	1,303
k ($\mu\text{A}/(\text{mbar})^n$)	300,10	434,77	596,75

3.3 Merjenje črpalne hitrosti

Črpalno hitrost magnetronske celice S_p smo izmerili pri tlaku dušika približno 1×10^{-6} mbar in delovnih napetostih 2,5, 3,5 in 4,5 kV. Rezultati meritev so prikazani v **tabeli 2**. Iz nje je razvidno, da je največja črpalna hitrost izmerjena pri najvišji delovni napetosti.

Tabela 2: Rezultati meritev črpalne hitrosti magnetronske celice pri tlaku dušika približno 1×10^{-6} mbar in različnih delovnih napetostih

Table 2: Magnetron cell pumping speed at a nitrogen pressure of about 1×10^{-6} mbar and different operating voltages

V_a (kV)	2,5	3,5	4,5
S_p (l/s)	0,58	0,62	0,72

4 DISKUSIJA

Primerjava rezultatov osnovnih meritev karakteristik magnetronske celice, kot so jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih izbranih plinov, jakost razelektritve oziroma razelektrivni tok v odvisnosti od tlaka preskusnega plina pri

različnih delovnih napetostih in črpalna hitrost pri izbranem tlaku ter različnih delovnih napetostih, vodi do naslednjih ugotovitev:

- Potek jakosti razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih v UVV in VV je za posamezno vrsto plina, kot so dušik, vodik, argon ter helij, približno enak, če je ustrezen tlak izražen z dušikovim ekvivalentom. Jakost razelektritve narašča z zviševanjem anodne napetosti do maksimuma, ki je višji pri višjih tlakih in je dosežen pri višji anodni napetosti. Po dosegu posameznega maksimuma je pojevanje jakosti razelektritve z nadaljnjim zviševanjem anodne napetosti posledica povečevanja električne poljske jakosti, ki vpliva na povprečno kinetično energijo elektronov in višino cikloidnih skokov. Pri povprečni kinetični energiji elektronov, večji od približno 100 eV ⁷, je ionizacijska zmogljivost izbranega plina nižja, z večjo višino cikloidnih skokov pa se zmanjša število možnih ionizirajočih trkov v plazmu in s tem gostota prostorskega naboja ¹.
- Razelektrivni tok v odvisnosti od tlaka dušika smo izmerili pri različnih delovnih napetostih, izbranih v območju od 2,5 do 4,5 kV. Ustrezna jakost razelektritve je v VV področju relativno večja pri višji anodni napetosti in v UVV področju relativno večja pri nižji anodni napetosti, kar je v skladu z lego maksimuma pri karakteristiki jakost razelektritve v odvisnosti od anodne napetosti pri različnih tlakih v UVV in UV področju. Pri karakteristiki razelektrivni tok v odvisnosti od tlaka smo zaznali diskontinuitete v obliki oscilacij in nenadnih sprememb, ki so se pri najnižji uporabljeni delovni napetosti pojavile blizu prehoda iz UVV v VV področje, pri najvišji pa v zgornjem VV področju. Vzrok za ta pojav je selitev razelektritve v tanko plast ob anodnem valju, za katero so značilni nestabilni načini razelektritve z različnimi razelektrivnimi tokovi ⁵.
- Črpalna hitrost magnetronske celice je bila izmerjena pri različnih delovnih napetostih, izbranih v območju od 2,5 do 4,5 kV, in tlaku približno 1×10^{-6} mbar, pri katerem se jakost razelektritve (v A/mbar) navadno navaja tudi kot občutljivost ionizacijskih merilnikov s hladno katodo ⁶. Črpalna hitrost je sorazmerna z jakostjo razelektritve, ki je večja pri višji anodni napetosti. Črpalna hitrost je odvisna tudi od povprečne kinetične energije ionov, potrebne za optimalno razprševanje katodnega materiala oziroma implantacijo ionov v katodni material (kinetična energija ionov je določena s potencialom na mestu njihovega nastanka ⁸). Zaradi tega je pričakovati pri delovanju magnetronske celice v UVV področju in uporabi nižje delovne napetosti navzlic relativno večji jakosti razelektritve v tem področju relativno manjšo črpalno hitrost. Izkazalo se je, da je uporaba viskoznoznega

merilnika z lebdečo kroglico pri določevanju ravnotežnega plinskega pretoka z metodo naraščanja tlaka zelo primerna, saj omogoča merjenje zelo majhnih sprememb tlaka. Za natančno merjenje ravnotežnega tlaka pri 1×10^{-6} mbar smo morali integracijski čas viskoznostnega merilnika z lebdečo kroglico podaljšati na 30 s. Za natančnejša merjenja ravnotežnih tlakov, ki so nižji od 1×10^{-6} mbar, pa je za znižanje spodnje merilne meje viskoznostnega merilnika z lebdečo kroglico treba poleg podaljšanja integracijskega časa stabilizirati temperaturo v okolici preskusne komore⁹ in zmanjšati vpliv vibracij iz okolja.

5 SKLEP

Primerjava in detajlna analiza rezultatov meritev karakteristik magnetronske celice z izbranimi dimenzijami (notranji radij anodnega valja 12 mm, radij katodne palice 1 mm, dolžina anodnega valja 29 mm in razdalja med katodnima ploščama 33 mm) in magnetnim poljem (0,13 T) v pogledu uporabe iste celice kot merilnika tlaka v UVV ter VV področju vodita do naslednjih ugotovitev:

- Karakteristika razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka v UVV in VV področju je optimalna pri delovni napetosti 3,5 kV (pri tlaku dušika 1×10^{-6} mbar je občutljivost 9,3 A/mbar in črpalna hitrost 0,6 l/s)
- V UVV področju je uporabnejša karakteristika razelektritvenega toka v odvisnosti od tlaka pri delovni napetosti 2,5 kV zaradi relativno večje občutljivosti, nižjih izolacijskih tokov in pričakovane relativno manjše črpalne hitrosti (zaradi nižje povprečne kinetične energije ionov)
- Eksponent n pri potenčni funkciji, s katero je aproksimiran razelektritveni tok v odvisnosti od tlaka, je približno enak za vse preskusne pline (dušik, vodik, argon in helij) in relativne občut-

ljivosti za iste pline (definirane z razmerjem med občutljivostjo za preskusni plin in občutljivostjo za dušik) so približno enake tistim pri ekstraktorskem merilniku, zaradi približno enakega poteka jakosti razeletritve v odvisnosti od anodne napetosti pri izbranih tlakih različnih preskusnih plinov

Na osnovi dosedanjih rezultatov meritev karakteristik modelov magnetronskih ionizacijskih merilnikov s hladno katodo, katerih konstrukcija vakuumskega ohišja temelji na standardni miniaturni ionsko-razprševalni črpalki, nameravamo nadaljevati aktivnosti v naslednjih smereh:

- raziskati jakost razeletritve v UVV in na prehodu iz UVV v EVV (ekstremno visoki vakuum) pri modelih magnetronskih ionizacijskih merilnikov s hladno katodo, pri katerih bomo spreminjali dimenzije razelektritvene celice
- raziskati jakost razeletritve in ustrežno črpalno hitrost v UVV in VV pri miniaturnih ionsko-razprševalnih črpalkah z magnetronsko geometrijo

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport, ki je sofinanciralo raziskave v okviru aplikativno-raziskovalnega projekta (L2-1435).

6 LITERATURA

- ¹ R. L. Jepsen, J. Appl. Phys., 32 (1961) 12, 2619
- ² H. Hartwig, J. S. Kouptsidis, J. Vac. Sci. Technol., 11 (1974) 6, 1154
- ³ W. Schuurman, Physica, 36 (1967), 136
- ⁴ B. Erjavec, J. Šetina, L. Irmančnik-Belič, Mater. tehnol., 35 (2001) 3-4, 143
- ⁵ P. A. Redhead, Vacuum, 38 (1988), 906
- ⁶ R. N. Peacock, N. T. Peacock, D. S. Hauschulz, J. Vac. Sci. Technol., A9 (1991) 3, 1977
- ⁷ J. T. Tate, P. T. Smith, Phys. Rev., 39 (1932), 270
- ⁸ M. de Simon, Vide, les Coushes Mincees, 254 (1990)
- ⁹ J. Šetina, Vacuum, 40 (1990), 51