

ALEKSANDAR BOJAROV
MARIJA
RADMILOVIĆ-RADJENOVIĆ
ZORAN LJ. PETROVIĆ

Institut za fiziku, Zemun

NAUČNI RAD

UDK 533.9:621.039.61:537.3:
:621.3.049.77

DOI: 10.2298/HEMIND0903233B

MODELOVANJE KARAKTERISTIKA PRAŽNENJA KOD KAPACITIVNO SPREGNUTIH REAKTORA SA DVE FREKVENCIJE*

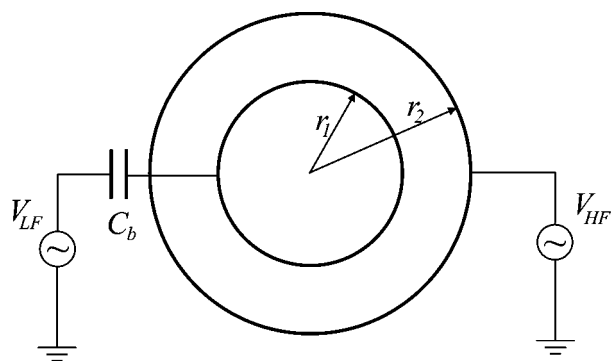
U ovom radu modelovali smo dvo-frekventni kapacitivno spregnuti plazma reaktor (DF-CCP) korišćenjem 1d3v Particle-in-Cell/Monte Carlo collision (PIC/MCC) koda. Dobijeni rezultati imaju veliki značaj, kako u naučnim krugovima tako i u industrijskim i tehnološkim oblastima, imajući u vidu širok dijapazon primena, pre svega, njihov značaj u plazma tehnologijama i proizvodnji integrisanih kola. Kod DF-CCP, gustina plazme se kontroliše pomoću viših frekvencija, dok energija jona zavisi od napona prielektrodne oblasti i kontroliše se nižim frekvencijama. Dobijeni rezultati ukazuju da napon niže frekvencije utiče na energiju jona, dok napon generatora više frekvencije utiče na fluks jona na elektrodi.

U osnovi savremenog naučno-tehnološkog progressa nalaze se materijali i tehnologije njihovog dobijanja. Niz fundamentalnih i inženjerskih disciplina predstavljaju osnovu za razvoj široke klase novih materijala – od nano do makro nivoa. Neravnotežne plazme su već u upotrebi kao jedan od ključnih tehnoloških faktora u daljem razvoju mikroelektronike [1,2]. Dvofrekventne plazme se koriste za plazma nagrizanje posebno dielektričnih interkonekt slojeva kako bi se umanjilo naelektrisanje nanostrukture visokog odnosa dubine i širine (kontaktni otvori) [3]. Ovi koraci predstavljaju oko 80% aktivnosti u proizvodnji integrisanih kola. Trenutna istraživanja u oblasti nano-tehnologija uglavnom su povezana sa računarskim simulacijama [4–7].

U ovom radu, mi smo modelovali kapacitivno spregnutog reaktora cilindrične geometrije (slika 1) korišćenjem jedno-dimenzionalnog PIC/MCC koda [8–10]. Pražnjenje se održava u prostoru između elektroda pomoću dva generatora različitih frekvencija. Karakteristično za dvofrekventna pražnjenja, a značajno za praksu, jeste uticaj generatora različitih frekvencija na različite procese u plazmi.

Na unutrašnjoj elektrodi je povezan generator niže frekvencije i isti se koristi za kontrolu prednapona na unutrašnjoj elektrodi koji direktno utiče na energiju jona u prielektrodnoj oblasti. Spoljašnja elektroda vezana je na generator više frekvencije koji se koristi za održavanje jonizacije, a time se utiče na fluks jona. Povoljna karakteristika dvofrekventnih reaktora se sastoji u mogućnosti da se proizvodnja plazme i energije jona kontrolišu različitim generatorima. Pod uslovom da je sprega između generatora mala, možemo postići selektivnu kontrolu procesa u plazmi. Za praksu je značajna kontrola nad jonima koji udaraju površinu unutrašnje elektrode,

odnosno kontrola nad onim jonima koji se koriste u obradi materijala.



Slika 1. Šematski prikaz asimetričnog kapacitivno spregnutog reaktora sa dve frekvencije.
Figure 1. Schematic of the asymmetric dual frequency capacitively coupled plasma reactor.

Kada govorimo o selektivnoj kontroli procesa u plazmi, podrazumevamo da se fluks jona na elektrodi kontroliše zasebno od njihove energije. Ovo nalazi veliku primenu u praksi, jer su ove dve veličine direktno povezane sa brzinom nagrizanja i profilom struktura kod plazma nagrizanja.

U literaturi se može naći detaljno objašnjenje kako dolazi do formiranja napona na unutrašnjoj elektrodi usled ambipolarne difuzije čestica iz plazme [11]. Ovde ćemo dati samo izraz koji povezuje struju kroz spoljašnje kolo sa jednosmernom komponentom napona na unutrašnjoj elektrodi. Prednapon, ili jednosmerna komponenta naizmeničnog napona, na unutrašnjoj elektrodi se formira tako da se izjednače gubici jona i elektrona iz plazme:

$$V_{dc} = V_{rf} - \frac{1}{C_b} \int_{-\infty}^t I_T(t)$$

Prednapon unutrašnje elektrode nazivamo srednju vrednost napona, V_{dc} , u jednoj periodi oscilacija naizmeničnog generatora napona, V_{rf} . Sa I_T je označena struja

*Rad saopšten na skupu „Sedmi seminar mladih istraživača“, Beograd, 22–24. decembar 2008.

Autor za prepisku: A. Bojarov, Institut za Fiziku, Centar za Neravnotežne procese, Pregrevica 118, 11080 Zemun, Srbija.

E-pošta: a_bojarov@yahoo.com

Rad primljen: 22. decembar 2008.

Rad prihvaćen: 11. februar 2009.

čiji je smer iz niskofrekventnog generatora ka unutrašnjoj elektrodi.

Prednapon unutrašnje elektrode utiče na srednju vrednost električnog polja u prielektrodnoj oblasti. Zbog brzopromenljivog električnog polja u plazmi koje ima srednju vrednost različitu od nule, joni kao znatno inertnije čestice od elektrona kretaće se prateći srednje vrednosti polja. Srednja vrednost električnog polja u prielektrodnoj oblasti je odgovorna za ubrzavanje jona kroz tu oblast, a samim tim utiče i na energiju jona koji bombarduju unutrašnju elektrodu.

U simulacijama interesovao nas je, pre svega, uticaj napona pojedinih generatora na karakteristike plazme i na energiju jona u prelektrodnoj oblasti, uz pretpostavku da je, u praktičnim primenama, materijal koji se obrađuje površina unutrašnje elektrode. Proces i od posebnog interesa bili su fluks i energija jona koji doprevaju do unutrašnje elektrode.

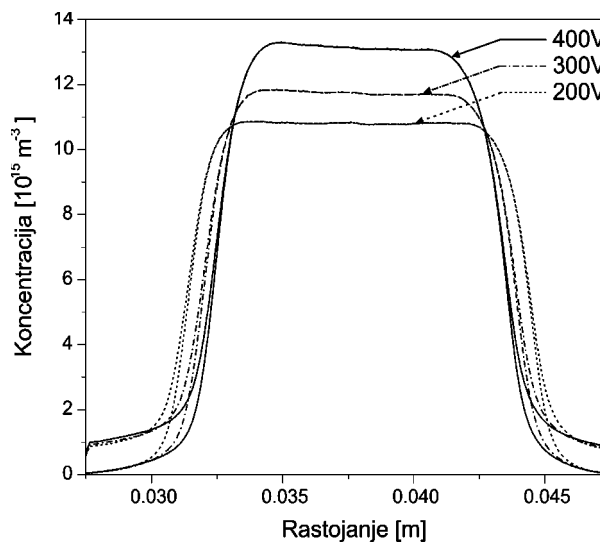
Simulacije su izvršene za gas argon, koji se često koristi u simulacijama za ispitivanje kinetike čestica pre nego što se pređe na konkretnije mešavine gasova koji se koriste u praksi. Pražnjenje spada u domenu plazme niskog pritiska, neutralni gas je pod pritiskom od 45 mtorr. Rastojanje između elektroda je 2 cm i predstavlja prostor pražnjenja. Unutrašnji poluprečnik reaktora je 2,75 cm. Generator veće frekvencije se održava na 27 MHz na spoljašnjoj elektrodi, dok se generator niže frekvencije održava na 2 MHz. Vrednost kondenzatora je direktno povezana sa geometrijom reaktora i izbor vrednosti od 100 pF u skladu je sa brojem naelektrisanih čestica koji pune kondenzator, odnosno sa zapreminom gasa i podužnim dimenzijama reaktora.

Uticaj napona visokofrekventnog generatora

Visokofrekventni generator utiče na procese u gasu po celoj zapremini, tako da se ovaj generator koristi za proizvodnju plazme iz neutralnog gasa. Drugim rečima, pomoću visokofrekventnog generatora kontrolišemo gustinu naelektrisanih čestica, odnosno koeficijent jonizacije i profil gustine naelektrisanja.

Uticaj napona visokofrekventnog generatora posmatračemo preko karakteristike koje nas interesuju u praksi, odnosno uticaj na profil plazme i time indirektni uticaj na energiju jona i njihov fluks na unutrašnjoj elektrodi. Visokofrekventni generator održavamo na frekvenciji od 27 MHz i menjamo vrednost amplitude naizmennog napona u osegu od 200 do 400 V. Parametre niskofrekventnog generatora održavamo konstantnim, frekvenciju na 2 MHz i napon na 100 V.

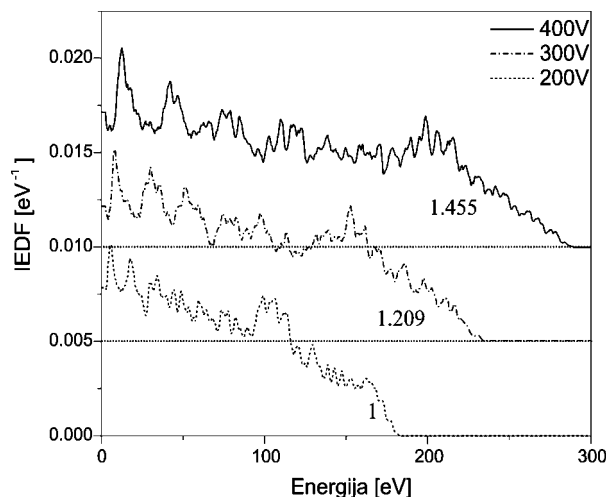
Na slici 2 možemo videti da je promena profila plazme prilično linearna sa promenom napona visokofrekventnog generatora. Promena koncentracije čestice u centru pražnjenja direktno utiče na broj jona koji doprevaju do materijala koji se obrađuje, odnosno u našem slučaju, joni koji doprevaju do unutrašnje elektrode.



Slika 2. Prostorna raspodela gustine naelektrisanja za različite vrednosti napona visokofrekventnog generatora.

Figure 2. Plot of the ion and electron densities versus position for several voltages of the high frequency generator.

Na slici 3 predstavljene su funkcije raspodele energije jona IEDF (eng. *Ion Energy Distribution Function*) koji dolaze na unutrašnju elektrodu, na istoj slici je ispod krivih dat i relativni odnos površina ispod krivih. Površina ispod krivih je ukupni broj jona koji doprevaju na elektrodu u jedinici vremena ili drugim rečima to su odnosi fluksa jona za različite vrednosti napona. Zaključak koji se može izvesti sa slike 3 opravdava pretpostavku da promenom koncentracije čestica u plazmi direktno utičemo na fluks jona na elektrodi.

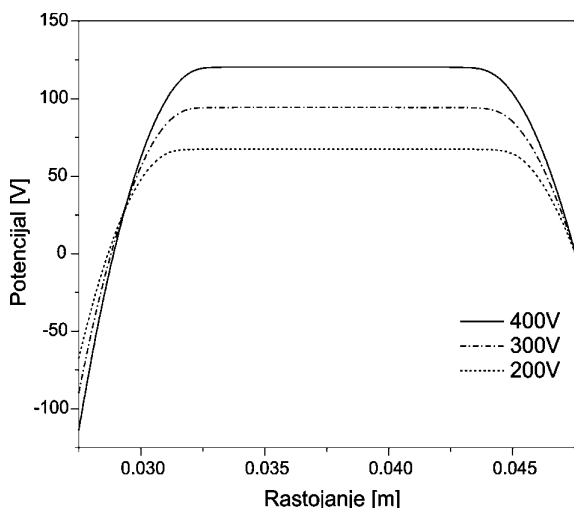


Slika 3. Funkcija raspodele energije jona na unutrašnjoj elektrodi sa relativnim fluksom jona ispod krivih za različite vrednosti napona visokofrekventnog generatora.

Figure 3. Ion energy distribution on the inner electrode with a number under the curves representing the relative flux of ions for various voltages of the high frequency generator.

Iz profila funkcije IEDF na slici 3, odnosno iz nje-
ne širine, vidimo da napon visokofrekventnog genera-
tora utiče na energetsku raspodelu jona. Širenje IEDF ka
većim energijama govori nam da povećavanjem napona
visokofrekventnog generatora pored toga što povećava-
mo fluks, povećavamo i broj energetskih jona na elek-
trodi. Zavisnost IEDF od napona visokofrekventnog ge-
neratora pokazuje nam nedostatak u pogledu ostvariva-
nja selektivne kontrole fluksa i energije jona kod re-
aktora sa samo jednom frekvencijom.

Profil IEDF povezan je sa poljem u prielektrodnoj
oblasti, odnosno sa srednjom vrednošću polja, jer su jo-
ni inertniji od elektrona tako da prate srednje vrednosti
polja u plazmi (slika 4). Zavisnost profila IEDF od na-
pona visokofrekventnog generatora je neizbežna, ako uz-
memo u obzir da postoji veza između gustine plazme i
potencijala plazme.



Slika 4. Prostorna zavisnost potencijala plazme i
prielektrodne oblasti za različite vrednosti napona
visokofrekventnog generatora.

Figure 4. Time averaged plasma potential versus position for
different voltages of the high frequency generator.

Na slici 3 može se primetiti da profil IEDF ima
pikove na određenim energijama, koji su izraženiji pri
većem naponu. Pojava «diskretnog spektra» energija se
objašnjava brojem sudara sa neutralima gasa na putu
jona kroz prielektrodnu oblast. Približni izraz za broj pi-
kova IEDF, koji se može naći u literaturi [11] jeste:

$$N = \frac{\tau_{\text{jon}}}{\tau_{\text{HF}}}$$

gde su τ_{jon} i τ_{HF} vreme preleta jona kroz prielektrodnu
oblast i period oscilacije visokofrekventnog generatora.

Uticaj napona niskofrekventnog generatora

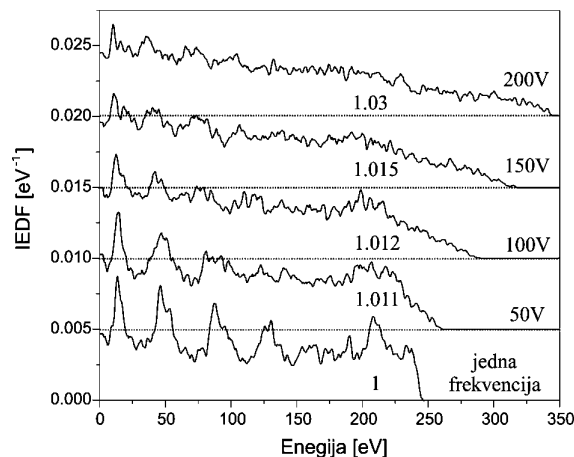
Razmatranjem uticaja visokofrekventnog genera-
tora pokazali smo kako se, promenom napona, utiče na
fluks i energiju jona. Slična postavka jednofrekventnih

reaktora u praksi se pokazala kao dobra, ali ipak nepre-
cizna za obradu materijala koju zahteva današnja tehnolo-
gija.

Sledeći korak u proučavanju preciznije metode
kontrole jona na unutrašnjoj elektrodi jeste promena pa-
rametara niskofrekventnog generatora. Cilj nam je da
ostvarimo što manju spregu između generatora, odnosno
da promena napona niskofrekventnog generatora ne iza-
zove velike promene u koncentraciji čestica u plazmi.
Gustina plazme i centralni deo pražnjenja je oblast koju
želimo da kontrolišemo isključivo većom frekvencijom.

U simulacijama održavamo parametre visokofrek-
ventnog generatora konstantnim, napon na 200 V i frek-
venciju na 27 MHz. Niskofrekventni generator ima kon-
stantnu frekvenciju od 2 MHz, a napon se menja u op-
segu od 50 do 200 V. Interesantno je da smo na grafi-
cima koje smo dobili dodali i krivu koja je dobijena za
jednofrekventni reaktor. Pod jednofrekventnim reaktom
podrazumevamo postavku u kojoj ne postoji genera-
tor niske frekvencije i gde je jedini generator u kolu,
generator visoke frekvencije (u našem slučaju 27 MHz)
vezan na unutrašnju elektrodu.

Na slici 5 prikazan je izgled IEDF-a u zavisnosti od
napona niskofrekventnog generatora. Možemo primetiti
da imamo zadovoljavajuće rezultate u pogledu uticaja
napona na širinu funkcije IEDF. Sa slike se može pri-
metiti da površina ispod krivih, odnosno fluks jona, za-
država prilično konstantnu vrednost. Time smo jedan od
važnijih zahteva za selektivnu kontrolu ispunili, uspeli
smo da utičemo na energiju jona koji bombarduju elek-
trodu a da ne promenimo njihov broj [7].

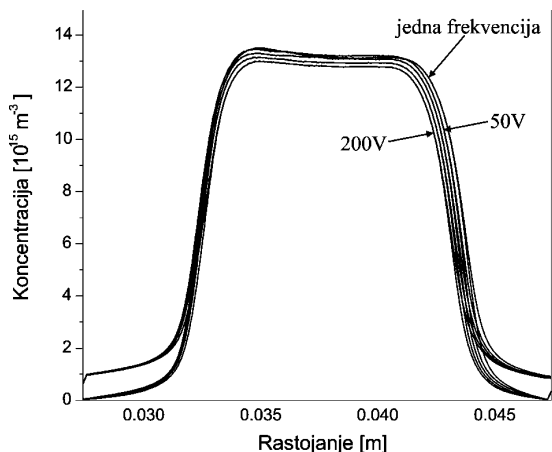


Slika 5. Funkcije raspodele energije jona na unutrašnjoj elek-
trodi sa odnosom fluksa za različite vrednosti napona niskofre-
kventnog generatora i za jednofrekventni reaktor.

Figure 5. Ion energy distribution on the inner electrode with
the relative flux of ions for various voltages of the low fre-
quency generator and a curve for a single frequency reactor.

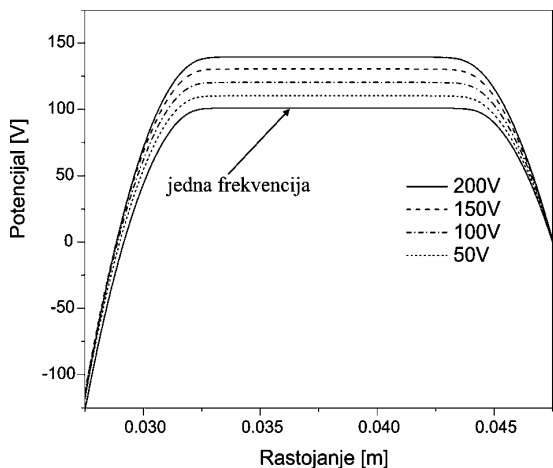
Uticaj niskofrekventnog generatora na koncentra-
ciju plazme je vrlo mali, to se eksplicitno vidi i sa slike
6, gde se primećuju vrlo male promene u profilu kon-

centracije plazme. Na slici 6 punom linijom je data i kriva za profil plazme jednofrekventnog reaktora, to je još jedan dokaz da niskofrekventni generator vrlo malo utiče na globalni izgled pražnjenja.



Slika 6. Prostorna raspodela naelektrisanja za različite vrednosti napona niskofrekventnog generatora.
Figure 6. Plot of the ion and electron densities versus position for several voltages of the low frequency generator.

Niskofrekventni generator utiče na energiju jona preko srednje vrednosti polja u prielektrodnoj oblasti. Pad potencijala kroz prielektrodnu oblast je dat na slici 7, odakle se vidi da je jačina električnog polja proporcionalna naponu generatora.

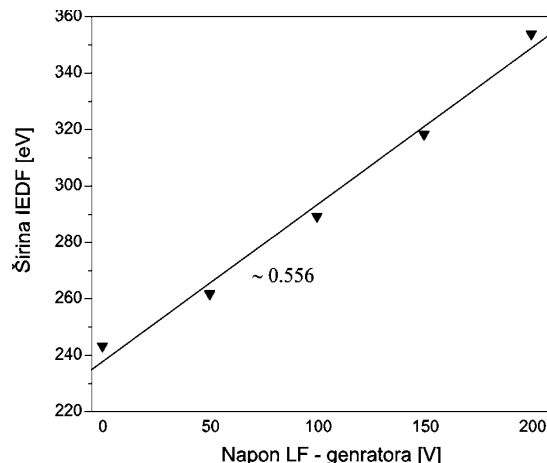


Slika 7. Prostorna zavisnost potencijala plazme i prielektrodne oblasti za različite vrednosti napona niskofrekventnog generatora.
Figure 7. Time averaged plasma potential versus position for different voltages of the low frequency generator.

Električno polje u blizini elektrode ubrzava jone i time povećava njihovu energiju, što se odražava kao širenje funkcije IEDF.

Linearnu zavisnost širine IEDF-a od napona niskofrekventnog generatora, možemo i eksplicitno pokazati ako uporedimo fitovanu pravu sa dobijenim vrednos-

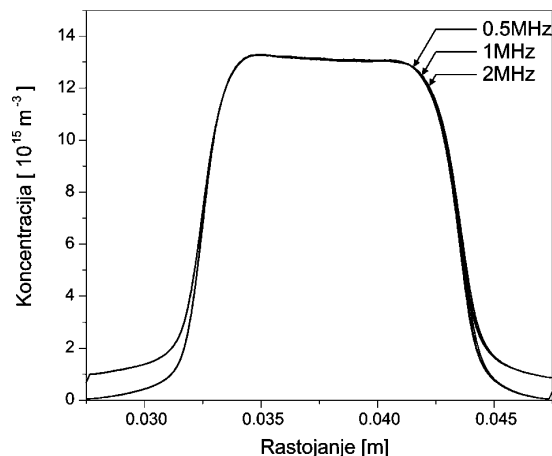
tima za pojedine slučajeve koje smo ispitivali (slika 8). Linearna zavisnost se može iskoristiti za predviđanje energije jona za proizvoljnu vrednost napona niskofrekventnog generatora u ispitivanom opsegu.



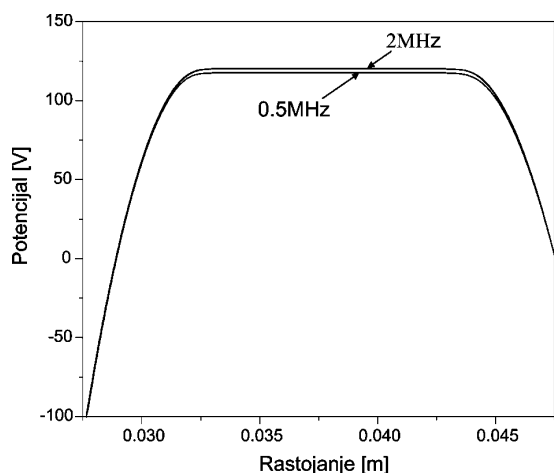
Slika 8. Širina IEDF u zavisnosti napona niskofrekventnog generatora (diskretne vrednosti) i fitovana prava.
Figure 8. Width of the IEDF versus low frequency voltage (discrete values) and fitted curve.

Ovim smo pokazali da se kontrola energije jona kod dvofrekventnog reaktora lako ostvaruje, čak se može i vrlo precizno kontrolisati. Međutim još značajnije je to što nam je fluks jona na unutrašnjoj elektodi ostao nepromenjen kroz ceo domen promene napona niske frekvencije.

Istraživanje ove oblasti je veoma opširno, jedno od pitanja koje se može postaviti jeste kako bi se menjale karakteristike plazme ako promenimo frekvenciju niskofrekventnog generatora. Na slikama 9 i 10 upravo je to pokazano, gde vidimo još jednom rezultat koji ide u prilog primene dvofrekventnih generatora u praksi.



Slika 9. Prostorne raspodele naelektrisanja za različite vrednosti frekvencije niskofrekventnog generatora.
Figure 9. Plot of the ion and electron densities versus position for different frequencies of the low frequency generator.



Slika 10. Prostorna zavisnost potencijala za različite vrednosti frekvencije niskofrekventnog generatora.

Figure 10. Time averaged plasma potential versus position for different frequencies of the low frequency generator.

Frekvencija niskofrekventnog generatora nema skoro nikakav uticaj na profil plazme kao i na prostorni raspored potencijala. Ovaj podatak nam govori da u odnosu na vrednost nižih frekvencija, sistem je prilično stabilan i predvidiv. Kao parametar za kontrolu procesa možemo koristiti napon niskofrekventnog generatora uz izvesnu slobodu izbora niske frekvencije.

ZAKLJUČAK

Plazma u reaktorima za nagrizanje se održava pomoću rf generatora. Pored osnovne uloge da održava gas jonizovanim, generator nam može poslužiti za kontrolu određenih procesa. U našem radu pažnju smo bili posvetili kontroli jona koji bombarduju unutrašnju elektrodu. U praktičnim primenama karakteristike jona kojima se obrađuje neka površina su od velikog značaja. Sa druge strane sam proces plazma nagrizanja je nezamenljiv u nanotehnologijama i sa tog aspekta važno je da se ostvari što preciznija kontrola nad procesima nagrizanja.

U našem istraživanju pokazali smo da se fluks i energija jona mogu kontrolisati pomoću generatora koji održava plazmu, međutim ovaj pristup nagrizanju je neprecizan. Pomoću još jednog generatora na nižoj frekvenciji pokazali smo da se može postići finija kontrola procesa u plazmi. Visokofrekventnim generatorom može se održavati plazma, dok se drugim generatorom na nižoj frekvenciji može uticati na energiju jona u blizini elektrode. Pokazali smo da se izborom geometrije reaktora i vrednosti spoljašnjeg kola može postići dovoljno mala sprega između ova dva generatora, tako da ostvarujemo mogućnost da niskofrekventnim generatorom utičemo samo na energiju jona koji se koriste za obradu površine unutrašnje elektrode.

LITERATURA

- [1] T. Makabe, Z.Lj. Petrović, Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication, Taylor & Francis, NY, 2006.
- [2] M.A. Liberman, A.J. Lichtenberg, Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 1994.
- [3] Z.Lj. Petrović, B. Radjenović, M. Radmilović-Radeno-
vić, Proceedings of 26th International Conference on Microelectronics MIEL, Niš, Serbia, 2008, pp. 19.
- [4] M. Radmilović-Radjenović, J.K. Lee, Phys. Plasmas **12** (2005) 063501.
- [5] M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, Plasma Sources Sci. Technol. **15** (2006) 1.
- [6] M. Radmilović-Radjenović and B. Radjenović, Contrib. Plasma Phys. **47** (2007) 165.
- [7] A. Bojarov, M. Radmilović-Radjenović, Z.Lj. Petrović, 24th Summer School and International SPIG, Contributed Papers, p. 387.
- [8] C.K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci. **19** (1991) 65.
- [9] V. Vahedi, M. Surendra, Comput. Phys. Commun. **87** (1995) 179.
- [10] J.P. Verboncoeur, Plasma Phys. Control. Fusion **47** (2005) A231-A260.
- [11] J.K. Lee, N.Yu. Babaeva, H.C. Kim, O.V. Manuilenko, J.W. Shon, IEEE Trans. Plasma Sci. **32** (2004) 47.

SUMMARY**MODELING OF DISCHARGES IN A CAPACITIVELY COUPLED DUAL FREQUENCY PLASMA REACTOR**

Aleksandar Bojarov, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj. Petrović

Institute of Physics, Center for Non-equilibrium Processes, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

In this paper we have modeled a dual frequency coupled plasma reactor (DF-CCP) by using a 1d3v PIC/MCC code. The obtained results apart from their theoretical relevance have practical applications especially for development of plasma reactors and for nanoelectronics. Dual frequency plasmas are used for etching of dielectric interconnect layers with high aspect ratios (contact holes). In the DF-CCP, the density of the plasma is controlled by the high frequency, while the ion energy depends mainly on the potential drop in the sheath, which is controlled by the low frequency. The results of our simulations show the dependence of the energy of the ions arriving at the inner electrode on the voltage of the low frequency generator and how the voltage of the high frequency generator affects the ion flux on the electrode.

Ključne reči: Radiofrekventna plazma • Simulacija • Plazma nagrizanje
Key words: Radiofrequency discharges • Simulation • Plasma etching