

MARIJA B. SAVIĆ
MARIJA
RADMILOVIĆ-RAĐENOVIĆ

Institut za fiziku, Beograd, Srbija

NAUČNI RAD

UDK 537.565:621.3.032.21

DOI: 10.2298/HEMIND091221022S

MODELOVANJE PROBOJA U GASOVIMA NA NISKIM PRITISCIMA MONTE KARLO TEHNIKOM*

Osnovna pretpostavka Townsend-ove teorije da joni prouzrokuju emisiju sekundarnih elektrona sa katode važi u veoma uskom opsegu vrednosti redukovano električnog polja E/N . U skladu sa revidiranom Townsend-ovom teorijom koju su koncipirali Phelps i Petrović, sekundarni elektroni nastaju usled udara jona, brzih neutrala, metastabila i fotona o katodu, ili jonizacijom atoma gasa brzim neutralima. U ovom radu smo pokušali da izgradimo model koji će omogućiti određivanje vrednosti za prinos sekundarnih elektrona za različite tipove čestica, korišćenjem Monte Karlo tehnike. Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa analitičkim rezultatima Phelps i Petrovića (Plasma Sources Sci. Technol. 8 (1999) R1).

Pod terminom gasno pražnjenje podrazumevamo proticanje struje kroz gas. Gas, sam po sebi, predstavlja neprovodnu sredinu. Međutim, ukoliko u gasu postoje naelektrisane čestice, pod uticajem dovoljno jakog električnog polja, može doći do slabe provodnosti, ili čak do proboja u gasu. Gas se tada ponaša kao provodnik, koji omogućava proticanje električne struje uz malu otpornost.

Uticaj lavina sekundarnih elektrona u procesima električnog proboja u gasovima, kod niskostrujnih stacionarnih pražnjenja, dobro je izučen u velikom broju radova i udžbenika [1–3]. Uslov za sam čin proboja podrazumeva da sekundarna lavina elektrona postane jednaka primarnoj. Preciznije rečeno, proboj nastaje kada se ukupna proizvodnja elektrona u kružnom toku primarne lavine, povratne sprege i sekundarne lavine izjednači sa gubicima elektrona na anodi. Mi ćemo pod pojmom sekundarne lavine podrazumevati sve elektrone koji nastaju nakon primarne. Elektronska emisija sa površine katode indukovana pozitivnim jonima, brzim atomima, fotonima i metastabilnim atomima, sudarna jonizacija brzim jonima i atomima proizvedenim u ranijim lavinama, sudarna jonizacija elektronima koji su reflektovani sa anode i fotojonizacija gasa fotonima nastalim u ranijim lavinama predstavljaju osnovne procese nastajanja sekundarnih elektrona [4].

Osnovu modela koji su razvili Phelps i Petrović [4] čini uključivanje dodatnih mogućih izvora sekundarne emisije elektrona, kao i emisije nastale usled dejstva fotona, metastabila na katodu. Sekundarna emisija elektrona može nastati i usled jonizacije izazvane dejstvom neutrala u gasnoj fazi i dejstvom elektrona reflektovanih sa anode. Pored toga, razmatran je i efekat povratne difuzije elektrona na katodu. Samim tim, ovaj jedinstveni model, osim što predstavlja reviziju Townsend-ove teo-

rije, pruža detaljan opis procesa koji dovode do sekundarne emisije elektrona.

Jedna od egzaktnih tehnika koja se može koristiti za proučavanje sekundarne emisije elektrona sa elektroda je, svakako, Monte Karlo tehnika [5]. Za dobijanje rezultata, predstavljenih u ovom radu, korišćen je kompjuterski kod baziran na Monte Karlo metodu, razvijen u Institutu za fiziku [6]. Simulacije su izvršene, najpre za pražnjenje u argonu, koristeći dobro definisan set efektivnih preseka detaljnije opisanih u radu [5].

MODEL PHELPS–PETROVIĆ

Predstavljeni model je analitički aproksimativni model pomoću koga se mogu izvršiti proračuni stacionarnih flukseva različitih vrsta čestica: elektrona, Ar^+ , brzih Ar atoma, metastabila i rezonantnih fotona u prostorno uniformnom električnom polju.

Analizom do sada objavljenih rezultata, Phelps i Petrović su pokazali da prinos sekundarnih elektrona značajno zavisi od stanja površine katode. U tom smislu, razlikujemo površine koje su na neki način tretirane (recimo za materijale sa visokom tačkom ključanja zagrejane na 2000 K u vakuumu, dok se eksperimenti vrše na sobnoj temperaturi) i njih nazivamo čistim površinama. Osim njih, postoje i netretirane ili neočišćene površine, kod kojih je izvršen neki postupak čišćenja, ali ne zagrevanjem do visokih temperatura kao kod čistih površina.

Ovaj model nam omogućava da odredimo vrednosti prinosa sekundarnih elektrona sa katode indukovane jonima, brzim atomima, metastabilima ili fotonima, u zavisnosti od uslova na metalnoj površini, kao i od vrednosti redukovano električnog polja. Parcijalni doprinos pojedinih čestica (fotona, jona, metastabila i atoma) sekundarnoj emisiji elektrona [4], prikazan je na slikama 1 i 2.

U ovom radu smo koristili izraze koje su predložili Phelps i Petrović [4], za koeficijente sekundarne emisije elektrona sa katode pri udaru atoma, jona i fotona o površinu katode za čiste (*eng. clean*), odnosno neočišćene (*eng. dirty*) površine, jednačine (1)–(6):

*Rad saopšten na skupu „Osma konferencija mladih istraživača“, Beograd, 21–23. decembar 2009.

Autor za prepisku: M.B. Savić, Institut za fiziku, Pregrevica 118, 11080 Beograd, Srbija.

E-pošta: smarija@ipb.ac.rs

Rad primljen: 21. decembar 2009.

Rad prihvaćen: 29. decembar 2009.

$$\gamma_a^c = 1 \times 10^{-5} (\epsilon_a - 500)^{1.2} / [1 + (\epsilon_a / 70000)^{0.7}] \quad (1)$$

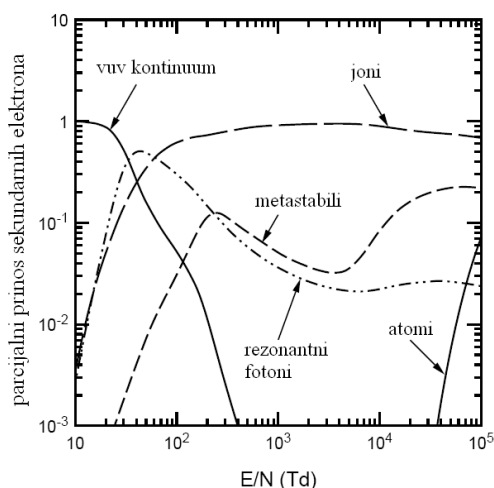
$$\gamma_a^d = 1 \times 10^{-4} (\epsilon_a - 90)^{1.2} / [1 + (\epsilon_a / 8000)^{1.5}] + 7.0 \times 10^{-5} (\epsilon_a - 32)^{1.2} / [1 + (\epsilon_a / 2800)^{1.5}] \quad (2)$$

$$\gamma_i^c = 0.07 + 1 \times 10^{-5} (\epsilon_i - 500)^{1.2} / [1 + (\epsilon_i / 70000)^{0.7}] \quad (3)$$

$$\gamma_i^d = 0.006 \epsilon_i / [1 + (\epsilon_i / 10)^{1.5}] + 1.05 \times 10^{-4} (\epsilon_i - 80)^{1.2} / [1 + (\epsilon_i / 8000)^{1.5}] \quad (4)$$

$$\gamma_{ph}^c = \frac{0.0015(360/\lambda - 1)^4}{[1 + (110/\lambda)^{5.5}]} \quad (5)$$

$$\gamma_{ph}^d = \frac{0.13}{[1 + (\lambda/110)^{13}][35/\lambda)^{3.3} + 1]} \quad (6)$$



Slika 1. Parcijalni prinos različitih procesa produkciji sekundarnih elektrona na katodi za pražnjenje u Ar za čiste površine, prema modelu Phelps–Petrović [4].

Figure 1. Fractional contributions of various processes to electron production at the cathode for Ar at breakdown for clean surfaces, Phelps–Petrović model [4].

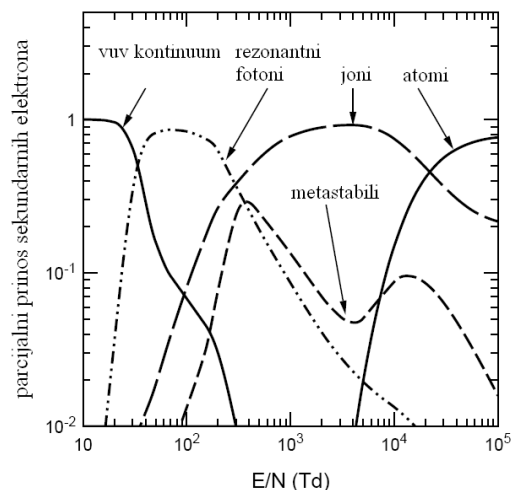
Monte Karlo tehnika

Naše proračune smo izvršili koristeći Monte Karlo kod [6], sa preseccima za sudare elektrona [5], atoma [7], jona [8] i metastabilnih atoma [9] sa pozadinskim gasom. Na slici 3 prikazani su presecci za sudare elektrona i pozadinskog gasa.

DISKUSIJA REZULTATA

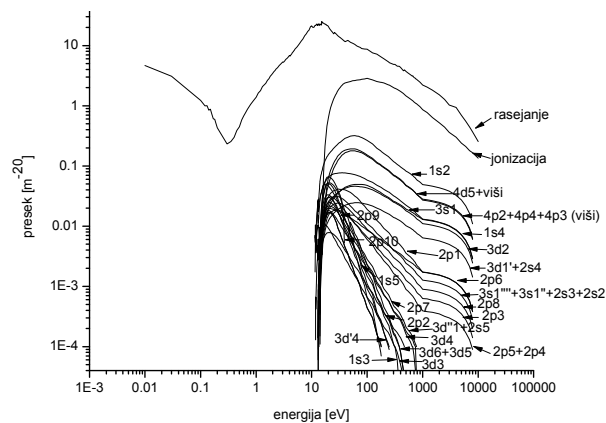
Prvi model prati jone u Monte Karlo kodu, iz koga se izračunava njihov prinos sekundarnih elektrona. Fotoni su, kao što je ranije pomenuto, praćeni u posebnom kodu. Što se tiče metastabila, u ovom modelu je uzet najjednostavniji slučaj. Ukupan broj nastalih metastabila, uključujući i deeksitaciju sa viših stanja na metasta-

bilno, podeljen je tako da je verovatnoća da dođu na katodu 50%, kao u slučaju dve beskonačne planparalelne elektrode gde polovina čestica dospe na jednu, a polovina na drugu elektrodu. Grafici koji ovo ilustruju dati su na slikama 4 i 5 za očišćene i neočišćene površine, redom.



Slika 2. Parcijalni prinos različitih procesa produkciji sekundarnih elektrona na katodi kod probuja u Ar za neočišćene površine, prema modelu Phelps–Petrović [4].

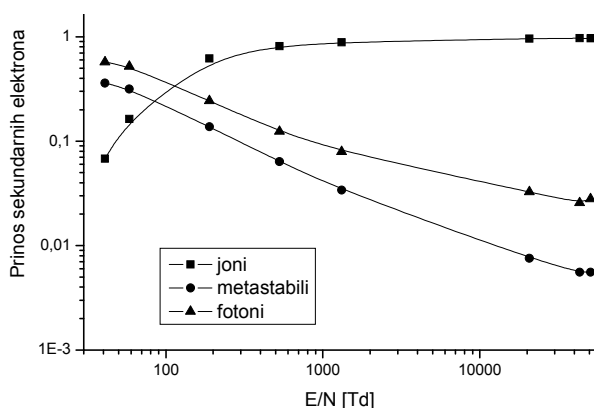
Figure 2. Fractional contributions of various processes to electron production at the cathode for Ar at breakdown for dirty surfaces, Phelps–Petrović model [4].



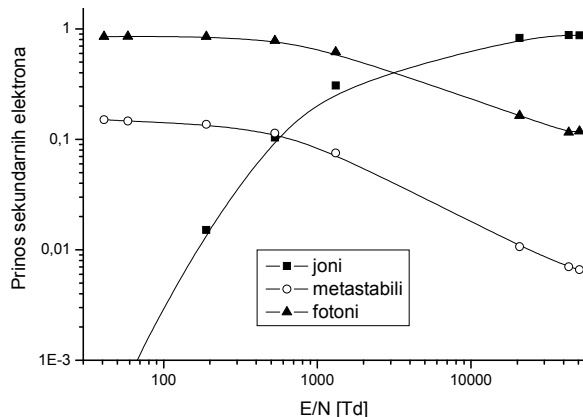
Slika 3. Grafički prikaz presecca za sudare elektrona i čestica pozadinskog gasa [5].

Figure 3. Cross sections for electron-atom collision [5].

Drugi model prati jone i neutrane u Monte Karlo kodu i direktno izračunava njihov prinos sekundarnih elektrona. Fotoni su odrađeni na isti način kao i u prethodnom slučaju. Metastabili su ovog puta takođe uključeni u Monte Karlo kod koji ih prati kao i druge čestice. Produkcija metastabila je jedino iz direktnog pobuđivanja na jedno od dva metastabilna stanja.



Slika 4. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za čiste površine.
Figure 4. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, clean surfaces.

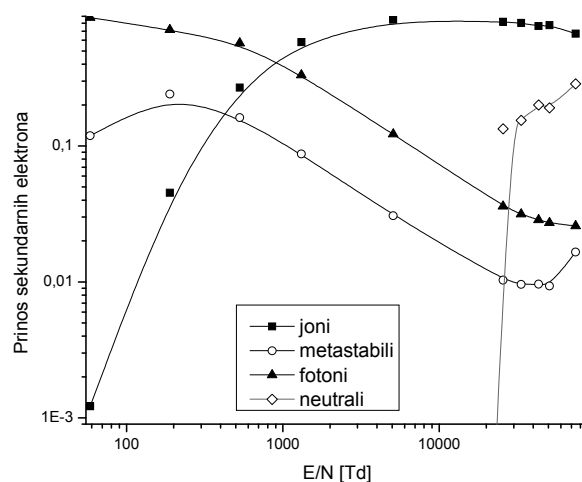


Slika 5. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za neočišćene površine.
Figure 5. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, dirty surfaces.

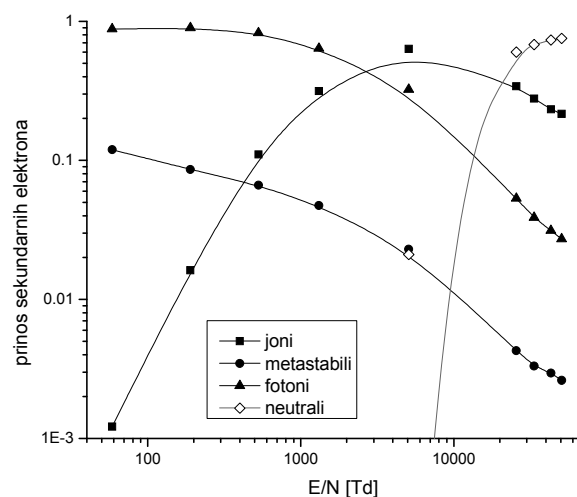
Nestajanje metastabila je usled „kaljenja“ (*quenching-a*) i pri prenosu količine kretanja (*momentum transfer-a*). Iz koda beležimo broj metastabila koji su udarili u katodu. Konačan prinos sekundarnih elektrona od metastabila dobijamo množenjem broja metastabila koji su došli do katode sa koeficijentom $\gamma = 0,02$. Grafici su dati na slikama 6 i 7 za očišćene i neočišćene površine, redom.

U narednom koraku uključili smo i refleksiju jona od katode i anode. Koeficijent refleksije iznosi $R = 0,5$. Rezultati dobijeni na ovaj način prikazani su na slikama 8 i 9 za čiste i neočišćene površine, redom. Uključivanjem refleksije jona od katode i anode očekivano je da se poveća uticaj jona na produkciju sekundarnih elektrona. Upoređivanjem slika 6 i 8 možemo zaključiti da na većim E/N , tj. manjim pritiscima, postoji blagi porast prinosa sekundarnih elektrona od strane jona. Slično razmatranje važi i u slučaju neočišćenih površina, što se ponovo zaključuje posmatranjem slika 7 i 9. Što se tiče metastabila, možemo primetiti da je prinos sekundarnih

elektrona od ovog tipa čestica nešto manji nego u slučaju kada nema refleksije. Ovo možemo objasniti na sledeći način: refleksija dovodi do povećanja broja sudara i samim tim povećanja broja jona. Samim tim imamo više elektron-jon sudara, tj. joni „troše“ elektrone. Kako znamo da metastabili nastaju direktnim pobuđivanjem elektrona na metastabilno stanje u sudarima elektron-atom pozadinskog gasa, to i prethodno razmatranje povlači manji broj metastabila.



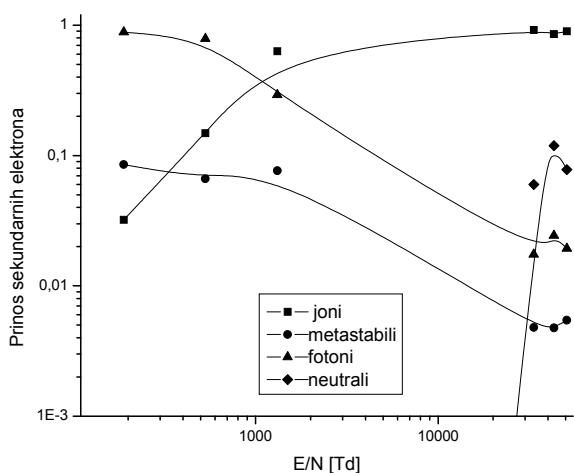
Slika 6. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za čiste površine.
Figure 6. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, clean surfaces.



Slika 7. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za neočišćene površine.
Figure 7. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, dirty surfaces.

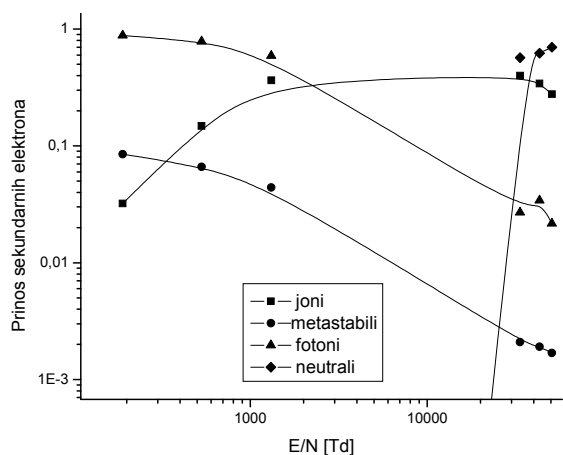
Ukoliko uporedimo prikazane rezultate sa graficima koje su dali Phelps i Petrović [4] možemo doći do određenih zaključaka. Prvi model je (gde je preraspodela metastabila na katodama 50%), kao što se očekivalo, dao rezultate koji dosta odstupaju od analitički

predviđenog rešenja u pomenutom radu. Međutim, može se ipak uočiti očekivani oblik krivih prinosa sekundarnih elektrona.



Slika 8. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za čiste površine.

Figure 8. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, clean surfaces.



Slika 9. Prinos sekundarnih elektrona u funkciji E/N za različite tipove čestica, za neočišćene površine.

Figure 9. Secondary electron yield as a function of E/N for different types of particles, dirty surfaces.

Drugi model (metastabili su uključeni u Monte Karlo kod) značajno je bolji. Samim uključivanjem metastabila u Monte Karlo kod očekivali smo bolje slaganje, što se i pokazalo opravdanim. Konkretno, kriva koja predstavlja prinos sekundarnih elektrona od metastabila pokazuje dobro poklapanje u regionu srednjih E/N . Na manjim E/N , tj. većim pritiscima, model još uvek nije dobar, mada za očišćene površine postoji određen pad koji se i očekuje.

Kao dodatak, prikazan je i slučaj kada je uključena refleksija jona od elektroda. Dobijeni su rezultati koji su i očekivani u slučaju povećanja broja jona u pražnjenju.

Na osnovu prikazanih rezultata možemo uočiti, u skladu sa očekivanjima, da na malim vrednostima E/N

fotoni dominiraju u proizvodnji sekundarnih elektrona, dok je, na visokim vrednostima E/N , najveći doprinos neutrala. Za srednje vrednosti redukovano električnog polja, ne sme se zanemariti doprinos jona i metastabila u generisanju sekundarnih elektrona.

Uspeli smo da dobijemo zadovoljavajuće slaganje sa analitičkim rezultatima iz rada Phelps i Petrović [4]. Bez obzira na prikazane rezultate, postoji još dosta prostora za usavršavanje modela. Ono na čemu treba raditi je pre svega model metastabila. U sadašnji model uključena je samo produkcija metastabila direktnim pobuđivanjem na metastabilno stanje i u sudarima brzi neutral-pozadinski gas. Neophodno je uključiti u Monte Karlo kod još i kaskade, tj. relaksiranje pobuđenih stanja argona na metastabilna stanja kao još jedan proces produkcije metastabila.

Na čemu još treba raditi jeste i model fotona. Ideja je da se i fotoni uključe u Monte Karlo kod kao zaseban tip čestica i da se kao takvi prate tokom pražnjenja.

ZAKLJUČAK

U ovom radu učinjeni su početni koraci ka dobijanju modela koji će omogućiti izračunavanje parcijalnih prinosa sekundarnih elektrona za pojedinačne tipove čestica, korišćenjem Monte Karlo koda, koji je razvijen u Laboratoriji za gasnu elektroniku Instituta za fiziku u Zemunu. Ovaj model je dovoljan za više vrednosti E/N dok se za niže vrednosti mora još razviti model transporta fotona i formiranja molekularne emisije, a generalno se model tretiranja metastabila mora donekle poboljšati.

Zahvalnica

Ovaj rad je omogućen sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, broj projekta: 141025. Autori duguju veliku zahvalnost Prof. dr Zoranu Lj. Petroviću na koncipiranju ideje i korisnim sugestijama tokom izrade ovog rada.

LITERATURA

- [1] Y.P. Raizer, Gas Discharges Physics, Springer, Berlin, 1991.
- [2] T. Makabe, Z.Lj. Petrović, Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication, Taylor & Francis, New York, 2006.
- [3] M.A. Liberman, A.J. Lichtenberg, Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 1994.
- [4] A.V. Phelps, Z.Lj. Petrović, Plasma Sourc. Sci. Technol. **8** (1999) R21–R44.
- [5] Z.Lj. Petrović, V.D. Stojanović, J. Vac. Sci. Technol. A **16** (1998) 329–336.
- [6] Z.Lj. Petrović, Z. Ristivojević (to be submitted).
- [7] A.V. Phelps, Phys. Chem. Ref. Data **20** (1991) 557.
- [8] A.V. Phelps, J. Appl. Phys. **76** (1994) 747–753.
- [9] B.M. Smirnov, Physics Of Weakly Ionized Gases, Mir Publishers, Moscow, 1981.

SUMMARY**GAS DISCHARGES MODELING BY MONTE CARLO TECHNIQUE**

Marija Savić, Marija Radmilović-Rađenović

Institute of Physics Belgrade, Pregrevica 118, 11080 Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

The basic assumption of the Townsend theory – that ions produce secondary electrons – is valid only in a very narrow range of the reduced electric field E/N . In accordance with the revised Townsend theory that was suggested by Phelps and Petrović, secondary electrons are produced in collisions of ions, fast neutrals, metastable atoms or photons with the cathode, or in gas phase ionizations by fast neutrals. In this paper we tried to build up a Monte Carlo code that can be used to calculate secondary electron yields for different types of particles. The obtained results are in good agreement with the analytical results of Phelps and Petrović (*Plasma Sources Sci. Technol.* **8** (1999) R1).

Ključne reči: Sekundarna emisija elektrona • Model Phelps–Petrović • Monte Karlo kod

Key words: Secondary electron emission • Phelps–Petrović model • Monte Carlo code