

## OGREVANJE VZORCEV V NIZKOTLAČNI VODIKOVI PLAZMI

M. Mozetič, M. Drobnič\*, A. Zalar, B. Praček, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, 61111 Ljubljana, \* Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

### Heat treatment of samples in low pressure hydrogen plasma

#### ABSTRACT

A method of heat treatment in inductively coupled low pressure weakly ionized RF hydrogen plasma is described. The method is characterized by fast heating and cooling of a sample, and highly reductive atmosphere at room and elevated temperature.

#### POVZETEK

Opisujemo metodo za ogrevanje vzorcev v induktivno vzbujani nizkotlačni šibkoionizirani RF vodikovi plazmi. Metodo odlikuje hitro ogrevanje in ohlajanje vzorca ter redukativnost atmosfere že pri sobni in povišani temperaturi.

#### 1 Uvod

Pri povišani temperaturi lahko sprožimo ali pospešimo različne fizikalne in kemijske procese v snovi ali na njeni površini. Za doseganje visokih temperatur uporabljamo različne metode gretja. Najbolj običajno je ogrevanje v pečeh, kjer se s konvekcijo plina in s sevanjem prenaša toplota od grelcev na vzorec. Za doseg določenih učinkov uporabljamo različne mešanice plinov. Vzorce npr. uspešno reduciramo v mešanicah plinov, ki vsebujejo vodik ( $N_2 + H_2$ ,  $Ar + H_2$ ,  $H_2 + H_2O$  itd). Najvišja temperatura, ki jo lahko dosežemo v pečeh, in hitrost ogrevanja vzorca, sta odvisni od karakteristik peči. Navadno je hitrost ogrevanja omejena na nekaj  $10^\circ C$  v minuti (manj kot  $1^\circ C/s$ ). Najvišja temperatura vzorca je pogosto  $1200^\circ C$ , pri posebnih pečeh pa  $1700^\circ C$ . Če želimo pospešiti hitrost naraščanja temperature vzorca ali pa ga ogreti do  $3000^\circ C$  ali več, si moramo pomagati z drugimi metodami ogrevanja, na primer s curkom hitrih elektronov ali curkom fotonov. Pri tem smo že zašli na področje vakuumске tehnike, saj je povprečna prosta pot elektronov pri atmosferskem tlaku manj kot 1 m, in si torej s še tako hitrimi elektroni ne moremo dosti pomagati. Z laserskim žarkom lahko ogrevamo vzorce tudi pri atmosferskem tlaku (lasersko varjenje, /1,2/), vendar pa je metoda primerna le za ogrevanje majhne površine vzorca.

Včasih želimo doseči nekatere kemijske reakcije na površini vzorca pri razmeroma nizki temperaturi. Lep primer je nizkotemperaturna redukcija tankih plasti kovinskih oksidov /3/. V tem primeru si z ogrevanjem v termodinamsko stabilnih sistemih ne moremo kaj dosti pomagati, saj je v takih sistemih hitrost reakcije enolično odvisna od temperature. Izbrati moramo termodinamsko neravnovesni sistem. Najpogostejši način za prehod plina v neravnovesno stanje je nizkotlačna razelektritev. Plin preide v stanje plazme, ki je izredno primeren medij za kontrolirano ogrevanje vzorcev v plinih z željenimi lastnostmi.

#### 2 Nizkotlačna vodikova plazma

Električno nabiti delci, ki so v majhnem številu vedno prisotni v plinu, se v električnem polju pospešujejo. Pri znižanem tlaku, ko je povprečna prosta pot že precejšna, lahko nabiti delci med dvema zaporednima trkoma pridobijo kinetično energijo, ki je precej večja od pov-

prečne kinetične energije zaradi termičnega gibanja. Težki nabiti delci (molekularni in atomarni ioni) ob trkih z nevtralnimi delci izgubljajo energijo, ki so jo pridobili v električnem polju (prožni trk dveh enako težkih kroglic). Nasprotno pa je energijska izmenjava med elektroni in nevtralnimi delci pri prožnem trku zaradi velike razlike mas šibka. Če se elektron pri trku z nevtralnim delcem ni sopal nazaj, se do naslednjega trka dodatno pospeši. Po nekaj takšnih zaporednih trkih lahko pridobi dovolj energije za neprožni trk, ki lahko privede do ionizacije molekule ali atoma. Elektroni se torej v električnem polju pospešujejo in ob trkih z nevtralnimi delci pomnožujejo. V kolikor je jakost polja dovolj velika in so tudi drugi parametri (tlak, velikost komore...) pravilno izbrani, se elektroni ob vklopu polja plazovito pomnožijo. Pozitivni ioni, ki prav tako nastanejo ob ionizaciji, zaradi velike mase le počasi difundirajo proti stenam razelektrivene komore in v plinu ustvarijo oblak pozitivnega naboja, ki s svojim potencialom prepreči difuzijo mnogo hitrejših elektronov na steno, kjer se rekombinirajo. Po vklopu električnega polja torej gostota prostih elektronov v plinu naglo naraste. Plin preide v stanje, ki ga imenujemo plazma.

Neprožni trki elektronov z nevtralnimi delci pa ne privedejo le do ionizacije le-teh, ampak še pogosteje do disociacije molekul, ekscitacije rotacijskih in vibracijskih stanj molekul ter enoelektronske ekscitacije molekul in atomov. Nekatere reakcije, ki potekajo v nizkotlačni vodikovi plazmi pri neprožnih trkih elektronov s težkimi delci, so prikazane v tabeli 1. Vodik se torej v plazmi nahaja v različnih stanjih, najpogostejša pa so:

- $H_2$  .. molekula v osnovnem vibracijskem stanju
- $nH_2$ .. molekula v višjem vibracijskem stanju
- $H_2^*$  .. molekula v enoelektronskem vzbujenem stanju
- $H_2$  .. molekularni vodikov ion
- $H$  .. nevtralni vodikov atom
- $H^+$  .. atomarni vodikov ion (proton)
- $H^*$  .. atom v enoelektronsko vzbujenem stanju

Gostote in temperature posameznih vrst delcev so odvisne od različnih parametrov, kot so jakost polja, totalni tlak, parcialni tlak vodika, oblika in velikost komore, vrsta materiala, iz katerega je komora izdelana, ter stanje površine. V našem laboratoriju običajno generiramo vodikovo plazmo, v kateri je temperatura težkih delcev  $20 - 70^\circ C$ , temperatura elektronov  $20000 - 100000^\circ C$ , gostota nabitih delcev  $10^{14} - 10^{17} m^{-3}$ , gostota nevtralnih atomov  $10^{18} - 10^{22} m^{-3}$ , gostota vseh delcev do  $10^{23} m^{-3}$  /12,13,14,15/, gostote delcev v vzbujenih stanjih pa nismo merili.

Zgornje številke ne povedo veliko, vsekakor pa tudi približno ni razvidno, kako sploh lahko kaj segrejemo v plazmi. Temperatura elektronov je res visoka - več  $10000^\circ C$ , vendar pa je njihova gostota zelo majhna, prav tako pa je izredno majhna tudi toplotna kapaciteta. Če je vzorec na potencialu plazme, je gostota toka elektronov na površino  $j = 1/4 n v = 10^{21} m^{-2} s^{-1}$ . Če se

elektroni dobro akomodirajo na površini, prinašajo našemu vzorcu energijski tok  $10^3 \text{ W m}^{-2} = 10^{-3} \text{ W mm}^{-2}$ . Z elektroni si torej ne moremo dosti pomagati.

Tabela 1. Nekatere reakcije v vodikovi plazmi. Podatki so vzeti iz člankov /4 - 11/.

reakcija	energ. prag [eV]	maks. presek [ $\cdot 10^{-16} \text{ mc}^2$ ]
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e$	15.4	1.1
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + 2e$	18.0	0.005
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}^+ + 3e$	46	0.005
$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + e$	12.4	3-16
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H} + \text{H} + e$	8.5	0.6
$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$	0	100
$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	13.5	0.65
$\text{H} + e \rightarrow \text{H}^*(2P) + e$	10.2	0.7
$\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e$	3.3	15
$\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^* + e$	10.3	0.2

Nekoliko bolj perspektivna je absorpcija svetlobnih kvantov, ki nastajajo v plazmi ob relaksacijah, vendar pa gostote delcev v vzbujenih stanjih nismo merili.

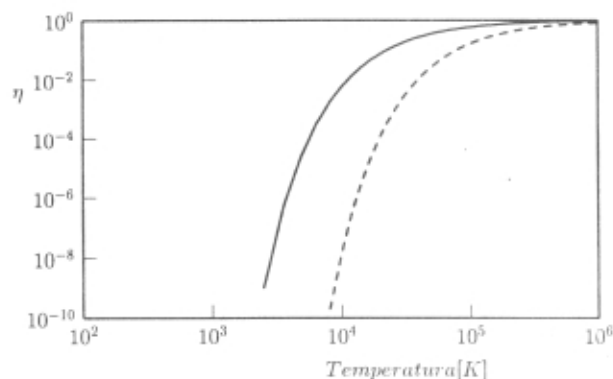
### 3 Ogrevanje z atomarnim vodikom

Temperature težkih delcev v plazmi so blizu sobne, tako da vzorec, ki ga izpostavimo plazmi, na prvi pogled nima dosti možnosti za ogrevanje. Vendar pa prvi pogled temelji na predpostavki, da je plin termodinamsko ravnovesen. To pa tudi približno ni res. Visoka stopnja disociiranosti molekul reda 10% pri sobni temperaturi zagotovo ni ravnovesna. V ravnovesnem sistemu dobimo tolikšno stopnjo disociiranosti molekul šele pri temperaturi plina 20000°C (glej sliko 1)! Skrajni čas je, da namesto °C uporabimo primernejšo enoto eV, pri čemer 1eV ustreza približno 11000°C. Nevtralni atomi vodika res nimajo visoke temperature, zato pa imajo veliko potencialno energijo, ki je kar enaka polovici disociacijske energije molekule vodika ( $W_D = 4.5 \text{ eV}$ ). Če torej potopimo v plazmo z visoko stopnjo disociiranosti vzorec, na katerem poteka intenzivna rekombinacija atomov vodika, se bo ta močno segrel. V tem primeru je energijski tok na vzorec:

$$P = \left(\frac{1}{4}nv\right)\left(\frac{1}{2}W_D\right)\gamma A \quad (1)$$

kjer je n gostota atomov vodika v okolici vzorca, v njihova povprečna velikost hitrosti,  $W_D$  vezavna energija vodikove molekule,  $\gamma$  rekombinacijski koeficient za reakcijo  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$  in  $A$  geometrijska površina vzorca. Enačba velja samo v primeru, ko je nastala molekula v

termodinamskem ravnovesju s površino. Termodinamsko ravnovesje v tem primeru pomeni, da je porazdelitev molekul po ro-vibracijskih stanjih ustrezna temperaturi površine. Dejansko so meritve pokazale, da nastale molekule niso v ravnovesju s površino, ampak lahko zapustijo vzorec v visokih vibracijsko vzbujenih stanjih /15,16,17/. K sreči je takih molekul malo, tako da je napaka, ki smo jo zagrešili v enačbi (1) pri tem, ko nismo upoštevali, da sproščena energija ni enaka vezavni energiji molekule, manjša, kot je nenatančnost merjenja rekombinacijskega koeficienta.

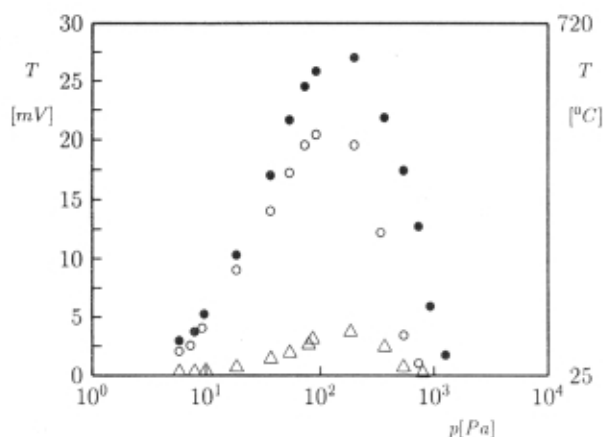


Slika 1. Stopnja disociiranosti (polna črta) in ioniziranosti (črtkana črta) vodikovih molekul v termodinamskem ravnovesju

V enačbi (1) smo privzeli, da se vzorec, ki je izpostavljen vodikovi plazmi, ogreva le z rekombinacijo nevtralnih atomov vodika, ki imajo sobno temperaturo. Če enačba (1) velja, za ogrevanje vzorcev sploh ne potrebujemo plazme, ampak zadošča že izpostava vzorca atomarnemu vodiku. Na sliki 2 prikazujemo rezultate vrste meritev, ki smo jih opravili v vodiku z visoko stopnjo disociiranosti molekul (od 1 do 10 %, odvisno od tlaka /18/). Pri tem kaže še enkrat poudariti, da gre za termodinamsko izredno neravnovesen sistem. Temperatura plina je bila 25- 30°C in smo jo izmerili prav na mestu našega vzorca z neaktivirano sondo /19/.

Popolnoma brez plazme tudi pri teh meritvah le ni šlo. Nizkotlačno šibkoionizirano RF vodikovo plazmo smo v opisanem primeru generirali v sosednji komori in jo izkoristili za to, da smo sploh dobili visoko stopnjo disociiranosti molekul. Plin smo potem skozi ozke steklene cevi vodili v merilno komoro, v kateri se je nahajal naš vzorec. Na površinah cevi se rekombinirajo nabiti delci, absorbirajo UV-žarki in relaksirajo vzbujeni delci iz plazme. V merilni komori tako dejansko dobimo le mešanico molekularnega in atomarnega vodika.

S slike 2 je razvidno, da lahko vzorce pri sobni temperaturi plina segrejemo do nekaj 100°C. Vendar pa je hitrost ogrevanja razmeroma nizka. Odvisna je od toplotne kapacitete vzorca in tlaka plina. V našem primeru je med 1°C/s pri nizkih tlakih in 10°C/s pri višjih tlakih. V splošnem je vendarle ugodneje, da vzorec direktno izpostavimo plazmi.



Slika 2. Ravnovesna temperatura ploščice iz niklja v mešanici atomarnega in molekularnega vodika. Merili smo pri treh močeh RF generatorja. Opaziti je močno odvisnost temperature ploščice od jakosti EM polja. Stopnja disociiranosti molekul je do 10% in je odvisna od tlaka.

#### 4 Ogrevanje v plazmi

Vzorec, ki ga obliva plazma, se segreva zaradi naslednjih površinskih pojavov:

- Absorpcija svetlobe iz plazme. Nizkotlačna plazma je močan izvir svetlobe v infrardečem, vidnem in ultravijoličnem delu spektra. Običajno prevladuje UV- svetloba. Posledice absorpcije fotonov so ogrevanje vzorca, stimulirana desorpcija adsorbiranih plinov in fotoefekt.
- Bombardiranje površine s pozitivnimi ioni. Posledice so ogrevanje vzorca, stimulirana desorpcija adsorbiranih plinov, odprševanje in sekundarna emisija elektronov.
- Rekombinacija nabitih delcev. Na površini potekajo rekombinacije atomarnih in molekularnih ionov.
- Rekombinacija molekularnih ionov lahko poteka kot  $H_2^+ + e^- \rightarrow H_2$  ali pa kot  $H_2^+ + e^- \rightarrow 2H$ , pri čemer v prvem primeru nastala molekula z veliko verjetnostjo zapusti površino v vibracijsko vzbujenem stanju. Posledica je ogrevanje vzorca.
- Akomodacija (relaksacija) vibracijsko vzbujenih molekul. Le-ta pogosto poteka po disociativni adsorpciji. Posledica je ogrevanje vzorca.
- Rekombinacija nevtralnih atomov tipa  $H + H \rightarrow H_2$ . Tudi v tem primeru je lahko nastala molekula v visokem vzbujenem stanju. Posledica je ogrevanje vzorca.

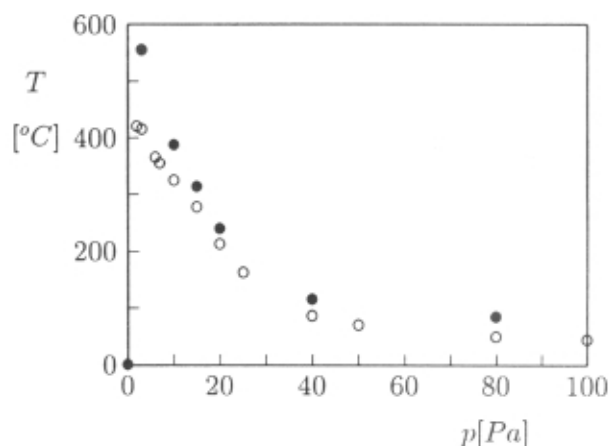
Kateri od navedenih mehanizmov je prevladujoč, je odvisno od stanja plazme in površine, pomemben dejavnik pa je tudi način generiranja plazme. Pri šibkoioniziranih plazmah, ki jih generiramo v komorah, katerih površine imajo majhen rekombinacijski koeficient  $\gamma$  (stekla, oksidirane kovinske površine) prevladuje ogrevanje, ki je posledica rekombinacije nevtralnih atomov vodika, na drugem mestu pa je absorpcija UV-svetlobe. Če so stene razelektrivne komore izdelane iz materiala z visokim rekombinacijskim koeficientom  $\gamma$  (materiali, ki kemisorbirajo vodik), je ravnovesna go-

stota atomov H tako nizka, da je tovrstno gretje zanemarljivo. V tem primeru prevladuje absorpcija UV-svetlobe, pri močnejše ioniziranih plazmah pa rekombinacija nabitih delcev in akomodacija nabitih delcev. Slednja postane prevladujoč način ogrevanja predvsem pri kombiniranih razelektrivah (npr. RF-razelektritev + tleča razelektritev). V tovrstnih plazmah je najvišja temperatura vzorca odvisna le od njegovega vrelišča, hitrosti ogrevanja vzorcev pa lahko presega  $1000^\circ\text{C/s}$ .

Povrnimo se k naši šibkoionizirani plazmi, kombinirano razelektritev pa pustimo za drugo priložnost. Vzemimo preprost vakuumski sistem, ki ga črpamo z dvostopenjsko rotacijsko črpalko in pastjo, ki je hlajena s tekočim dušikom. Vakuumski sistem je hermetično tesen. Pogosto ga prezračimo, med črpanjem pa nič ne pregrevamo, tako da plin v našem sistemu pri končnem tlaku vsebuje praktično samo vodno paro. Končni tlak v razelektrivni komori je  $2 \cdot 10^{-2}$  mbar, ko črpamo le z rotacijsko črpalko in  $4 \cdot 10^{-3}$  mbar, ko hladimo še past. Razelektrivno komoro smo izdelali iz kovarskega stekla (Schott 8250) in površino obdelali z agresivnimi čistili. S tem nam je uspelo povečati rekombinacijski koeficient  $\gamma$ .

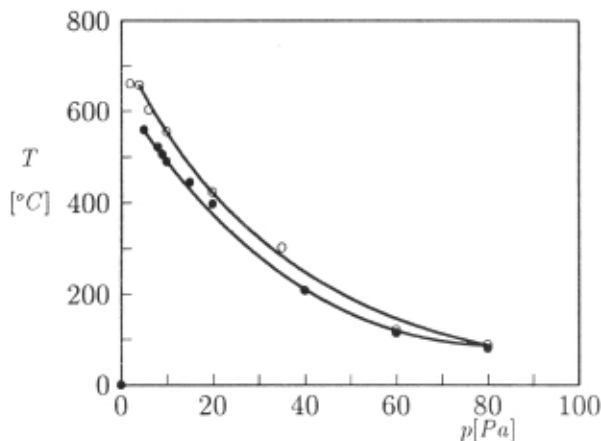
V sistem med črpanjem skozi precizni dozirni ventil vpuščamo vodik. Najprej smo plazmo generirali pri majhni gostoti EM-polja. V razelektrivno komoro smo namestili ploščico iz niklja, potem pa še enako veliko ploščico iz bakra. Ravnovesno temperaturo smo izmerili pri različnih delovnih tlakih med 1 Pa in 100 Pa. Pasti nismo hladili s tekočim dušikom. Rezultat je prikazan na sliki 3. Opazimo, da je odvisnost ravnovesne temperature ploščic od tlaka v tej plazmi popolnoma drugačna kot pri ogrevanju z atomarnim vodikom (glej sliko 2). Očitno nam je res uspelo povečati koeficient  $\gamma$  bolj, kot smo nameravali. Kljub temu opisani sistem omogoča kontrolirano ogrevanje vzorcev v atmosferi z zelenimi učinki. Pri vseh naslednjih poskusih smo delali v obstoječem sistemu, le da smo nekoliko povečali gostoto EM-polja, s katerim vzbujamo plazmo.

Zanimiv je poskus, katerega rezultat je prikazan na sliki 4. Merili smo ravnovesno temperaturo nikljeve ploščice v odvisnosti od tlaka pri dveh načinih črpanja: samo s



Slika 3. Ravnovesna temperatura vzorca Cu (zgornja krivulja) in vzorca Ni (spodnja krivulja) v odvisnosti od tlaka. Šibka vodikova plazma. Vzbujanje plazme: induktivno vezan RF-generator, 3 oboji tuljave.

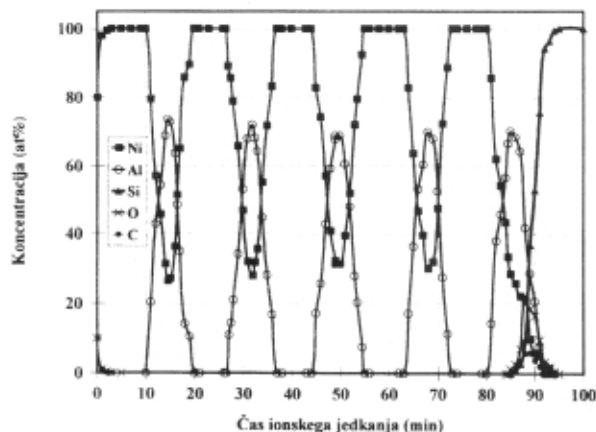
predčrpalko in s kombinacijo predčrpalke in pasti. Opazimo, da je ravnovesna temperatura pri nizkih tlakih odvisna od sestave plina (relativne vsebnosti vodne pare). Ogrevanje v bolj čistem vodikcu je močnejše od ogrevanja v vlažnem vodikcu, iz česar sklepamo, da tudi v obstoječem sistemu ogrevanje z rekombinacijo vodikovih atomov ni popolnoma zanemarljivo.



Slika 4. Ravnovesna temperatura Ni-sonde v odvisnosti od tlaka. Gostejša vodikova plazma. Vzbujanje plazme: RF-generator, 6 ovojev tuljave. Spodnja krivulja - brez LN2 pasti. Zgornja krivulja - z LN2 pastjo.

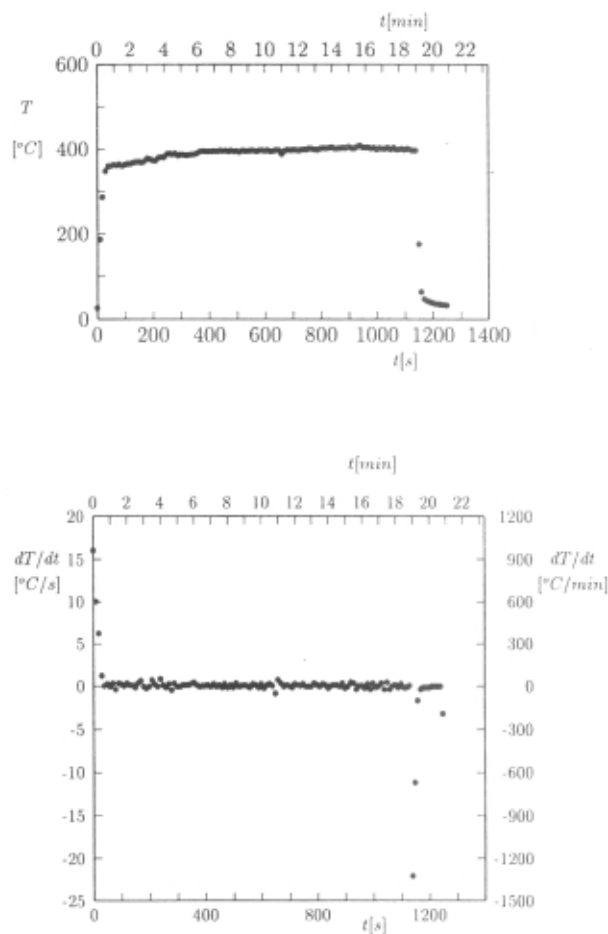
Sedaj, ko poznamo možnosti za ogrevanje poskusnih vzorcev v našem sistemu, se lahko lotimo konkretnih nalog. Izbrali smo vzorec tankoplastne strukture Ni/Al na Si-podlagi. AES profilna analiza vzorca je prikazana na sliki 5. Naloga je zastavljena takole:

- V kratkem času segreti vzorec do temperature 400°C
- Temperatura vzorca naj bo konstantna 20 minut
- V kratkem času ohladiti vzorec do sobne temperature
- Preprečiti oksidacijo vzorca med ogrevanjem
- Reducirati površinsko plast oksida še preden kisik difundira do meje Ni/Al.



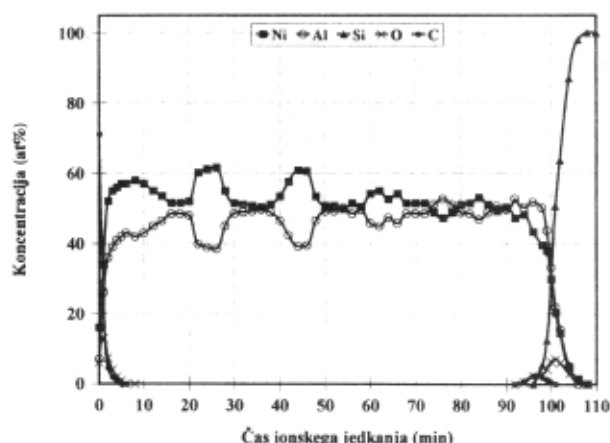
Slika 5. AES profilna analiza večplastne tankoplastne strukture Ni/Al pred ogrevanjem v vodikovi plazmi

Vzorec smo izpostavili plazmi pri tlaku 25 Pa. Od trenutka vklopa RF-generatorja smo merili temperaturo vzorca 21 minut. Krivulja in njen odvod sta prikazana na sliki 6. Iz slike 6 je razvidno, da vzorec že v prvi minuti ogrevanja doseže ravnovesno temperaturo približno 400°C. V začetku je hitrost ogrevanja nekaj več kot 10°C/s (več 100°C na minuto). Temperatura vzorca je potem konstantna. Po 19 minutah delovanja plazme izklopimo RF-generator in v istem trenutku zapremo ventil nad pastjo, s čimer "izklopimo" črpanje. Temperatura vzorca naglo pade do 50°C, kar je tudi temperatura plina med delovanjem RF-generatorja. Hitrost ohlajanja je več kot 1000°C na minuto.



Slika 6. Temperaturni potek vzorca večplastne tankoplastne strukture Ni/Al pri pregrevanju v nizkotlačni plazmi pri tlaku 25 Pa (a) in odvod krivulje (b). Črpanje s predčrpalko in LN2 pastjo. Pri času  $t = 0$  s smo plazmo vklopili, pri  $t = 1140$  s pa izklopili.

Profilna analiza vzorca po izpostavi v plazmi je prikazana na sliki 7. Opazimo, da je iz večplastne strukture nastala vsaj v povprečju homogena snov. V njej ni zaslediti kisika - naravno plast nikljevega oksida nam je torej uspelo reducirati, še preden bi kisiku pri povišani temperaturi uspelo difundirati v notranjost. Površina vzorca še vedno vsebuje kisik, ker smo ga izpostavili zraku, preden smo ga namestili v spektrometer Augerjevih elektronov.



Slika 7. AES profilna analiza večplastne tankoplastne strukture Ni/Al po ogrevanju v vodikovi plazmi.

## 5 Sklep

Prikazali smo možnosti, ki jih nudi nizkotlačna vodikova plazma za ogrevanje vzorcev. Vzorce lahko ogrevamo z interakcijo različnih delcev plazme s površinami. Nekoliko podrobneje smo prikazali dva načina ogrevanja:

- Ogrevanje v mešanici atomarnega in molekularnega vodika. Delamo pri sobni temperaturi plina. V tem primeru plazma rabi zgolj kot izvir atomarnega vodika. Ogrevamo lahko le vzorce, na katerih površinah poteka izdatna rekombinacija nevtralnih atomov vodika. Ta način ogrevanja je izredno čist, saj nimamo težav s spremljajočimi pojavi plazme, kot je npr. odprševanje. Zaradi velike gostote toka atomarnega vodika na površino obstaja možnost vodičenja kovin z velikim difuzijskim koeficientom za H. V nekaterih primerih lahko visoka gostota toka H na površino povzroči spremembo morfologije vzorca [20,21].
- Ogrevanje v plazmi. Temperatura plina je nekoliko povišana do približno 50°C. Za ogrevanje vzorcev izkoriščamo absorpcijo svetlobe, rekombinacijo nabitih delcev, šibko bombardiranje vzorca z ioni in delno akomodacijo vseh vrst delcev. Z uporabo šibkoionizirane induktivno vzbujane RF plazme dosežemo zelo majhno odprševanje in s tem zagotovimo

ustrezno čistost postopka. Delna disociiranost molekul vodika omogoča že pri nizki temperaturi hitro redukcijo površinske plasti oksida. Pri šibkoioniziranih plazmah je hitrost ogrevanja vzorcev reda 10°C/s, ravnovesna temperatura pa do 1000°C. Za dosego bistveno višjih temperatur ali hitrosti ogrevanja je potrebno uporabiti drugačno vzbujanje plazme. Pri našem delu se je zelo dobro obnesla kombinacija RF in tleče razelektritve, vendar pa rezultatov teh raziskav v tem članku nismo opisali.

## 6 Literatura

- /1/ S. Spruk, M. Jenko, L. Koller and D. Raišič, Vacuum 43 (1992), 769.
- /2/ S. Spruk, M. Jenko, L. Koller and D. Raišič, Vacuum 44 (1993), 461.
- /3/ F. Breclj and M. Mozetič, Vacuum 40 (1990), 177.
- /4/ J. T. Tate and P. T. Smith, Phys. Rev. 39 (1932), 270.
- /5/ H. F. Newhall, Phys. Rev. 621 (1942), 11.
- /6/ W. Balckney, Phys. Rev. 35 (1930), 1180.
- /7/ E. V. Ivash, Phys. Rev. 112 (1958), 155.
- /8/ L. A. Edelstein, Nature 182 (1958), 932.
- /9/ E. Bauer and T. Y. Wu, Canad. J. Phys. 34 (1956), 1436.
- /10/ W. L. Fite and R. T. Brackman, Phys. Rev. 112 (1958), 1141.
- /11/ W. L. Fite and R. T. Brackman, Phys. Rev. 112 (1958), 1151.
- /12/ M. Mozetič, M. Kveder, M. Drobnič, A. Paulin and A. Zalar, Vacuum 45 (1994), 1095.
- /13/ M. Mozetič, M. Kveder, A. Pregelj in M. Drobnič, Vakuumist 13/2 (1993), 21.
- /14/ M. Mozetič, M. Drobnič, F. Breclj and M. Kveder, Proc. 10th Int. Symp. Plasma Chemistry, Bochum (1991), 2.1.20.
- /14a/ F. Breclj, M. Mozetič, K. Zupan and M. Drobnič, Vacuum 44 (1993), 459.
- /15/ R. I. Hall, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou and S. Schermann, Physical Review Letters 60, (1988), 337.
- /16/ I. Čadež, C. Schermann, M. Landau, F. Pichou, D. Popovič and R. I. Hall, Zeitung f. Physik, D (1993), 328.
- /17/ D. Popovič, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou, C. Schermann and R. I. Hall, Meas. Sci. Technol. 1 (1990), 1041.
- /18/ M. Mozetič, M. Drobnič, and A. Pregelj, Proc. 13th Int. Vacuum Congress, Yokohama, poslano v objavo (1995).
- /19/ F. Breclj, M. Mozetič, M. Kveder and M. Drobnič, Proc. 11th Int. Symp. Plasma Chemistry, Loughborough (1993), 1546.
- /20/ M. Mozetič, M. Kveder, T. Mozetič and M. Drobnič, Cz. J. Phys. 43 (1993), 953.
- /21/ I. Chorkendorff and P. B. Rasmussen, Surf. Sci. 248 (1990), 35.

# IZOBRAŽEVANJE

**OSNOVE VAKUUMSKE TEHNIKE ZA SREDNJEŠOLSKE PREDAVATELJE**  
**12.-14. maj, 11.-13. junij, 21.-23. september in 9.-11. november**

Tečaj je namenjen za popestritev pouka fizike in tehničnih znanj na srednjih in višjih šolah. Podrobnejša vsebina in razpis so posebej objavljeni v informativnih glasilih za šolstvo.