

UTICAJ REFLEKSIJE ELEKTRONA SA ANODE NA PROSTORNU ZAVISNOST EMISIJE U TAUNZENDOVOM PRAŽNENJU U NEONU

Željka Nikitović, Aleksandra Strinić, Vladimir Stojanović, Gordana Malović i Zoran Petrović
Institut za fiziku, Pregrevica 118
11080 Beograd, Srbija i Crna Gora

Sadržaj – U radu je predstavljen doprinos refleksije elektrona na anodi u ukupnoj prostornoj zavisnosti emisije koji se javlja u Taunzendovom pražnjenju u neonu između planparalelnih elektroda. Za uslove srednjih i visokih vrednosti redukovano električnog polja razmatran je uticaj grafitne anode. Prostorna zavisnost emisije linije 585 nm (prelaz $2p_1-1s_2$) određena metodom Monte Carlo simulacija se znatno bolje slaže sa eksperimentalnim profilom ukoliko je uključena anodna refleksija elektrona.

1. UVOD

Refleksija elektrona sa anode dovodi do izbacivanja sekundarnih elektrona, kao i do dodatne jonizacije u gasnoj fazi i na taj način doprinosi kinetici jonizacije i proboja u gasnim pražnjenjima. Jelenković i Phelps [1] su uočili efekat refleksije, u blizini anode, koji se manifestuje kao pik u prostornom emisionom profilu. Razlog za to nađen je u znatno manjem koeficijentu refleksije elektrona za grafit u odnosu na druge materijale. Stojanović i Petrović [2] su uspešno primenili Monte Carlo simulaciju da bi pokazali da se na višim vrednostima redukovano električnog polja E/N (E - električno polje, N -gustina gasa) efekat reflektovanih elektrona može objasniti činjenicom da oni nakon refleksije gube energiju vraćajući se unazad. Pored eksperimenata na visokim vrednostima E/N , uticaj reflektovanih elektrona je opažen i u nizu drugih kategorija gasnih pražnjenja na niskim pritiscima. Phelps i Petrović [3] su ukazali na značaj refleksije u samom aktu proboja, na visokim E/N .

Podaci o ekscitaciji inertnih gasova u blizini površine su nedovoljno poznati ne samo usled nedostatka podataka za interakciju elektrona sa površinama u uslovima gasnih pražnjenja, već i zbog nedostatka konzistentnih podataka o ekscitaciji u gasu. Potreba za određivanjem efikasnih preseka za ekscitaciju velikog broja nivoa inertnih gasova je nastala iz njihove velike primene u preciznom određivanju funkcije raspodele energije elektrona u rf plazmama.

Domen radnih uslova u kojima su prezentirani rezultati preklapa se sa većinom plazma uređaja i zbog toga se važnost teških čestica u ekscitaciji i jonizaciji mora uzeti u obzir na realan način. Na visokim vrednostima E/N je neophodno razviti model koji spreže transport elektrona sa transportnim modelima za jone i brze neutrone. Razvoj modela, puštanje simulacija za realne uslove, poređenje sa eksperimentalnim podacima i dobijanje novih eksperimentalnih podataka za visoke vrednosti redukovano električnog polja E/N , su potrebni za razumevanje nelokalnog transporta elektrona u prikatodnim slojevima visokofrekventnog pražnjenja, jednosmernih pražnjenja za raspršivanje kao i drugih primena kolizionih plazmi na niskim pritiscima.

2. ZNAČAJ IZUČAVANJA REFLEKSIJE ELEKTRONA NA DISCIPLINE U DOMENU ELEKTROTEHNIKE

Pražnjenja u smešama retkih gasova posebno neona i ksenona, su osnova za dobijanje plazma ekrana koji se primenjuju kako za ekrane na javnim mestima gde treba konkurisati dnevnom svetlu, tako i za kućnu upotrebu. U oba slučaja potrebno je optimizovati broj fotona koji se emituje po unesenoj energiji jer u tom faktoru ovi ekrani zaostaju za klasičnim katodnim cevima i za faktor 2. Optimizacijom kinetike ekscitacije moguće je promeniti karakteristike ovih plazmi kako kroz promenu materijala anode, tako i kroz efikasniji prenos energije u gasnoj fazi. Druga primena gde analiza efekta refleksije elektrona ima veliku ulogu su pražnjenja na niskim pritiscima, a samim tim i velikim poljima. U to spadaju i sistemi za katodno raspršivanje radi nanošenja tankih slojeva kao i neke vrste visokonaponskih prekidača (npr. prekidači na bazi pseudovarnice engl. pseudo spark). U ovim uslovima na anodi dolazi do velike jonizacije i ekscitacije zbog refleksije elektrona koji moraju da izgube energiju kretanjem nasuprot dejstva polja i tako dolaze u zonu veće efikasnosti ekscitacije i jonizacije. Ovi procesi se moraju uzeti u obzir bilo da bi se modelovali radni uslovi ovih uređaja, a takođe i da bi se iz eksperimenata o probojnim uslovima u pražnjenju dobili podaci o sekundarnim koeficijentima koji su kritični za postizanje proboja u dc uslovima i rada na višim energijama u rf poljima. Značaj refleksije takođe postoji kod detektora elementarnih čestica sa umnožavanjem elektrona koji se koriste za registrovanje nuklearnih pojava, elementarnih čestica i za registrovanje slike u primeni radijacionih metoda za dijagnostiku. Promena koeficijenta refleksije anode bi uticala značajno na rad ovih detektora od kojih se baš veliki broj pravi u neonu, odnosno u smešama neona.

Na kraju sudari naelektrisanih čestica sa zidovima sudova imaju ključno mesto u nanotehnologijama baziranim na primeni plazme i ponašanju mikro i nano komponenti. Na primer kada se promene dimenzije električnih uređaja u mikronske onda je proizvod pritiska i razmaka između elektroda pd pomeran u domen minimuma na Paschenovoj krivoj te probojni naponi čak i u vazduhu na atmosferskom pritisku mogu da padnu na stotinak volti ili još niže. U postizanju uslova za proboj važno mesto će imati i refleksija elektrona kao i emisija usled polja, jer će povećavati efikasnost proizvodnje elektrona i time će efikasnost elektro motora u mikronskim dimenzijama biti značajno smanjena, a povećavaju se mogućnosti oštećenja mikronskih struktura usled proboja.

3. MONTE CARLO TEHNIKA

Monte Carlo simulacije imaju veliku primenu u analizi transporta elektrona. Posmatra se roj elektrona, smatrajući da je koncentracija roja dovoljno mala da se kulonovske interakcije između elektrona zanemaruju, tako da je kretanje određeno samo električnim poljem i sudarima sa česticama gasa. Prati se kretanje jednog elektrona ili velikog broja elektrona u vremenu i prostoru, a slučajnim brojevima se biraju njihove putanje, tj. pravac kretanja posle sudara sa atomima ili molekulima, trenutak sledećeg sudara, vrsta sudara i ostali parametri kretanja.

Monte Carlo kod, korišćen u našoj analizi, je baziran na tehnici nultih sudara koja je primenljiva za stacionarno Taunzendovo pražnjenje i sastoji se iz četiri koda. Prvi kod prati kretanje elektrona sa katode, drugi kod prati kretanje jona stvorenih u sudarima elektrona i atoma gasa, a treći prati kretanje neutrala stvorenih od strane jona. Iz analize sva tri dela dobijaju se prostorne zavisnosti emisije, ekscitacioni koeficijenti [2] i kao rezultat standardne swarm analize određuju se efikasni preseki [4].

Četvrtim Monte Carlo kodom praćen je uticaj refleksije elektrona sa grafitne površine i stvorenih sekundarnih elektrona na emisiju. Ovaj kod je potpuno nezavisan od koda za simulaciju elektrona sa katode i može se, prema potrebi uključivati i isključivati u simulacije. Broj reflektovanih elektrona u simulaciji određen je energijski [5] i ugaono [6] zavisnim koeficijentom refleksije. Njihova početna energija birana je prema zadatoj funkciji raspodele reflektovanih elektrona [7]. Na sličan način, broj sekundarnih elektrona je određen pomoću koeficijenta sekundarne emisije [8] i kosinusne zavisnosti od upadnog ugla. Njihove energije zadovoljavaju Maksvelovu funkciju raspodele po energijama. Svi elektroni sa anode su polazili po pravcima određenim sa kosinusnom raspodelom po uglovima.

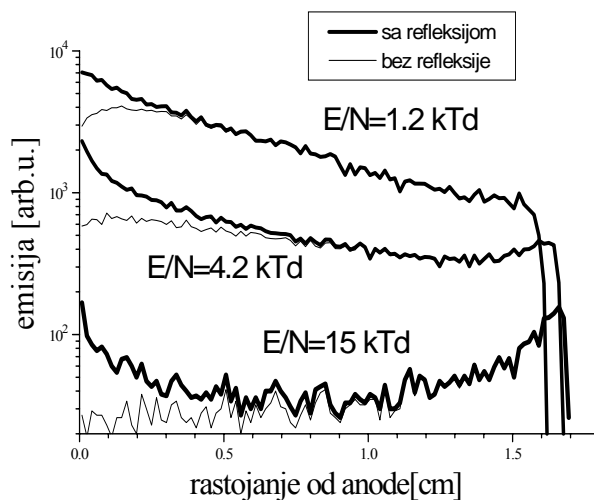
Korišćeni Monte Carlo kod za simulaciju transporta elektrona, jona i neutrala je razvijen zbog modelovanja prostorne raspodele emisije pod neravnotežnim uslovima na visokim vrednostima redukovano električnog polja E/N i niskim strujama. Kod uključuje najdetaljnije predstavljanje transporta i rasejanja elektrona uključujući i refleksiju i multiplikaciju na anodi i simulaciju transporta jona i neutrala za realnu geometriju eksperimenta.

Kao ulazne podatke koristili smo set efikasnih preseka koje daje Hayashi [9], koji je prethodno bio testiran kroz poređenja sa eksperimentalno određenim brzinama drifta, karakterističnim energijama i jonizacionim koeficijentima. U cilju određivanja oblika (energijske zavisnosti) efikasnih preseka korišćeni su dostupni podaci iz literature (Puech i Mizzi) [10]. Anizotropnost elektronskog rasejanja uzeta je u obzir korišćenjem diferencijalnih preseka za elastično i neelastično rasejanje.

4. DISKUSIJA REZULTATA

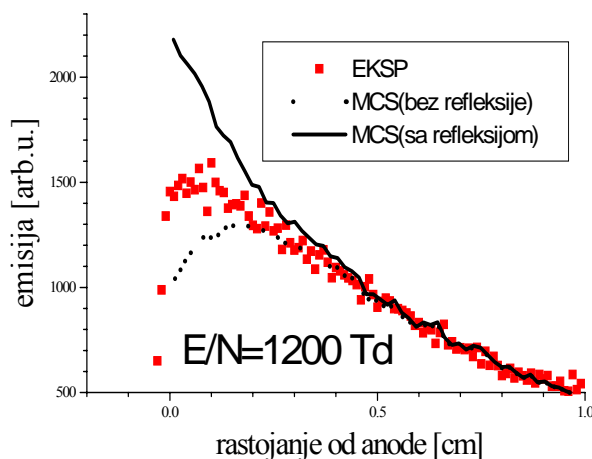
Na Sl. 1. prikazani su rezultati Monte Carlo simulacije (MCS) za srednje i visoke vrednosti E/N gde je pokazano da se uticaj reflektovanih elektrona ogleda u povećanom intenzitetu emisije uz katodu (debele linije) u odnosu na

rezultate MCS dobijene bez uključivanja reflektovanih elektrona (tanke linije), kao i da se oblast uticaja širi sa porastom E/N . Međuelektrodno rastojanje je 1.72 cm u svim slučajevima. Efekat refleksije se mora uzeti u obzir u modelovanju proboja na vrednostima redukovano električnog polja E/N iznad 1 kTd.



Sl. 1. Prostorna zavisnost emisije linije 585 nm dobijena Monte Carlo simulacijom za $E/N = 1.2$ kTd ($E=189$ V/cm, $p=440$ mTorr), $E/N = 4.2$ kTd ($E=418$ V/cm, $p=317$ mTorr) i $E/N = 15$ kTd ($E=754$ V/cm, $p=138$ mTorr).

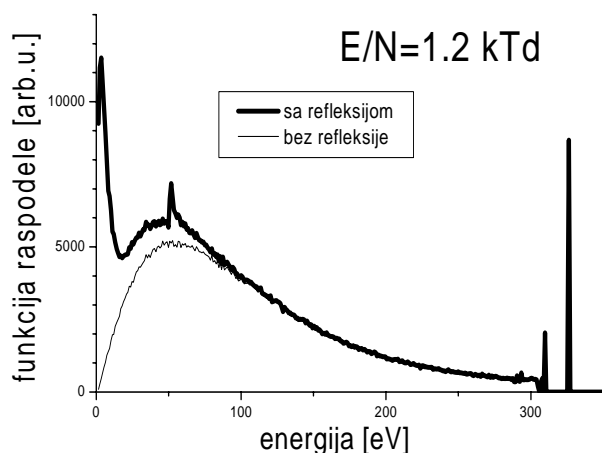
Na Sl. 2. prostorni emisioni profil dobijen pomoću MCS normiran je na rastojanju od anode od 1 cm i upoređen sa eksperimentalnim. Dopinos reflektovanih elektrona vidljiv je već na oko 1 kTd, mada je njegov uticaj relativno mali u većem delu međuelektrodnog rastojanja usled korišćenja grafitne elektrode.



Sl. 2. Poređenje prostorne zavisnosti emisije dobijene MCS sa eksperimentalnim prostornim profilom (EKSP) za liniju 585 nm za uslove sa Sl. 1.

Uticaj refleksije se najbolje vidi sa funkcije raspodele elektrona po energijama koja je prikazana na Sl. 3. Reflektovani elektroni doprinose najviše ekscitaciji tripletnih stanja koja imaju maksimum na srednje visokim energijama i

tako veoma utiču na ekscitaciju, jer na niskim pritiscima srednja energija elektrona može da bude znatno viša od maksimuma ekscitacije pa čak i jonizacije.



Sl. 3. Zavisnost funkcije raspodele elektrona po energijama za $E/N = 1.2 \text{ kTd}$.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena su naša merenja prostornih zavisnosti ekscitacionih koeficijenata za neon kao i poređenje sa rezultatima dobijenim Monte Carlo simulacijama koje uključuju refleksiju elektrona na anodnoj površini.

Snimanje prostornih raspodela emisije zračenja nam omogućava dobijanje veoma velikog broja informacija kao što su ekscitacija teškim česticama, oblast neravnoteže u pražnjenju, refleksija elektrona sa anodne površine. Ove informacije mogu biti korišćene direktno u plazma modelovanju. Poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima možemo zaključiti da se eksperiment može opisati modelom koji uključuje refleksiju uz podešavanje koeficijenta refleksije. Još bolje poznavanje uslova bi se dobilo merenjem funkcije raspodele elektrona po energijama.

Ovim modelom dobili smo dodatne elemente kompletnog modela interakcije elektrona jona i neutrala u gasnoj fazi i na površinama. Ovaj model je posebno potreban za opis plazma ekrana i drugih primena koje smo već naveli. Kao posebnu primenu treba navesti i izvore snopova neutrala koji koriste pražnjenja na jako niskim pritiscima kako bi se stvorili brzi

joni i neutrali. Plazma nagrizanje snopovima neutrala visokih energija je neophodan korak u postizanju nanodimenzije elemenata integrisanih kola kako bi se izbegla oštećenja usled visokog napona koji nastaje naelektrisanjem površina dielektrika prilikom nagrizanja.

LITERATURA

- [1] B. M. Jelenković, A. V. Phelps, *Phys. Rev. A* **36** (1987) p. 5310
- [2] Stojanović V.D., Petrović Z.Lj., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31** (1998) p. 834
- [3] Phelps A.V., Petrović Z.Lj., *Plasma Sourc.Sci.Technol.* **8**, R1 (1999)
- [4] A. I. Strinić, Ž. D. Nikitović, G. N. Malović, V. D. Stojanović and Z. Lj. Petrović, Proc. XVII ESCAMPIG Constanta, Romania (Ed.s V. Cuipina, G. Musa and R. Vladoiu) (2004) 90-91
- [5] J. Holzl and K. Jakobi, *Surf.Sci.* **14** (1969) p.351
- [6] E.H. Darlington and V.E. Cosslet, *J. Phys. D* **5** (1972) p. 1969
- [7] G.Gergely, B. Gruzza and M. Menyhard, *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **48** (1980) p.337
- [8] M.E. Woods, B.J. Hopkons and G.M. Mc Cracken, *Surf. Sci.* **162** (1985) p. 928
- [9] M. Hayashi – personal communication.
- [10] V. Puech and S. Mizzi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24** (1991) p. 1974

Abstract – Contribution of the electron reflection at the anode to the spatial distribution of the emission is presented in Townsend discharge in neon for planparallel electrodes. Effect of the graphite anode is analysed for conditions of moderate to high values of reduced electric field. Spatial distribution of the 585 nm line emission ($2p_1-1s_2$ transition), obtained by Monte Carlo simulation better agrees with experimental one.

EFFECT OF THE ELECTRON REFLECTION AT THE ANODE TO THE SPATIAL DISTRIBUTION OF EMISSION IN THE NEON TOWNSEND DISCHARGE

Željka Nikitović, Aleksandra Strinić, Vladimir Stojanović, Gordana Malović and Zoran Petrović