

IVANA ĐORĐEVIĆ
MARIJA
RADMILOVIĆ-RAĐENOVIĆ
ZORAN LJ. PETROVIĆ

Institut za fiziku, Zemun

NAUČNI RAD

UDK 621.3.049.77:519.87:621.316.722

DOI: 10.2298/HEMIND0904293D

MODELOVANJE PROBOJNOG NAPONA ZA GENERISANJE MIKROPRAŽNENJA*

Mikropražnjenja predstavljaju novi front istraživanja na polju neravnotežne plazme, koja je već u upotrebi kao jedan od ključnih tehnoloških faktora u daljem razvoju mikroelektronike, ujedno predstavljajući i osnov za razvoj nove generacije nano-elektronskih uređaja neophodnih za 65 i 40 nm tehnologije. Sve većem interesovanju za proučavanje mikropražnjenja doprinosi i razvoj tehnologije plazma nagrizanja (bez koga se ne može zamisliti proizvodnja integrisanih kola), generisanje nanostrukture, kao i mikro-biološki i nano-biološki razvoj i dijagnostika, postavljajući zahteve za što boljim razumevanjem kinetike i fizičkih fenomena vezanih za mikropražnjenja. U ovom radu je opisano modelovanje mikropražnjenja primenom modifikovanog Particle in Cell (PIC) koda sa Monte Carlo (MC) modelom, koji tretira proces sekundarne emisije elektrona usled jakog polja.

Proučavanje i kontrola električnog proboja u gasovima predstavlja veoma interesantnu, a ujedno i veoma važnu, tematiku ne samo u domenu nauke, pre svega fizike gasnih pražnjenja, već i za primene u mikroelektronskoj industriji, za razvoj tehnologije plazma nagrizanja i generisanje nanostrukture. Posebno treba istaći činjenicu da se plazma izvori mikronske dimenzije mogu integrisati sa drugim mikro-elektromehaničkim sistemima (MEMS). Mikrosistemi bazirani na plazmi se, dalje, mogu primeniti u bio-MEMS sterilizaciji i mikrohemijskoj analizi sistema. Smanjivanje komponenata je rezultiralo efektom smanjenja električnog probojnog napona koji, ukoliko se ignoriše, može da prouzrokuje neželjene posledice u toku rada. Radi optimizacije procesa plazma tehnologije, potrebno je što bolje razumevanje uslova gasnog proboja u gasnim pražnjenjima. Kao rezultat toga, javlja se značajno interesovanje za simulaciju i merenje krivih probojnog napona. Međutim, upravo odstupanje od *Paschen*-ovog zakona uočeno kod mikropražnjenja, ukazuje na činjenicu da ove krive ne pružaju dovoljne informacije o probojnim naponima i uslovima pod kojima se ona odvijaju.

Zbog velike složenosti, opisivanje plazme preko analitičkih modela je kompleksno, usled čega je u mnogim slučajevima korisnije koristiti tehnike kompjuterske simulacije za dobijanje informacija za karakteristike i svojstva plazme. Proučavanja gasnih pražnjenja u poslednjim dekadama prošlog veka, nedvosmisleno su pokazala da simulaciona tehnika predstavlja idealnu tehniku za proučavanje svojstava plazme iz dva razloga [1–3]. Prvi od njih je svakako činjenica da su troškovi izrade uređaja za plazma procesiranje veoma visoki. Sa smanjenjem dimenzija plazme, troškovi izrade se još više uvećavaju. S druge strane, na malim geometrijama (razmacima) između elektroda, nemogućnost ostvarivanja dob-

ro definisanih eksperimentalnih uslova, takođe predstavlja presudan razlog u favorizovanju korišćenja simulacionih tehnika radi proučavanja karakteristika pražnjenja, u našem slučaju probojnih napona.

U ovom radu, modelovanje mikropražnjenja je vršeno korišćenjem jednodimenzionog elektrostatičkog Particle-in-Cell (PIC) [4–6] koda sa Monte Carlo (MC) modelom [7] za tretiranje sudarnih plazmi. Korišćeni kod je razvijen na *Berkeley* Univerzitetu i s obzirom na to da je taj kod detaljno opisan u nizu radova mi ćemo se, nakon konciznijeg opisa, fokusirati na modifikovanje koda koje smo mi izvršili, tačnije njegovog dela koji tretira proces sekundarne emisije elektrona usled efekata jakog polja.

PIC/MCC simulaciona tehnika

Simulacija kretanja čestica u plazmi predstavlja jedan od efikasnih načina za njeno opisivanje. Kod takvog pristupa, posvećuje se pažnja kinetici i interakciji čestica sa spoljašnjim elektromagnetnim poljem, zbog čega je opis lokalnih pojava u plazmi mnogo precizniji. Druga pogodnost je vrlo mali broj aproksimacija koje sadrži jedan ovakav model, odnosno većina korišćenih jednačina se koristi u izvornom obliku, što u velikoj meri odražava realnu sliku fizičkih procesa.

U PIC simulacijama kretanje čestica se opisuje preko praćenja kretanja takozvanih «super-čestica» koje predstavljaju skupove klasičnih konstituenata plazme (elektrona). Tok PIC/MCC simulacije je prikazan na slici 1 [8]. Kretanje se odvija u diskretnim vremenskim skokovima, dok su položaj i brzina čestice date kontinualnim vrednostima. Gustina struje i gustina naboisanja se izračunavaju u diskretnim tačkama prostora na osnovu interpolacije brzina i položaja čestica. Time su stvoreni uslovi da se, primenom *Maxwell*-ovih jednačina, izračuna električno i magnetno polje u diskretnim tačkama prostora, a zatim njegovo dejstvo ponovo, interpolacijom, primeni na kontinualne čestice. Diskretizacija polja je neophodna jer bi, u suprotnom, bili primorani da za svaku česticu sumiramo interakciju sa svakom preostalom česticom. Razmatranje interakcija na ovaj način za N čestica bi zahtevalo N^2 računskih

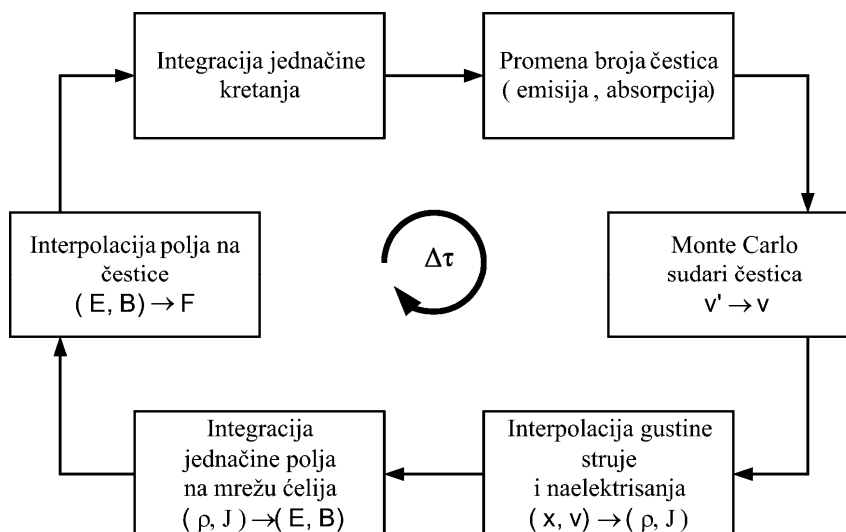
*Rad saopšten na skupu „Sedmi seminar mladih istraživača“, Beograd, 22–24. decembar 2008.

Autor za prepisku: I. Đorđević, Institut za fiziku, Pregrejavica 118, 11080 Zemun, Srbija.

E-pošta: djordjevic.iv@gmail.com

Rad primljen: 22. decembar 2008.

Rad prihvaćen: 23. mart 2009.



Slika 1. Šematski prikaz PIC/MCC simulacije.

Figure 1. Schematic description of the PIC/MCC simulation.

operacija, dok diskretizacija polja zahteva $N \log N$ operacija.

Dobijamo prostor izdijeljen mrežom ćelija u čijim tačkama znamo vrednosti polja (razlog za naziv «Particle in cell»). Jedan od uslova koji mora da zadovolji dimenzija ćelije jeste da se unutar nje polje sporo menja, odnosno da dimenzije ćelija budu znatno manje od talasnih dužina elektromagnetnih oscilacija u plazmi.

U PIC/MCC simulacijama, probojni napon se određuje balansom između dva procesa: procesa proizvodnje naelektrisanih čestica usled jonizacije i procesa njihovog gubitka putem difuzije i zahvata elektrona. Za date vrednosti pritiska gasa, interval u kojem se probojni napon nalazi, određuje se na osnovu vremenske zavisnosti broja čestice. Drugim rečima, ako broj elektrona raste sa vremenom, i ukoliko je posmatrani rast brži nego kod linearne zavisnosti, elektroni se multipliciraju i potrebno je smanjiti vrednost napona da bi se dobila minimalna vrednost napona (proboj) na kojoj multiplikacija elektrona otpočela dovodeći do proboja. Ukoliko broj elektrona u funkciji vremena opada, nema multiplikacije i potrebno je povećati napon da bi se dobila minimalna vrednost probojnog napona na kojoj otpočinje proces multiplikacije. Na taj način, smanjuje se interval u kome se nalazi vrednost probojnog napona. Posebno ističemo činjenicu da je tačnost ovako određenog probojnog napona reda veličine 3 V, što je izuzetna tačnost imajući u vidu da je kod nekih eksperimenata tačnost određivanja probojnog napona varirala i do 15 V, u zavisnosti od spoljašnjih uslova, uslova na elektrodama, itd.

Izbor graničnih uslova je veoma važan i zavisi od fizičkih uslova granice zidova i elektroda. Kada elektron dospe do elektroda, može biti apsorbovan i emituje se novi elektron, ili se može reflektovati od površine u određenom pravcu i sa određenom energijom. Joni koji se približe površini elektrode mogu dovesti do emisije

sekundarnih elektrona, koji mogu biti emitovani sa verovatnoćom koja zavisi od energije udarnih jona. Opisani mehanizam sekundarne emisije elektrona indukovani udarom jona o površinu elektrode je primenjiv za međuelektrodna rastojanja veća od 5 μm . Za manje gepove, međutim, mehanizam sekundarne emisije je posve drugačiji i prouzrokovan je jakim električnim poljem. Kada je električno polje blizu katode dovoljno veliko, elektron tuneluje iz metala u gasnu fazu i broj emitovanih sekundara je veći. U malim gepovima proces sekundarne emisije elektrona je odgovorniji od uticaja samih jona.

Tačnost podataka za koeficijente sekundarne emisije elektrona, koji se koriste kao ulazni podaci u modelovanju pražnjenja, veoma mnogo utiče na proračun pražnjenja.

Odstupanje od Pashen-ovog zakona

Kod električnog proboja u gasovima, Pashen-ov zakon opisuje zavisnost probojnog napona, U_B , od proizvoda pd (proizvoda pritiska, p , i međuelektrodnog rastojanja, d). Početkom dvadesetog veka, u seriji radova otkriva se izražen nedostatak Pashen-ovog zakona. U opštem slučaju, Pashen-ova kriva ima oblik slova U, sa minimalnom vrednošću probojnog napona na određenoj vrednosti pd . Takva kriva predstavlja ravnotežu između broja elektrona koji se gube usled difuzije i drifta u prostoru između elektroda, i broja sekundarnih elektrona nastalih na katodi [9].

Verovatnoća jonizacije preko sudara u gasu i verovatnoća sekundarnih elektrona stvorenih na katodi zavisi od srednje kinetičke energije jona i elektrona i, dakle, redukovano električnog polja, E/N . Najranija istraživanja otkrila su nedostatke Pashen-ovog zakona na visokim pritiscima [10,11]. U slučaju geometrije ravnih paralelnih elektroda na visokim pritiscima sa porastom

napona probojni napon raste linearno, dok sa porastom pritiska napon počinje da raste linearno, ali opada na visokim pritiscima. *Townsend*-ova teorija, kod koje uzastopna jonizacija ostvaruje proboj u gasu, zadovoljava juće opisuje proces na većim rastojanjima. Međutim, uslovi se ne mogu stvoriti u istom slučaju za mala rastojanja, zato što je broj jona u međuelektrodnom prostoru tako mali da oni ne mogu pojačavati ukupno polje na katodi. Kada je multiplikacija u gasu mala, električno polje postaje dovoljno veliko pre proboja. Emisija elektrona usled polja proizvodi mali broj jona koji, sa njihovim prostornim naelektrisanjem, pojačavaju polje na katodi. Zbog jakog pojačanja struje sa poljem, ovaj proces podiže proboj, čak i kada je verovatnoća za bilo koji poseban elektron da postigne sudar usled jonizacije veoma mala [12].

Odstupanje od *Pashen*-ovog zakona javlja se i kod proboja između blisko postavljenih elektroda na atmosferskom pritisku. U slučaju veoma malog rastojanja proboj se javlja na potencijalima za koji se proboj ne javlja na nekom pritisku kada su elektrode postavljene na većim rastojanjima. Kada je rastojanje između elektroda manje od 5 μm , električno polje u blizini katode postaje veoma jako, prouzrokujući opadanje probojnog napona sa smanjenjem rastojanja dovodeći do odstupanja od standardnog *Paschen*-ovog zakona. Takvo odstupanje se može pripisati postojanju jakog električnog polja koje izaziva intenzivnu sekundarnu emisiju elektrona sa katode. Usled pojačane sekundarne emisije elektrona dolazi do drastičnog pada probojnog napona.

Germer je zapazio i analizirao odstupanje od *Pashen*-ovog zakona kod mikropražnjenja, ukazujući da se takvo odstupanje može očekivati kada je proces sekundarne emisije upravljani povećavanjem jona usled emisije poljem, pre nego uticajem samih jona [13]. *Boyle* je naveo da pozitivan jon kada se bliži katodnoj površini ne može da umanji širinu potencijalne barijere na katodnoj površini blizu dobijenih sekundarnih elektrona i, otuda, opadanje probojnog napona [14]. Kasnije, *Torres* i *Dhariwal* su predložili tumačenje nekih odstupanja baziranih na efektu tunelovanja elektrona [15].

Uticaj emisije elektrona usled jakog polja

Emisija elektrona može biti definisana kao oslobađanje elektrona sa površine supstance prouzrokovane spoljašnjom energijom prenesenom do elektrona. Uopšteno, dodatna spoljašnja energija potrebna elektronu da bude oslobođen sa metalne površine može poticati iz takvih izvora kao što su: energija sadržana u elektronskom polju, svetlosna energija, ili kinetička energija. Prema tome, sekundarna emisija elektrona može zauzeti mesto zahvaljujući primarnim procesima kao što su emisija usled polja, termička emisija i fotoemisija ili zahvaljujući sekundarnim procesima kao što su bombardovanje jonima. Emisija elektrona usled jakog polja (engleski *Field Emission* ili skraćeno FE), koja se još na-

ziva F-N tunelovanje, proces je u kojem elektroni tuneluju iz barijere u prisustvu visokog električnog polja. FE predstavlja važan faktor u proboju uveden u malim geometrijama i može biti opisan kao izbacivanje elektrona sa površine za visoko polje [16]. Od kada se FE može ostvariti na temperaturi koja je mnogo niža od potrebne za termičku emisiju, to se on ponekad naziva i hladna katodna emisija. U odsustvu jakog električnog polja elektron zahteva određenu minimalnu energiju (koja se naziva radna funkcija) da bi mogao da se oslobodi sa površine datog materijala, koji se ponaša kao barijera. Međutim, ako je materijal postavljen u električnom kolu koje daje jaku negativnost s obzirom na blizinu pozitivne elektrode, radna funkcija je niža za neke opsege za koje će neki elektroni imati dovoljnu energiju da izađu sa površine barijere.

Emisija elektrona usled jakog električnog polja pokazuje neke prednosti u poređenju sa termoelektronskom emisijom i fotoemisijom, i to tako da postepeno povećava efikasnost, ima manje rasejanje emitovanih elektrona, brže vreme uključivanja, i kompaktnost. Emisija elektrona usled jakog električnog polja, tj. FE, koja ograničava maksimum radnog napona za mikropražnjenja, može biti primenjena kao izvor elektrona u fleš memoriji, elektronskoj mikroskopiji, MEMS sistemima, i FE displejima.

Uticaj sekundarne emisije elektrona

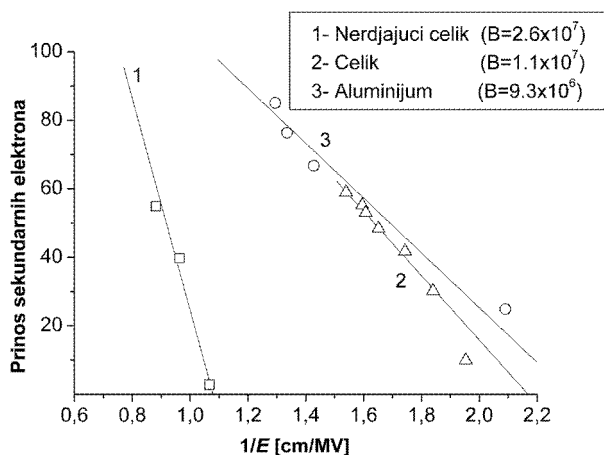
Sekundarna emisija elektrona sa površine, na osnovu delovanja jona, opisana je kao doprinos preko jona naznačena kao γ i određuje broj sekundarnih elektrona proizvedenih na katodi usled uticaja jona [17]. Iako ovaj koeficijent zavisi od materijala katode i vrste gasa, γ često je simuliran kao konstanta, ili u slučaju argona, energija zavisi od doprinosa preko jona i implementira se u kodu simulacije.

U prethodno opisanom mehanizmu, sekundarna emisija elektrona indukovana jonima, ipak nije primenljiva u prisustvu visokih električnih polja. Kada električno polje blizu katode postane dovoljno veliko, potrebno je uzeti u računanje tunelovanje elektrona iz metala u gasnu fazu. Dalje, kada se jon bliži katodi ne može videti potencijalnu barijeru od elektrona u metalu, što rezultuje povećanjem jona usled FE elektrona. Izraz za koeficijent efektivne emisije elektrona, γ , koji uključuje doprinos jona emisijom polja predložili su Boyle i Kisliuk [12]:

$$\gamma = K \exp(-B/E)$$

gde su K i B konstante koje zavise od materijala katode i gasa, a E je elektrostatičko polje blizu katode. U skladu sa datim izrazom, kada je električno polje u katodnom regionu veće nego prag vrednosti datog od B , koeficijent sekundarne emisije elektrona se naglo povećava i otuda probojni napon opada. Na slici 2 prikazana je zavisnost prinosa sekundarnih elektrona od jačine električ-

nog polja. Linije su dobijene fitovanjem eksperimentalnih rezultata predstavljenih simbolima. Očigledno, jako električno polje dovodi do prasta koeficijenta koji karakteriše sekundarnu emisiju elektrona.



Slika 2. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji jačine električnog polja.

Figure 2. Electron yield per ion as a function of the electric field.

Konstanta B može biti izračunata iz izraza:

$$B = 6,85 \times 10^7 \Phi^{3/2} / \beta$$

gde je β faktor pojačanja i Φ radna funkcija metala izražena u eV. Međutim, iz eksperimentalnih rezultata vrednost za B je određena za neke materijale, kao na primer za aluminijum, čelik i nerđajući čelik (videti sliku 2). Na primer, vrednost koja odgovara aluminijumu je $9,3 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$.

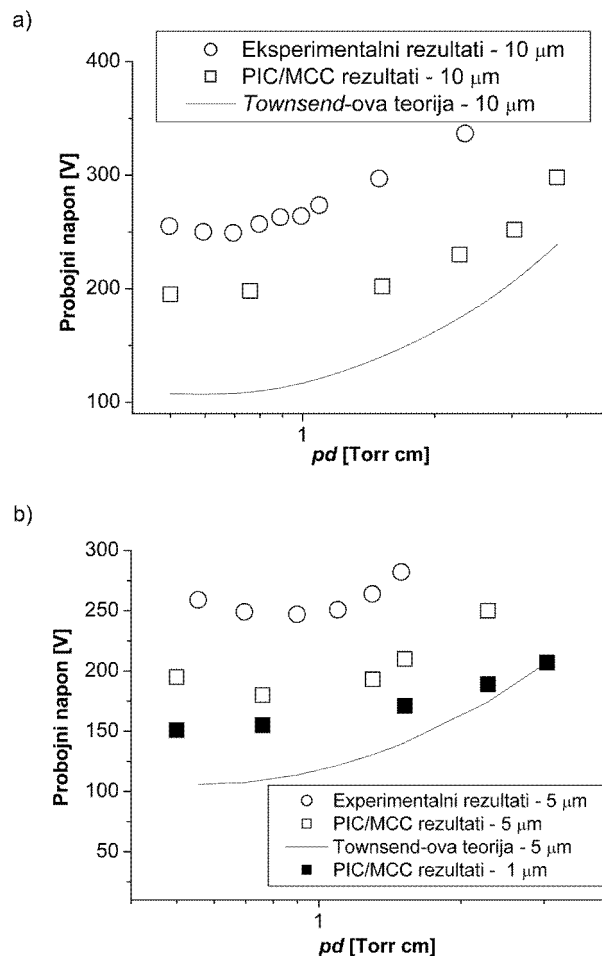
S druge strane, određivanje konstante K može biti dosta teže, posebno ako ima komplikacija zbog zahvata elektrona, jonizacije od metastabilne faze, itd. Osobito, konstanta K može biti nađena kao odnos gustine struje uzrokovana emisijom polja od gustine struje pozitivnih jona na katodi [18].

REZULTATI MODELOVANJA

Da bi se procenio uticaj jakog električnog polja u blizini katode na vrednost probojnog napona, izvršeni su proračuni koristeći jednodimenzionalni PIC/MCC kod [3]. Proračuni su izvršeni za argon i azot, za DC pražnjenja. Osnovna ideja je bila da se modeluju neki, već publikovani rezultati [1,3,18], te da se na osnovu stečenog iskustva modeluju i neki novi eksperimentalni rezultati [19].

Na slici 3 prikazano je poređenje rezultata merenja koje su izvršili Ito i saradnici (krugovi) [20] za DC pražnjenje u argonu, sa rezultatima simulacija koje smo izvršili koristeći jedno-dimenzionalni PIC/MCC kod (kvadrati) i izrazom za DC probojni napon dobijenim po Townsend-ovoj teoriji (linija). Svi proračuni su izvršeni

uzimajući u obzir uticaj sekundarne emisije elektrona usled jakog električnog polja.



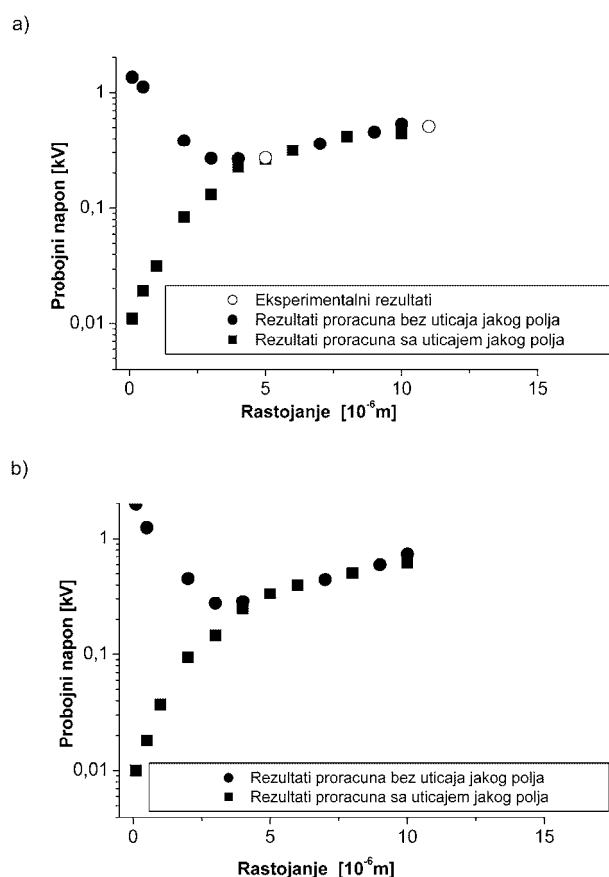
Slika 3. Zavisnost probojnog napona od proizvoda pd kod DC pražnjenja u argonu na međuelektrodnim rastojanjima od: 10 (a) i 5 i 1 μm (b). Eksperimentalni rezultati preuzeti iz rada [20] predstavljeni su krugovima, dok su rezultati PIC/MCC simulacija dati kvadratima. Linije odgovaraju rezultatima dobijenim primenom izraza za DC probojni napon prema Townsend-ovoj teoriji [21].

Figure 3. Dependence of the breakdown voltage of the pd product with DC discharges in argon for the interelectrode gap of: 10 (a) and 5 and 1 μm (b). Experimental data taken from [20] are given by open circles, while results of the PIC/MCC simulations are given by squares. Solid lines correspond to results gained by using formulation for DC breakdown voltage in Townsend theory [21].

Kao što se sa slikom 3a i 3b može uočiti, eksperimentalni rezultati i rezultati proračuna imaju istu tendenciju, premda postoji razlika u njihovoj vrednosti, tj. rezultati simulacija su sistematski niži. To se može objasniti činjenicom da, osim gasa i rastojanja između elektroda, nemamo nikakvih drugih informacija o eksperimentalnim uslovima, kao što su, recimo, materijal od koga je katoda sačinjena ili temperatura površine, a koje znatno utiču na vrednost probojnog napona. U slučaju

rastojanja od 10 i 5 μm , predstavljeni su i teorijski rezultati (linije). Primećuje se slična tendencija teorijskih rezultata, eksperimentalnih i rezultata simulacije. Mnogo niža vrednost probojnog napona dobijena u teoriji je rezultat činjenice da je izraz za DC probojni napon dobijen pod pretpostavkom da je prinos sekundarnih elektrona konstantan. U slučaju rastojanja od 1 μm (puni kvadrati) nema eksperimentalnih podataka, a probojni napon je niži, nego u slučaju 5 μm , zbog jačeg električnog polja i samim tim intezivnije skundarne emisije elektrona.

Na slici 4 prikazani su rezultati proračuna izvršeni za argon, ne uključujući (puni krugovi) i uključujući uticaj jakog električnog polja (puni kvadrati), na pritiscima od 1 i 4 atm, redom.

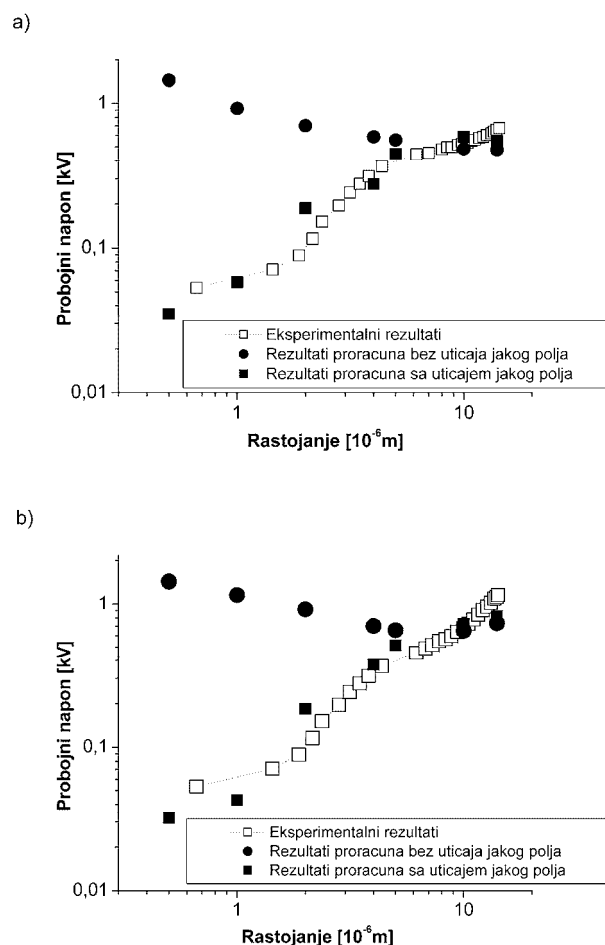


Slika 4. Probojni napon u funkciji rastojanja između elektroda u argonu na pritiscima od: 1 (a) i 4 atm (b). PIC/MCC rezultati ne uzimajući i uzimajući u obzir uticaj jakog polja su prikazani punim krugovima i punim kvadratima, redom. Figure 4. Breakdown voltage as a function of the gap spacing in argon at the pressure of: 1 (a) and 4 atm (b). Results of the PIC/MCC simulations not taking and taking into account the field emission effect are obtained solid circles and solid squares, respectively.

Prikazani rezultati ilustruju odstupanje od standardnog Paschen-ovog zakona na rastojanjima manjim od 5 μm . U slučaju za pritisak od 1 atm, izvršeno je

poređenje i postignuto je dobro slaganje između proračuna (puni kvadrati) i eksperimentalnih podataka (otvoreni kružići) Ito-a i saradnika [20].

Slično slici 4, gde su prikazani rezultati za argon, na slici 5 prikazana je zavisnost probojnog napona u azotu od rastojanja između elektroda, takođe na pritiscima od 1 i 4 atm. U oba slučaja, rezultati simulacija izvršeni bez uzimanja (puni kružići) i sa uzimanjem u obzir uticaja jakog polja (puni kvadrati) upoređeni su sa rezultatima merenja koje su izvršili Thores i Dhariwal [15].



Slika 5. DC probojni napon u azotu u funkciji rastojanja između elektroda na pritiscima od: 1 (a) i 4 atm (b). PIC/MCC rezultati dobijeni bez (puni kvadrati) i sa efektom jakog električnog polja (puni krugovi) upoređeni su sa eksperimentalnim rezultatima [15] (otvoreni simboli). Figure 5. DC breakdown voltage as a function of the inter-electrode gap in nitrogen at the pressure of: 1 (a) and 4 atm (b). Results of the PIC/MCC simulations gained not taking (solid squares) and taking (solid circles) into account the field emission effect are compared with the experimental results [15] (open symbols).

Poređenje ekperimentalnih rezultata sa rezultatima simulacija, slika 5, ukazuje da se rezultati proračuna dobijeni uključivanjem efekata jakog polja mnogo bolje

slaju sa eksperimentalnim rezultatima i oba rezultata ukazuju na opadanje probojnog napona na mikrorastojanjima. Na osnovu toga može se zaključiti da se na rastojanjima od nekoliko mikrometara, pre treba uzeti u obzir zavisnost prinosa sekundarnih elektrona od jačine električnog polja, nego njegovu zavisnost od energije (na primer, izraz koji su predložili Phelps i Petrović [17]) koja je karakteristična za rastojanja veća od 5 μm .

ZAKLJUČAK

Minimalna vrednost probojnog napona na određenoj vrednosti proizvoda pd preko Pashen-ove krive ne daje dobre rezultate za mala rastojanja između elektroda. Na mikronskim ili submikronskim rastojanjima mora se uzeti uticaj jakog električnog polja. Jako električno polje izaziva intenzivnu sekundarnu emisiju elektrona sa katode i smanjuje vrednost probojnog napona. Za očekivanje je mali broj jona na tako malim rastojanjima, ali usled sekundarne emisije elektrona pod uticajem jakog polja njihov broj se povećava. Kada se jon bliži katodi, on ne može videti potencijalnu barijeru od elektrona u metalu, i zbog toga se njihov broj nagomilava na katodi. U mikroprostoru između elektroda sekundarna emisija elektrona je uticajnija na povećanje jona usled emisije polja. Na rastojanjima manjim od 2 μm javlja se kvantno tunelovanje elektrona iz metala u gasnu fazu što dovodi do priraštaja sekundarne emisije elektrona sa katode i snižavanja vrednosti napona proboja.

Rezultati prikazani u ovom radu mogu biti korisni za određivanje minimalnih napona paljenja u mikroplazma izvorima kao i za određivanje maksimalno bezbednog operativnog napona i kritične dimenzije u drugim mikrokomponentama.

LITERATURA

- [1] M. Radmilović-Radjenović, J.K. Lee, F. Iza, G.Y. Park, J. Phys. D: Appl. Phys. **38** (2005) 950.
- [2] F. Iza, J.K. Lee, M.G. Kong, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 075004.
- [3] M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, IEEE Trans. Plasma Sci. **35** (2007) 1223.
- [4] C.K. Birdsall, IEEE Trans. Plasma Sci. **19** (1991) 65.
- [5] J.P. Verboncoeur, M.V. Alves, V. Vahedi, C. K. Birdsall, J. Comp. Phys. **104** (1993) 321.
- [6] S. Hamaguchi, IBM J. Res. Develop. B **43** (1999) 199.
- [7] V. Vahedi, M. Surendra, Comput. Phys. Commun. **87** (1995) 179.
- [8] H.C. Kim, F. Iza, S.S. Yang, M. Radmilović-Radjenović, J.K. Lee, J. Phys. D: Appl. Phys. **38** (2005) R283.
- [9] M. Radmilović-Radjenović, J.K. Lee, Phys. Plasmas **12** (2005) 063501.
- [10] F.L. Jones, C.G. Morgan, Phys. Rev. **82** (1951) 970.
- [11] P. Kisliuk, J. Appl. Phys. **30** (1959) 51.
- [12] Yu.D. Korolev, G.A. Mesyats, Physics of pulsed breakdown in gases, URO-press, 1998.
- [13] L.H. Germer, F.E. Haworth, Phys. Rev. **73**
- [14] W.S. Boyle, P. Kisliuk, Phys. Rev. **97** (1955) 255.
- [15] R.S. Dhariwal, J.M. Torres, M.P.Y. Desmulliez, IEE Proc. Sci. Meas. Techn. **147** (2000) 261.
- [16] R.H. Fowler, L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. (London) A **119** (1928) 173.
- [17] A.V. Phelps, Z.Lj. Petrović, Plasma Sources Sci. Technol. **8** (1999) R21.
- [18] M. Radmilović-Radjenović, B. Radjenović, Plasma Sources Sci. Technol. **16** (2007) 337.
- [19] Z.Lj. Petrović, N. Škoro, D. Marić, C.M.O. Mahony, P.D. Maguire, M. Radmilović-Radjenović, G. Malović, J. Phys. D: Appl. Phys. **41** (2008) 194002.
- [20] T. Ito, T. Izaki, K. Terashima, Thin Solid Films **386** (2001) 300.
- [21] M.J. Druyvestein, F.M. Penning, Rev. Mod. Phys. **12** (1940) 87.

SUMMARY**MODELING OF A BREAKDOWN VOLTAGE IN MICRODISCHARGES**

Ivana Đorđević, Marija Radmilović-Radjenović, Zoran Lj. Petrović

Institute of Physics, Zemun, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Non-equilibrium plasmas have been used as one of the principal technologies for development of microelectronics and they are the basis for the development of new generations of nano-electronics devices required for 65 and 40 nm technologies. Microdischarges recently have become more common in everyday life. Technology of plasma etching has enabled us to develop such discharges and the field of microdischarges has grown into the most interesting field of the physics of collisional non-equilibrium plasmas. Recently, an effort to fabricate microplasma sources that can be integrated with other MEMS devices to form larger Microsystems has been made. Plasma-based microsystems can find application in bio-micro-electro-mechanical system (bio-MEMS) sterilization, small-scale materials processing and microchemical analysis systems. However, integrability requires not only a size reduction, but also an understanding of the physics governing the new small-scale discharges. In this paper, we have performed modeling of a breakdown voltage by using Particle-in-Cell/Monte Carlo collision (PIC/MCC) code taking into account the secondary electron emission due to a high field.

Ključne reči: Mikropražnjenja • Sekundarna emisija • Modelovanje
Key words: Microdischarges • Secondary emission • Modeling