

## ANALIZA ELEKTRIČNIH KARAKTERISTIKA NESTABILNOSTI GASNOG PRAŽNJNIJA

Miodrag Zlatanović, Ivan Popović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

**Sadržaj** – U radu je analizirana primena impulsnog napajanja kod sistema za površinsku obradu materijala kao što su procesi difuzije, depozicije, itd. Prikazana su poboljšanja dobijena ovakvim načinom napajanja u kontroli parametara procesa i karakteristika površine materijala u odnosu na klasični DC sistem napajanja. Posebna pažnja u radu je posvećena analizi nestabilnosti gasnog pražnjenja koja se ogleda u pojavi lučnog i gustog pražnjenja<sup>[1]</sup>. Date su osnovne karakteristike sistema za detekciju pojave električnog luka, i oblici naponskih i strujnih signala u prisustvu nestabilnosti. Takođe je analiziran uticaj odnosa impuls-pauza i učestanosti generisanog napona plazma generatora na stabilnost i efikasnost odvijanja procesa depozicije<sup>[2]</sup>. Pokazano je da se kontrolom odnosa impuls-pauza može izvršiti kontrola nestabilnosti gasnog pražnjenja, kao i da se analizom električnih karakteristika nestabilnosti mogu dobiti podaci o vrsti i sastavu radnog gasa u sistemu.

### 1. UVOD

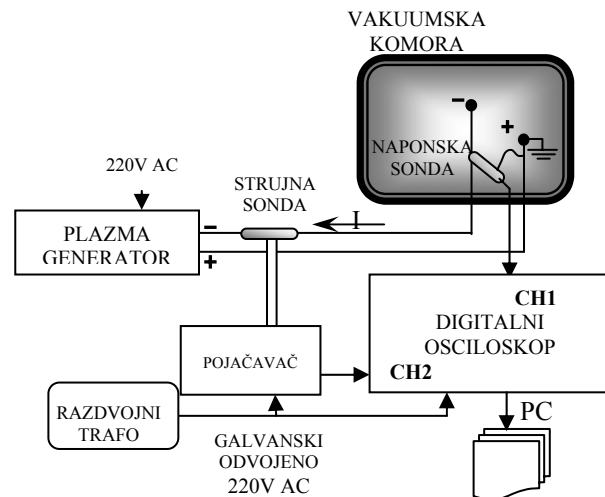
Procesi obrade površine materijala u plazmi kao što su nagrizanje, difuzija, depozicija, nitriranje i drugi procesi, značajno su napredovali primenom impulsnog napajanja. Frekvencija impulsnih plazma generatora se kreće od DC do 500kHz, pri čemu impulsi mogu biti unipolarni ili bipolarni. Prednost primene impulsne plazme se ogleda između ostalog i u postojanju kontrole raspodele temperature uzoraka podešavanjem odnosa signal-pauza generisanog napona, kao i u mogućnosti kontrole pojave električnog luka i gustog tinjavog pražnjenja u procesima nitriranja kompleksnih objekata<sup>[3]</sup>. Osim postojanja dodatnih načina kontrole procesa, primenom impulsne plazme omogućeno je dublje sagledavanje parametara procesa prostom analizom električnih signala<sup>[4]</sup>.

U ovom radu analizirani su neki od parametara naponskih i strujnih signala, merenih prema šemi veza prikazanoj na slici 1, pri pojavi električnog luka u plazmi napajanoj generatorom JONPLUS snage 20kVA, učestanosti 90Hz do 20kHz, sa podešavanjem odnosa signal-pauza od 5 do 96%.

### 2. EKSPERIMENT

Pre početka eksperimenta komora je evakuisana do pritiska od 1Pa i zatim ispunjena radnim gasom, koji je u našim eksperimentima bio vodonik ili azot, odnosno vazduh. Kontrola pritiska u sistemu je vršena preko kontrole protoka radnog gasa i brzine ispušavanja pumpe. Vršena su i merenja temperature katode, ukupne površine od 600cm<sup>2</sup>, pomoću termopara. Nominalna vrednost stuje je u svakom trenutku zavisila od pritiska u sistemu, primenjenog napona napajanja i vrste radnog gasa.

Na slici 1. data je blok šema sistema za merenje vremenskih oblika naponskih i strujnih signala.

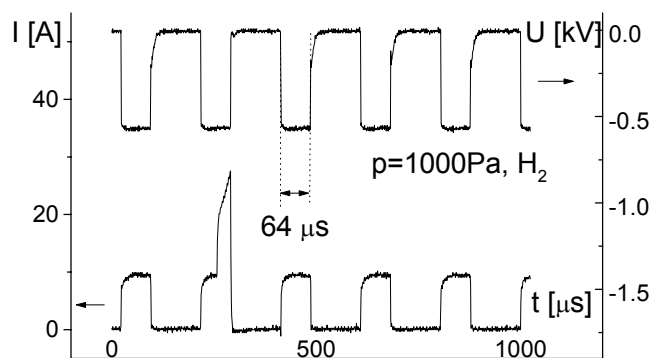


Sl. 1. Šema veza mernog sistema

Na željenom pritisku gasa u sistemu, sa podešenim odnosom impuls-pauza, i podešenom učestanošću plazma generatora vršeno je snimanje naponskih i strujnih signala pomoću jednostavnog akvizicionog sistema (slika 1). Prilikom snimanja karakteristika nestabilnosti gasnog pražnjenja, odnos impuls-pauza postavljen je na nominalnu vrednost od 96% kako bi se povećala učestalost te pojave.

### 3. ANALIZA ELEKTRIČNIH SIGNALA

Vremenska zavisnost naponskih i strujnih signala pri normalnom radu u prisustvu nestabilnosti gasnog pražnjenja data je na slici 2. Snimanja su vršena pri plazma depoziciji na pritisku od 1000 Pa sa radnim gasom vodonikom. Sa slike 2 se vidi da, iako je došlo do nestabilnosti gasnog pražnjenja, nije došlo do pojave luka jer vremenski interval od 64μs (vreme trajanja impulsa) nije bio dovoljan da se nestabilnost razvije u lučno pražnjenje.



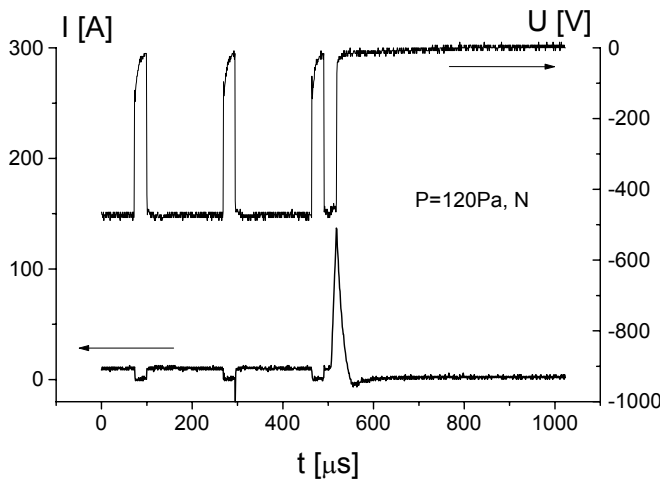
Sl. 2. Vremenska zavisnost napona i struje u prisustvu nestabilnosti

Sistem za detekciju pojave luka nije odreoagovao jer je, zahvaljujući impulsnom napajanju naponskog signala, izbegnut razvoj nestabilnosti u luk. Pri ovome, sistem nije detektovao da je struja pražnjenja premašila nivo praga. Takođe, brzina promene struje od  $1\text{A}/\mu\text{s}$  nije bila dovoljna da se ovaj oblik nestabilnosti okarakterise kao pojava luka. Sistem je po pojavi nestabilnosti nastavio rad u normalnom režimu već u sledećoj periodi naponskog signala.

Na ovaj način je pokazano da se kontrolom širine impulsa plazma generatora može postići potpuno ili delimično smanjenje pojave lučnog pražnjenja u plazmi. Ovo se može postići upravljanjem odnosom impuls-pauza i podešavanjem učestanosti plazma generatora. Međutim, treba imati u vidu da se smanjenjem širine impulsa smanjuje srednja snaga, a samim tim i brzina i efikasnost procesa depozicije.

Kako oblik i veličina strujnih impulsa zavise od pritiska u sistemu i prisustva nečistoća na površini katode, vrednost odnosa impuls-pauza se bira kompromisno između stabilnosti i efikasnosti rada sistema. Pojava luka u procesu depozicije ne samo da može dovesti do trajnog oštećenja površine katode već produžava i vreme obrade materijala u plazmi, jer sistem za detekciju lukova po detekciji luka mora isključiti napajanje u toku unapred zadatog vremenskog intervala.

Karakteristični oblik naponskih i strujnih signala u prisutvu lukova u plazmi, u sistemu gde je kao radni gas korišćen azot na pritisku od 120 Pa, prikazan je na slici 3.

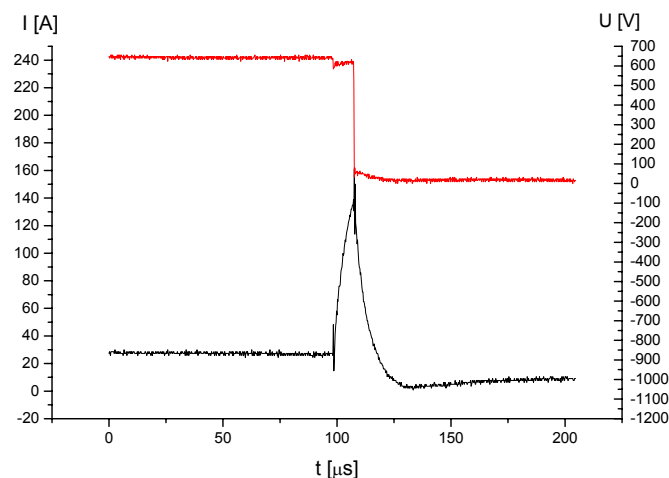


Sl. 3. Oblici naponskih i strujnih signala u prisutvu lukova u plazmi

Može se videti da napon napajanja ima gotovo pravougaoni oblik i da se pri pojavi pražnjenja javlja zanemarljiv pad napona. Apsolutni pritisak u sistemu odgovara maloj struji pražnjenja i velikoj impedansi plazme<sup>[5]</sup>. Vidi se, da je do pojave luka došlo 15 μs posle pojave naponskog impulsa, što je dovelo do vidljivog pada napona. Posle 11 μs senzor pojave lukova je prekinuo napajanje. Predaja energije akumulirane u sistemu i izvoru za napajanje lučnom pražnjenju trajala je ukupno 48 μs. Ova energija može oštetiti površinu katode ukoliko je koncentrisana na malu površinu<sup>[6]</sup>.

Na slici 4 dat je izgled naponskih i strujnih signala u prisutvu luka. Vidi se da je brzina rasta struje od  $20\text{A}/\mu\text{s}$

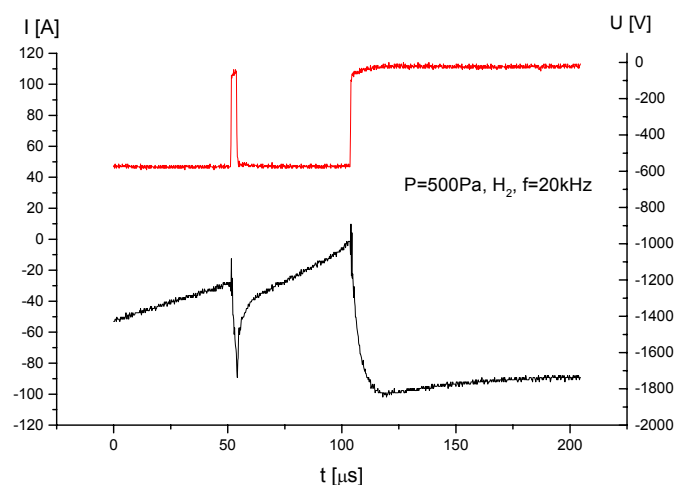
dovoljna da odreoaguje senzor za detekciju luka. Vreme reakcije sistema je, iako malo po svojoj vrednosti, ipak veoma značajno jer usled velike brzine rasta, struja već posle 8 μs dostiže vrednost od 150 A.



Sl. 4. Prikaz razvoja nestabilnosti gasnog pražnjenja u lučno pražnjenje

U nekim slučajevima pojave luka, vrednost struje u piku može premašiti i 250A. Zbog toga je značajno da vreme od pojave do detekcije luka i gašenja napajanja bude što kraće, kako bi vrednost struje u piku bila što manja. Stoga je postavljanje konkretnih vrednosti strujnog praga i praga brzine rasta struje kompromisna vrednost koja obezbeđuje da se svaka nestabilnost gasnog pražnjenja ne karakterise kao luk, a takođe omogućuje da vrednosti struje luka budu manje od kritične vrednosti za pojavu trajnih oštećenja. Vidi se da su dinamičke karakteristike kola za detekciju luka podjednako važne za uspešnu detekciju lučnog pražnjenja kao i statičke.

Pored nestabilnosti gasnog pražnjenja u vidu lučnog pražnjenja, javlja se i gusto pražnjenje. Ono nastaje kao posledica geometrije katode i parametara procesa. Na slici 5 dati su vremenski oblici strujnih i naponskih signala u slučaju gustog pražnjenja.



Sl. 5. Oblici naponskih i strujnih signala za slučaj gustog pražnjenja

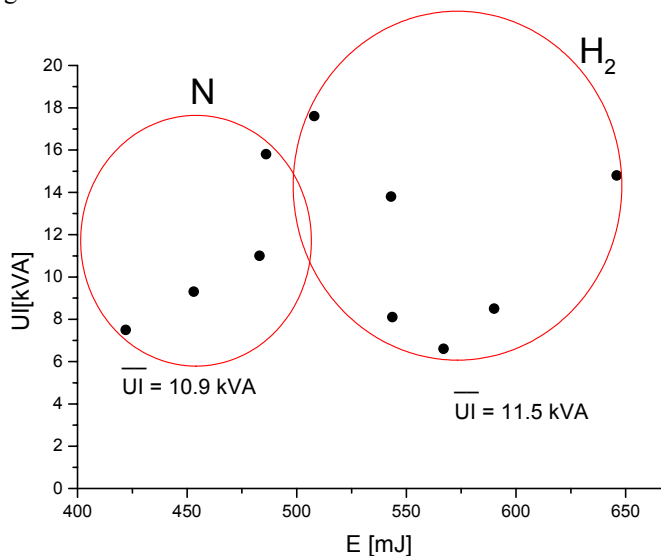
Gusto pražnjenje se manifestuje kroz značajno manju brzinu rasta struje od  $1 \text{ A}/\mu\text{s}$  u odnosu na lučno pražnjenje. Kako je pojava pražnjenja u šupljini katode lokalizovana i izolovana, pri prekidu napajanja proces pražnjenja se nastavlja i posle prekida napajanja. Po ponovnom uspostavljanju napajanja vrednost struje je slična kao i u trenutku prestanka napajanja. Na taj način gusto pražnjenje postepeno dostiže vrednost strujnog praga i kolo za detekciju lukova registruje pojavu nestabilnosti i gasi napajanje. Ukoliko ne bi postojala ovakva zaštita, došlo bi do postepenog povećanja struje do maksimalne vrednosti određene snagom plazma generatora. To bi dovelo do pregrevanja uzorka i njegovog trajnog oštećenja.

#### 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Da bi se dobili rezultati koji omogućavaju karakterizaciju pojave lukova i određivanje nekih od parametara procesa, vršena su snimanja strujnih i naponskih signala za različite gasove pri istim parametrima procesa.

Za radne gasove azot i vodonik snimljeni su električni signali u prisustvu električnog luka na istom radnom pritisku i temperaturi u komori. Na osnovu električnih signala izvršen je proračun trenutne snage pre pojave luka, kao i ukupne energije koju sistem predaje lučnom pražnjenju. Vrednost ukupne energije sistema predate lučnom pražnjenju je jedan od najbitnijih parametara analize, jer predstavlja veličinu energije koja je skoncentrisana na maloj površini katode (uzorka) i koja dovodi do oštećenja katode.

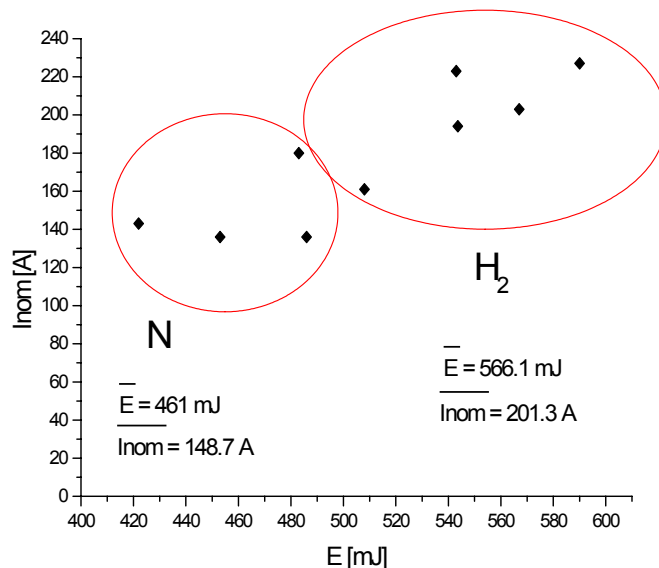
Na slici 6 data je zavisnost trenutne snage pre pojave luka od energije sistema predate lučnom pražnjenju za radne gasove azot i vodonik.



Sl. 6. Zavisnost trenutne snage pre pojave luka od energije luka za radne gasove azot i vodonik

Sa slike 6 se vidi da, za različite gasove, pri istim trenutnim snagama pre pojave luka imamo različite vrednosti energije predate lučnom pražnjenju. Dakle za iste trenutne uslove pre pojave nestabilnosti imamo različit intenzitet nestabilnosti za različite gasove, odnosno, lučno pražnjenje u gasu je inenzivnije u slučaju kada se u sistemu koristi radni gas vodonik.

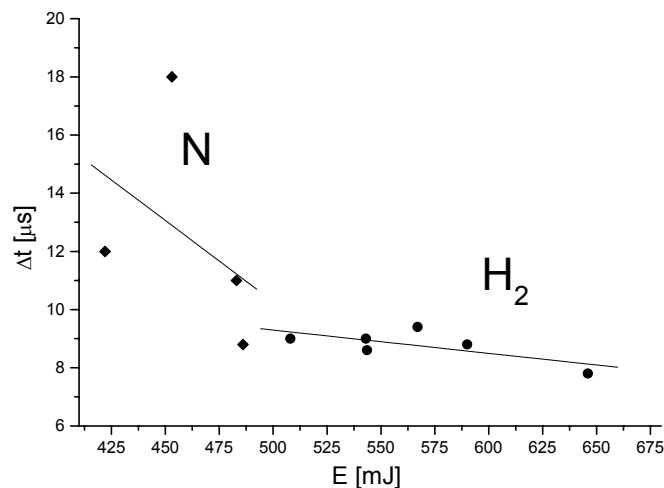
Na slici 7 data je zavisnost nominalne struje pri pojavi luka od energije sistema predate lučnom pražnjenju.



Sl. 7. Zavisnost nominalne struje pri pojavi luka od energije luka za gasove azot i vodonik

Sa slike 7 se vidi da su vrednosti nominalne struje luka za gas vodonik veće kod vodonika, pri istim uslovima u sistemu pre pojave luka, što potvrđuje ranije pomenutu pretpostavku.

Da bi se dobila kompletnija analiza uticaja vrste gasa na oblik električnih signala pri lučnom pražnjenju, analiziran je i oblik električnih signala i parametri kao što su vreme trajanje luka, brzina rasta struje, itd. Rezultat analize prikazan je na slici 8.



Sl. 8. Zavisnost trajanja lučnog pražnjenja od akumulirane energije sistema predate lučnom pražnjenju za gasove azot i vodonik.

Na osnovu analize oblika električnih signala vidi se da vreme trajanja luka ne zavisi od energije luka, kao ni od vrste gasa, već je oblik signala sličan u slučaju proboja u gasovima azotu i vodoniku. Postoji tendencija kod oba gasa koja pokazuje da manje trajanje lučnog pražnjenja ne znači i manji intenzitet pražnjenja ali se generalni zaključak ne može doneti, obzirom na to da na oblike signala utiču i dinamičke karakteristike sistema za detekciju luka.

## 5. ZAKLJUČAK

Sastav i vrsta radnog gasa utiču na vrednost akumulisane energije sistema predate lučnom pražnjenju, dok trenutna snaga sistema pre pojave luka ne utiče na njenu vrednost. Takođe je uočeno da je nominalna vrednost struje luka znatno veća kod vodonika, dok su vremena trajanja luka približno ista za oba gasa.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je delimično rezultat projekta Ministarstva za nauku i tehnologije Republike Srbije MIS.3.02.0174.B. Autori zahvaljuju dipl. ing. Bukorović Branislavu za akviziciju podataka koji se odnose na snimanje naponskih i strujnih karakteristika.

## LITERATURA

- [1] I. Popović, Ž. Đurišić, "Karakteristike nestabilnosti gasnog pražnjenja pri impulsnom napajanju", *PSMN'02*, III/1, (2002)
- [2] Ž. Đurišić, I. Popović, A. Kunosić, "Odnos impuls-pauza kao parametar procesiranja površine čeličnih uzoraka u impulsnoj plazmi", *PSMN'02*, III/2, (2002)
- [3] M. Zlatanović, I. Popović, A. Zlatanović, "Glow discharge response to D.C. pulse biasing", *Proc. SPIG'02* (2002), pp 354-357
- [4] M. Zlatanović, *Proc. 7th Yugoslav Tribology Conf. YUTRIB'01*, p 7-39-7-44 (2001)
- [5] J. Sellers, "The ennobling technology for reactive PVD", *TECHNOTES, ENI*, (2001)
- [6] JT. A. Beer, J. Laimer and H. Stori, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 116-119, p 1016-1023 (1999)

**Abstract** - In this paper hydrogen and nitrogen glow discharge response to the applied pulse voltages of different frequencies and duty cycles was investigated in order to analyze instabilities after the discharge ignition, the glow-to-arc transition and properties of arc suppression system. Results have shown that pulse biasing gives the opportunity to control and avoid damage of cathode surface due to the arcing processes by simple control of pulse biasing parameters such as duty cycle and frequency.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS OF GAS DISCHARGE INSTABILITIES

Miodrag Zlatanović, Ivan Popović