

RAZELEKTRITVENI PARAMETRI PRI PREHODU IZ E- V H-NAČIN V KISIKOVI PLAZMI

Rok Zaplotnik^{1,2}, Alenka Vesel², Miran Mozetič²

ZNANSTVENI ČLANEK

¹Induktio, d. o. o., Litostrojska 44 d, 1000 Ljubljana

²Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V tem članku so predstavljene meritve električnih parametrov induktivno sklopljene kisikove plazme. Električni tok in napetost na vzbujevalni tuljavi smo merili v širokem območju vzbujevalne moči, tako da smo zajeli E- in H-način delovanja plazme. Rezultati so nam razkrili vedenje impedance plazme pri obeh načinih in histerezo krivuljo E-H-prehoda.

Gljučne besede: kisikova plazma, električni parametri, E-način, H-način, E-H-histereza

Electrical parameters of E- to H-mode transition in oxygen plasma

ABSTRACT

In this paper we present measurements of electrical parameters of inductively coupled oxygen plasma. We measured electric current and voltage on an induction coil in a wide range of RF-generator power therefore embracing both E- and H-mode. The results showed us the plasma impedance behavior in both modes and the hysteresis behavior in the E-H mode transition.

Key words: oxygen plasma, electrical parameters, E-mode, H-mode, E-H-hysteresis

1 UVOD

V induktivno sklopljenih razelektritvah obstajata dva različna tipa razelektritve: E-način in H-način.

Ko tuljavo induktivno sklopljenega plazemskega sistema vzbujamo z RF-generatorjem, RF-tok, ki teče skozi tuljavo, po Faradayevem zakonu proizvede oscilirajoče inducirano električno polje, ki ima zmožnost vzdrževati plazmo v reaktorski komori. V praksi se pojavi še dodatno aksialno električno polje. Če tuljavo vzbujamo z RF-virom, je vzdolž tuljave vedno potencialna razlika, zaradi česa je poleg inducirane azimutnega električnega polja še električno polje vzdolž osi – aksialno.

Prisotnost obeh električnih polj, aksialnega in inducirane, privede do različnih načinov delovanja induktivno sklopljene plazme.

Pri manjših vzbujevalnih močeh je za razelektritev v induktivno sklopljeni plazmi značilna šibka emisija svetlobe, nizka gostota elektronov in razmeroma visoka temperatura elektronov. Na tej stopnji je aksialno električno polje večje od inducirane in je zato odgovorno za vzdrževanje plazme. Tej razelektritvi se navadno reče E-način razelektritve (angl. E-mode). Ko s povečevanjem vzbujevalne RF-moči dosežemo določeno kritično vrednost, se nenadoma povečata svetilnost plazme in gostota elektronov, temperatura elektronov se nekoliko zmanjša. Ta razelektritev je znana

kot H-način razelektritve. Ta se vzbuja predvsem z induciranim električnim poljem, aksialno električno polje pa igra le majhno vlogo.

Treba je poudariti, da v induktivno sklopljeni plazmi E-načina delovanja ne smemo identificirati s kapacitivno sklopljenim prenosom moči in H-načina z induktivno sklopljenim prenosom RF-moči. V obeh delovnih režimih sta vedno tako kapacitivna kot tudi induktivna komponenta prenosa RF-moči v plazmo. Tisto, kar se dramatično spremeni pri prehodu iz E- v H-način, pa je relativni prispevek teh komponent [1].

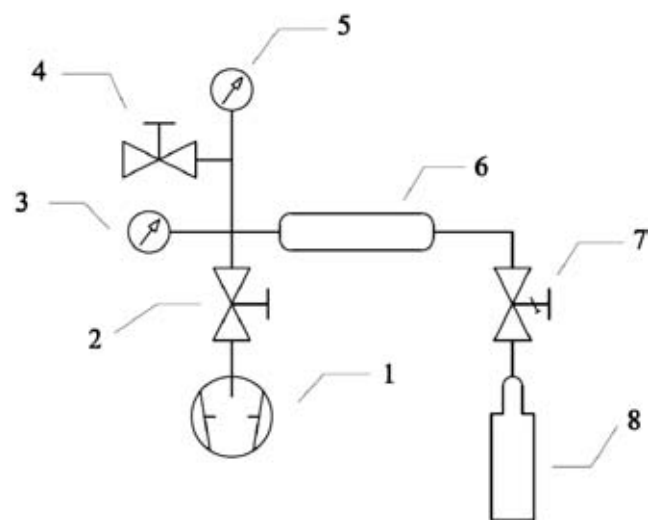
2 EKSPERIMENT

2.1 Opis plazemskega sistema

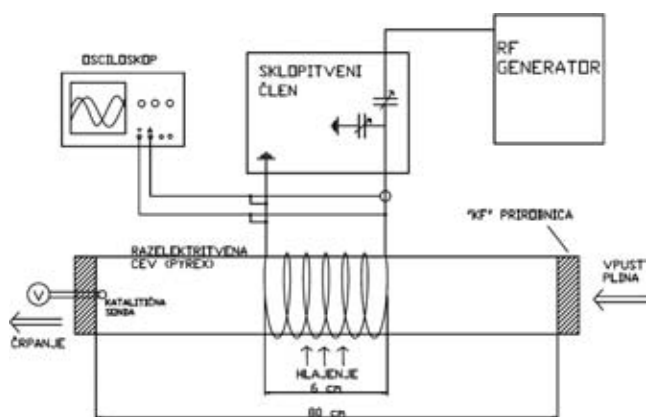
Plazemski sistem, ki smo ga uporabljali pri eksperimentih, je sestavljen iz vakuumskega in električnega dela.

Vakuumski del sestavljajo okrogla 80 cm dolga steklena cev z zunanjim premerom 40 mm, vakuumski T-kosi iz nerjavnega jekla, spojke, tesnila, ventili in vakuumska črpalka. Shematska skica vakuumskega dela je prikazana na **sliki 1**.

Na sistem je preko preciznega dozirnega ventila 7 povezana jeklenka s kisikom.



Slika 1: Vakuumski sistem, v katerem smo merili karakteristiko kisikove plazme: 1 – dvostopenjska rotacijska črpalka s črpalno hitrostjo 250 l/min, 2 – ventil, 3 – katalitična sonda, 4 – ventil za vpust zraka, 5 – merilnik tlaka (baratron), 6 – razelektritvena cev, 7 – precizni dozirni ventil, 8 – jeklenka s kisikom



Slika 2: Postavitev eksperimenta

Električni oziroma vzbujevalni del pa je sestavljen iz tuljave s šestimi ovoji oz. bakrene cevke, ki je navita okoli steklene cevi in s katero vzbujamo induktivno sklopljeno plazmo. Tuljava je pritrjena na ujemalni oz. sklopitveni člen (*matchbox*), ki je sestavljen iz dveh variabilnih vakuumskih kondenzatorjev, povezanih kot prikazuje **slika 2**. Ujemalni člen je preko koaksialnega kabla povezan z visokofrekvenčnim (13,56 MHz) generatorjem (**slika 2**).

2.2 Merilni instrumenti

Tlak v plazemskem sistemu smo merili z merilnikom tlaka MKS Baratron pressure transducer z merilnim obsegom 10 mbar (**slika 1**).

Na tuljavi smo merili električno napetost in tok, za kar smo uporabljali napetostno sondo Tektronix P6015a in tokovno sondo Tektronix A6302. Signale iz sond smo zajemali z osciloskopom Tektronix TDS3024B (**slika 2**).

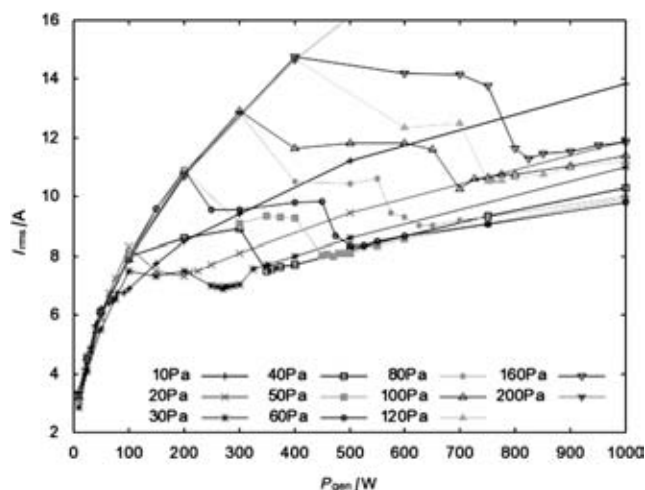
3 REZULTATI

Preden smo se lotili sistematičnih meritev, smo določili, katere parametre bomo spreminjali na plazemskem sistemu in s kakšnim korakom. Spreminjali smo tlak v sistemu in moč vzbujanja plazme. Plazmo smo vzbujali z močjo od 10 W do 1000 W, pri tlakih $p = (10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 160 \text{ in } 200) \text{ Pa}$.

Pri določenem tlaku smo spreminjali moč vzbujanja. Pri določeni moči vzbujanja pa smo merili električno napetost in električni tok na vzbujevalni tuljavi.

3.1 Električni tok

Merili smo tok in napetost na bakreni tuljavi, s katero smo induktivno vzbujali plazmo. Na **sliki 3** so prikazane meritve efektivnega električnega toka v odvisnosti od vzbujevalne moči. Dobro je vidna podobnost krivulj pri različnih tlakih. Nekoliko se



Slika 3: Električni tok na vzbujevalni tuljavi v odvisnosti od vzbujevalne moči za vse tlake

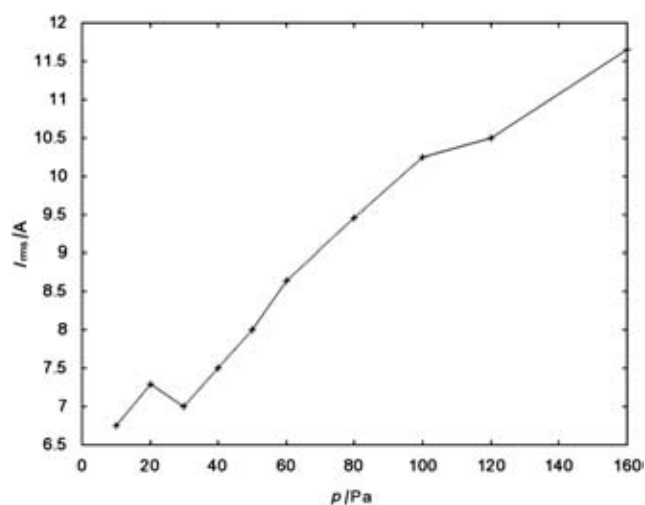
odmikajo le meritve pri nižjih tlakih. Tok skozi tuljavo se v E-načinu za vse tlake spreminja enako, po isti krivulji.

Ko plazma začne prehajati v H-način in se izmenjavata E- in H-način, tok nekoliko pade in se ustali, dokler se ne vzbudi le H-način. Takrat tok še nekoliko pade, doseže minimum, potem pa začne počasi naraščati (**slika 3**).

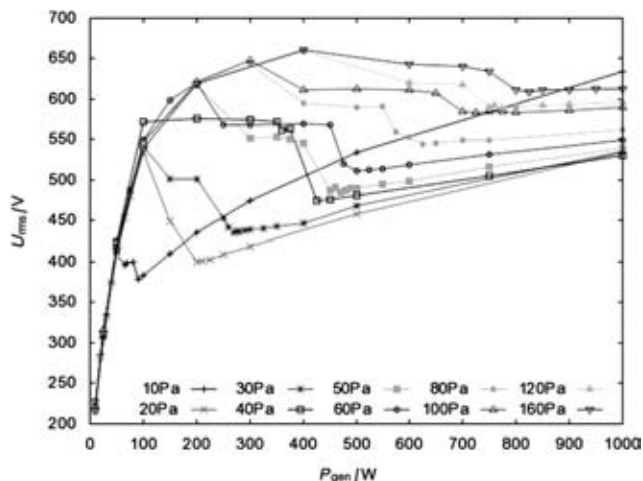
Na **sliki 4** je prikazan minimalni tok na tuljavi, ki je potreben za vzdrževanje H-načina, v odvisnosti od tlaka v razelektritveni cevi. Krivulja je dokaj linearna.

3.2 Električna napetost

Poleg električnega toka smo merili tudi napetost med obema priključkoma tuljave. Meritve nad 600 V žal niso natančne, zaradi nevede napačno nastavljenega povprečenja na osciloskopu, kljub temu pa je dobro vidna podobnost vedenja napetosti na tuljavi pri



Slika 4: Električni tok, ki teče skozi vzbujevalno tuljavo, ko plazma preide v H-način (oz. minimalni tok za vzdrževanje H-načina) v odvisnosti od tlaka v razelektritveni cevi

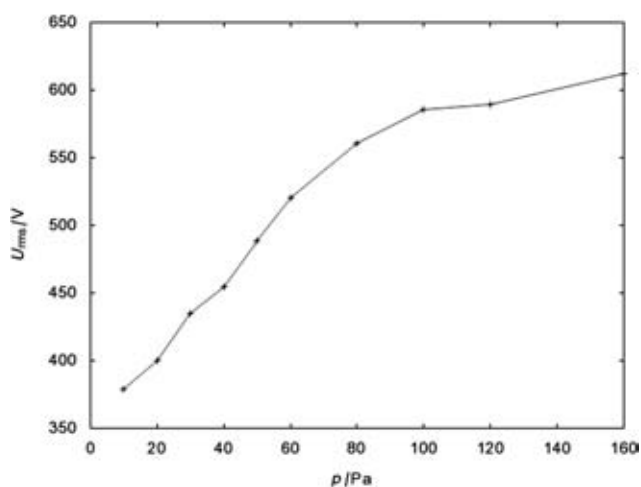


Slika 5: Električna napetost na vzbujevalni tuljavi v odvisnosti od vzbujevalne moči za vse tlake

različnih tlakih. S slike 5 je razvidno, da se napetost na tuljavi v E-načinu giblje po isti krivulji pri vseh tlakih. Ker smo podobno vedenje videli tudi pri meritvah toka, lahko sklepamo, da je impedanca Z plazme, ko je ta v E-načinu, neodvisna od tlaka v razelektritveni cevi. Ko se začeta izmenjevati E- in H-način, se povprečna napetost na tuljavi nekoliko zmanjša, a se ustali, dokler se ne vžge le H-način. Takrat napetost zopet hitro pade, doseže minimum, potem pa se začne zopet počasi večati.

Na sliki 6 je predstavljena krivulja napetosti med priključkom vzbujevalne tuljave pri parametrih, ko plazma preide v H-način, v odvisnosti od tlaka. Opazimo, da je krivulja linearna do neke vrednosti, potem pa se strmina krivulje zmanjša. Vzrok za to je verjetno že prej omenjena nenatančnost merjenja napetosti.

Ker je v E-načinu oziroma pri kapacitivni sklopitvi pomembna tudi napetost med prirobnico in tuljavo, se je pojavilo vprašanje, kje je električni potencial V_0 zemlja (masa), oziroma ali je napetost med priključki



Slika 6: Električna napetost na vzbujevalni tuljavi, ko plazma preide v H-način (oz. minimalna napetost za vzdrževanje H-načina), v odvisnosti od tlaka v razelektritveni cevi

vzbujevalne tuljave enaka napetosti med priključkom z visoko napetostjo in bližnjo KF-prirobnico. Zato smo pri dveh tlakih (10 Pa in 20 Pa) pomerili tudi razliko teh napetosti. Pri enakih vzbujevalnih razmerah (vzbujevalna moč P_{gen} in tlak p) smo merili napetost (U_{v-h}) med priključkom tuljave z visoko napetostjo (vroč) in priključkom, priključenim na zemljo (hladen), napetost (U_{v-k}) med priključkom z visoko napetostjo (vroč) in bližnjo KF-prirobnico ter napetost (U_{h-k}) med hladnim priključkom (ozemljenim) in isto KF-prirobnico. Meritve efektivnih napetosti so prikazane v tabeli 1.

Tabela 1: Električne napetosti na vzbujevalni tuljavi (U_{v-h}), med vročim priključkom in KF prirobnico (U_{v-k}) ter med hladnim priključkom in KF-prirobnico (U_{h-k}) pri tlaku 10 Pa (zgoraj) in 20 Pa (spodaj).

$p = 10 \text{ Pa}$							
P_{gen}/W	P_{ref}/W	U_{v-h}/V	P_{ref}/W	U_{v-k}/V	P_{ref}/W	U_{h-k}/V	način
20	18	272,7	18	277,1	18	9,6	E
50	45	394,3	44	397,6	41	11,4	E
100	85	518,8	84	526,1	E-H	E-H	E
200	2	451,0	3	460,6	6	18,4	H
500	51	548,7	46	548,9	60	37,6	H

$p = 20 \text{ Pa}$							
P_{gen}/W	P_{ref}/W	U_{v-h}/V	P_{ref}/W	U_{v-k}/V	P_{ref}/W	U_{h-k}/V	način
20	19	275,6	19	281,5	18	10,3	E
50	47	400,9	47	407,1	45	14,5	E
100	88	527,3	86	528,1	82	16,0	E
200	5	463,3	5	458,3	4	19,9	H
500	35	530,6	32	529,6	43	30,2	H
1000	205	637,1	197	634,9	217	41,9	H

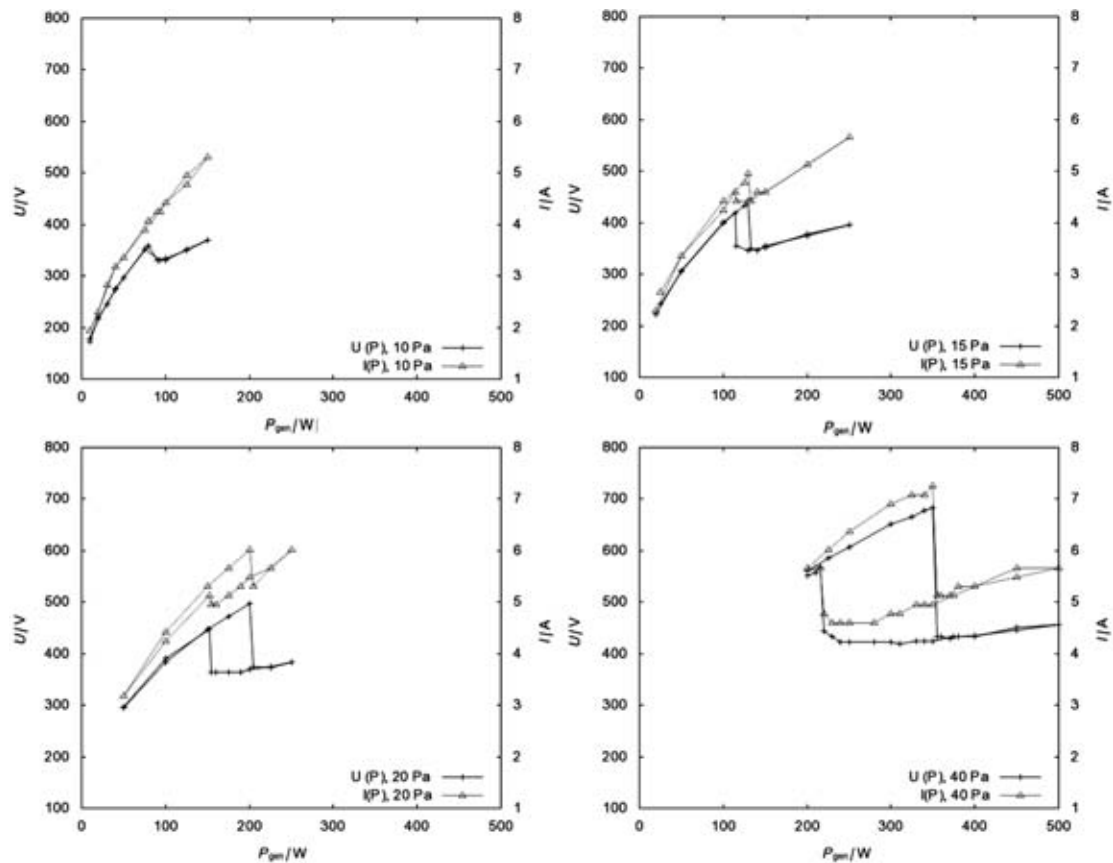
Kot je razvidno iz tabele, se napetosti U_{v-h} in U_{v-k} ne razlikujeta veliko, zato lahko rečemo, da so meritve napetosti na tuljavi ustrezne. Električna potenciala med maso na tuljavi in maso na prirobnici pa tudi nista zelo različna. Napetost med njima je le nekaj deset voltov.

Majhne razlike v reflektirani moči P_{ref} in tudi v napetosti so posledica kapacitivnosti napetostne sonde, ki je $C_s = 3 \text{ pF}$. Ker sondo različno vežemo, s tem spremenimo tudi sklopitveni člen in posledično reflektirano moč in električno vzbujevalno napetost.

3.3 Histereza pri prehodu iz E- v H-način

Poleg že opisanih meritev in rezultatov smo merili tudi električno napetost in električni tok pri neprestanem vzbujanju in večanju vzbujevalne moči. Meritve smo naredili pri tlakih (10, 15, 20 in 40) Pa.

Pri nekem tlaku smo nastavili takšno začetno moč, da je bila plazma v E-načinu. Postopoma smo večali vzbujevalno moč, ne da bi med tem radiofrekvenčno moč izklopili. Ko je plazma prešla v H-način, smo naredili še nekaj meritev v tem načinu, potem pa smo moč postopoma začeli zmanjševati, zopet, ne da bi



Slika 7: Električna napetost na vzbujevalni tuljavi (križi) in električni tok (trikotniki), ki teče skozi tuljavo v odvisnosti od vzbujevalne moči

vmes izklopili vzbujanja. Moč vzbujanja smo manjšali po enakih korakih, kot smo jo večali. Že med meritvami smo opazili, da se prehod iz E- v H-način in iz H- v E-način ne zgodi pri isti moči vzbujanja. Razlika med tema dvema močema pa se veča z večanjem tlaka.

Na **sliki 7** so predstavljeni rezultati teh meritev. Kot smo omenili že prej, je prehod iz H- v E-način pri manjši vzbujevalni moči, kot je iz E- v H-način. Histereze so prikazane na **sliki 7**, kjer so predstavljene meritve električne napetosti (križi) in električnega toka (trikotniki) na vzbujevalni tuljavi.

Pri tlaku 10 Pa je histereza komajda opazna, vendar je že pri 15 Pa izrazita. Z večanjem tlaka se širina histereze veča.

Histereze v prehodu iz E- v H-način so bile doslej raziskane predvsem v argonovi plazmi [1–8]. Nekaj eksperimentalnih del je razkrilo histereze, ko izmerjeno gostoto elektronov ali intenzitete določene spektralne črte v odvisnosti od vzbujevalne moči RF-generatorja narišemo na graf. Chen s sodel. [2] so z optično emisijsko spektroskopijo merili v območju vzbujevalne tuljave in z Langmuirjevo sondo v območju vzdolž cevi. Ugotovili so, da obstaja histeretno vedenje tako v gostoti elektronov kot v intenziteti različnih emisijskih črt.

Poleg gostote elektronov, temperature elektronov, plazemskega potenciala in intenzitete argonovih emisijskih črt pa so Xu s sodel. [5] merili tudi gostoto magnetnega polja v aksialni smeri cilindričnega plazemskega reaktorja (B_z). Pri vseh meritvah so opazili histerezo pri E-H-prehodu.

Pri eksperimentalnih delih [1,5] so histerezo razkrili tudi pri meritvah impedance plazme. Za razlago histereze je bilo tudi že predlaganih kar nekaj teoretičnih modelov [1,9,10].

Avtorji članka [1] so za razlago histereze uporabili mešanico elektromagnetne teorije, analize električnega vezja in pogoja, da se mora moč, ki jo elektroni absorbirajo in izgubijo uravnovežiti. Prehod med načini delovanja plazme naj bi se zgodil, ko ti dve moči nista več v ravnotežju.

Podobno razlago ponujata Turner in Lieberman [9], ki pravita, da histerezo lahko razumemo kot posledico nelinearnih efektov električnega vezja in plazme v enačbi ravnovesja moči elektronov.

Lee in Chung [10] sta histerezo prav tako razložila z uporabo Maxwellovih enačb. Daltrini s sodel. [11] pa trdi, da so v prejšnjih delih, povezanih z opazovanjem histereze, preveč zanemarjali sklopitveni člen in izgubo moči na njem in na tuljavi. V argonovi plazmi so namreč opazovali gostoto in temperaturo elek-

tronov, gostoto ionov in intenzitete emisijskih črt ter pokazali, da ne dobimo histereze, če si te meritve ogledamo v odvisnosti od moči, kjer odštejemo izgube moči.

V literaturi nismo našli nobenega zapisa o raziskavah histereze v kisikovi plazmi.

4 SKLEP

S tem eksperimentom smo dokaj dobro spoznali električne oz. razelektritvene parametre na vzbujevalni tuljavi induktivno sklopljene kisikove plazme.

Meritve električnega toka in napetosti med priključkoma tuljave so nam pokazale, da je impedanca plazme, ko je ta v E-načinu, neodvisna od tlaka v razelektritveni cevi. Ko preide v H-način pa se realni del impedance zelo poveča, saj se fazni kot med električnim tokom in napetostjo zmanjša. To sklepamo zato, ker se pri prehodu v H-način oba tok in napetost zmanjšata, vhodna moč pa se zelo poveča, saj se pri nekoliko večji vzbujevalni moči reflektirana moč zelo zmanjša. Iz tega pa izhaja, da se fazni kot med napetostjo in tokom zelo zmanjša, kar pomeni, da je kot med realnim delom impedance R (električna upornostjo) in imaginarnim delom X (reaktanco) manjši, oziroma R je večji. Iz prehoda iz E- v H-način se torej upornost plazme poveča.

Izmerili smo tudi histerezno vedenje kisikove plazme oziroma njenega prehoda iz E- v H-način. Meriti smo začeli pri določenem tlaku v E-načinu. Pri neprekinjenem vzbujanju smo večali vzbujevalno moč na RF-generatorju. Ko smo dosegli določeno kritično vrednost moči, je plazma prešla v H-način. Ko smo v H-načinu začeli manjšati vzbujevalno moč na visokofrekvenčnem generatorju, smo prehod nazaj v E-način dosegli pri manjši moči vzbujanja, kot prehod iz E- v H-način. To je značilno histerezno vedenje. Histereza električnega toka in napetosti na vzbujevalni tuljavi je postajala vedno bolj izrazita pri večjih tlakih.

Zahvala

Delo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.

5 LITERATURA

- [1] I. M. El-Fayoumi, I. R. Jones, M. M. Turner, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31 (1998), 3082–3094
- [2] Y. Chen, Z.-G. Guo, X.-M. Zhu, Z.-G. Mao, Y.-K. Pu, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40 (2007), 5112–5116
- [3] Q. Xuelian, R. Chunsheng, Z. Jian, M. Tengcai, *Plasma Science and Technology*, 9 (2007) 5, 578–581
- [4] M. Abdel-Rahman, V. Schulz-von der Gathen, T. Gans, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40 (2007), 1678–1683
- [5] S. Xu, K. N. Ostrikov, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 18 (2000) 5, 2185–2197
- [6] P. Kempkes, S. V. Singh, C. Pargmann, H. Soltwisch, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 15 (2006), 378–383
- [7] S. V. Singh, P. Kempkes, H. Soltwisch, *Appl. Phys. Letters*, 89 (2006) 161501, 1–3
- [8] Ding, Z. F., Yuan, G. Y., Gao, W., Sun, J. C.: *Physics of Plasma* 15 (2008), 063506, 1–7
- [9] M. M. Turner, M. A. Lieberman, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 8 (1999), 313–324
- [10] M.-H. Lee, C.-W. Chung, *Physics of Plasmas*, 13 (2006) 063510, 1–10
- [11] A. M. Daltrini, S. A. Moshkalev, T. J. Morgan, R. B. Piejak, W. G. Graham, *Appl. Phys. Letters*, 92 (2008) 161504, 1–3
- [12] I. Čadež, C. Schermann, M. Landau, F. Pichou, D. Popovič, R. I. Hall, *Zeitung f. Physik D*, 35 (1993), 328–330
- [13] M. Mozetič, A. Vesel, U. Cvelbar, A. Ricard, *Plasma Chem Plasma Process*, 26 (2006) 103–117
- [14] I. Šorli, R. Ročak, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 18 (2000), 338–342
- [15] M. Balat-Pichelin, A. Vesel, *Chemical Physics*, 327 (2006), 112–118
- [16] S.-X. Zhao, X. Xu, X.-C. Li, Y.-N. Wang, *J. Appl. Phys.*, 105 (2009) 083306, 1–10
- [17] U. Cvelbar, M. Mozetič, *Vakuumist*, 27 (2007) 1–2, 24–33
- [18] A. Drenik, Raziskave gostote nevtralnih kisikovih atomov v stranski cevi plazemskega reaktorja, *diplomska naloga*, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 2005
- [19] M. Mozetič, Interakcija vodikove plazme s površinami trdnih snovi, *doktorska disertacija*, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru, 1997
- [20] M. Mozetič, U. Cvelbar, A. Vesel, A., Ricard, D. Babic, I. Poberaj, *J. Appl. Phys.*, 97 (2005) 103308, 1–7
- [21] A. Vesel, M. Mozetič, M. Balat-Pichelin, *Vacuum*, 81 (2007), 1088–1093
- [22] A. Vesel, A. Drenik, M. Mozetič, M. Balat-Pichelin, *Vacuum*, 84 (2010), 1–6
- [23] F. Gaboriau, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42 (2009), 1–5