

# KARAKTERIZACIJA PLAZME SO<sub>2</sub> IN SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

Gregor Primc<sup>1,2</sup>, Rok Zaplotnik<sup>1</sup>, Alenka Vesel<sup>1</sup>

ZNANSTVENI ČLANEK

<sup>1</sup>Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Jamova 39, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

Dandanes se za obdelavo raznovrstnih materialov v vedno večji meri uporablja šibko ionizirana, visoko disociirana plinska plazma. Plazemsko obdelavo materialov namreč odlikuje izredna kakovost, stabilnost in ekološka neoporečnost. Pri obdelavi materialov je zelo pomembno poznanje gostote plazemskih delcev v okolici obdelovanca, saj sta način in intenziteta obdelave močno odvisni od gostote toka delcev na površino obdelovanca. Plazma SO<sub>2</sub> je s tega vidika še dokaj nepoznana in neraziskana. Njeno morebitno aplikacijo pa bi lahko uporabili v raznovrstnih tehnologijah, kot so plazemsko jedkanje, obdelava bioloških vzorcev, funkcionalizacija materialov in modifikacija površin. V prispevku prikazujemo karakterizacijo plazme SO<sub>2</sub> s katalitičnimi sondami in optično emisijsko spektroskopijo. Tako plazmo smo uporabili tudi za uspešno funkcionalizacijo polimera polietilen tereftalat (PET), kar je pomembno pri izboljšanju hemokompatibilnosti umetnih žil, ki so izdelane iz tega materiala.

**Ključne besede:** plazma SO<sub>2</sub>, umetne žile, XPS, polimer, katalitična sonda

## Characterisation of SO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> plasma

### ABSTRACT

Nowadays, weakly ionized highly dissociated gas plasma is used for the surface treatment of various materials. A very important parameter is the density of neutral atoms in plasma in the vicinity of the treated material, since the process and intensity of the treatment heavily depend on the flux of neutral atoms to the surface. From this point of view, SO<sub>2</sub> plasma is quite unknown and there are hardly any data in the literature. SO<sub>2</sub> plasma is very promising for surface treatment of various materials and its application could be possible in a variety of technologies, such as plasma etching, functionalization of materials and modification of biological samples. This paper therefore reports the characterization of SO<sub>2</sub> plasma by catalytic probes and optical emission spectroscopy. Furthermore, SO<sub>2</sub> plasma was used also for the successful functionalization of polyethylene terephthalate (PET) polymer, which is important for improving hemocompatibility of artificial vascular grafts, which are made from PET material.

**Keywords:** SO<sub>2</sub> plasma, artificial blood vessel, XPS, polymer, catalytic probe

## 1 UVOD

Plazma se pogosto uporablja za funkcionalizacijo polimernih materialov, pri čemer lahko na njihovo površino vežemo specifične kemijske skupine. Najbolj pogosto se uporablja kisikova (O<sub>2</sub>) plazma, kjer se na površini tvorijo različne kisikove funkcionalne skupine, kot so hidroksilne (OH), karbonilne (CO) in karboksilne (COOH). Namesto kisikove plazme lahko uporabimo tudi plazmo vodne pare (H<sub>2</sub>O) ali ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>). Dušikova (N<sub>2</sub>) ali amonijakova plazma (NH<sub>3</sub>) se pogosto uporabljata v bioloških aplikacijah, saj lahko na površino vežemo amino (NH<sub>2</sub>) skupine. Vse te plazme naredijo površino hidrofilno. Če želimo hidrofobno površino, lahko upora-

bimo plazmo tetrafluorometana (CF<sub>4</sub>), kjer lahko na površino vežemo različne nepolarne fluorove funkcionalne skupine.

Ključno vlogo pri interakciji plazemskih delcev s površino materiala igrajo nevtralni atomi, ki nastanejo pri disociaciji molekul v plazmi. Pri kisikovi (O<sub>2</sub>) in dušikovi (N<sub>2</sub>) plazmi je zadeva dokaj enostavna, saj oba plina disociirata bodisi na atome kisika (O<sub>2</sub> → O + O) ali dušika (N<sub>2</sub> → N + N). Njihovo gostoto je zelo enostavno izmeriti s katalitičnimi sondami [1, 2]. S temi merimo energijo, ki se sprošča pri ravno obratni reakciji, tj. rekombinaciji atomov na površini sonde v molekule. Pri drugih plinih, kot so CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O in NH<sub>3</sub>, je zadeva bolj kompleksna, saj imamo lahko več površinskih reakcij na sondi. Tako lahko imamo pri plazmi CO<sub>2</sub>, kjer molekula disociira v CO + O, na površini sonde bodisi reakcijo O + O → O<sub>2</sub> ali pa CO + O → CO<sub>2</sub>. Verjetnost za prvo reakcijo je znana, za drugo pa ne, kar nam onemogoča natančno določitev gostote atomov kisika v plazmi CO<sub>2</sub> [3]. Podobno velja tudi za bolj malo poznano plazmo, ustvarjeno v žveplovem dioksidu (SO<sub>2</sub>). Pri obdelavi polimerov v taki plazmi lahko na površini ustvarimo SO<sub>3</sub>-skupine, ki bi lahko glede na podatke iz literature imele protitrombogeni značaj, zato bi lahko tovrstno plazmo uporabili za izboljšanje hemokompatibilnosti umetnih žilnih vsadkov [4, 5]. V tem prispevku prikazujemo poskusne meritve koncentracije atomov kisika v čisti plazmi SO<sub>2</sub> oziroma njeni mešanici s kisikovo plazmo (SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>).

## 2 EKSPERIMENTALNI DEL

Plazemski sistem je bil sestavljen iz cevi iz stekla pyrex zunanega premera 4 cm in dolžine približno 80 cm. Sonda je bila nameščena na sredino glavne cevi in potisnjena proti tuljavi, tako da je bila razdalja med konico sonde in prvim ovojem tuljave 13 cm. Vakuumski sistem smo črpali z dvostopenjsko rotacijsko črpalko Edwards s črpalno hitrostjo 80 m<sup>3</sup>/h. Tlak v sistemu smo merili s kalibriranim kapacitivnim merilnikom MKS Baratron. Plazmo smo vzbujali z radiofrekvenčnim elektromagnetnim poljem, ki izvira iz RF tokovne tuljave. Uporabili smo industrijski radiofrekvenčni generator pri standardni, mednarodno določeni frekvenci 13,56 MHz. Za ustvarjanje električnega polja oziroma razelektritve smo uporabili bakreno tuljavo s šestimi ovoji, ki je bila povezana s komercialnim ujemalnim oziroma sklopitvenim

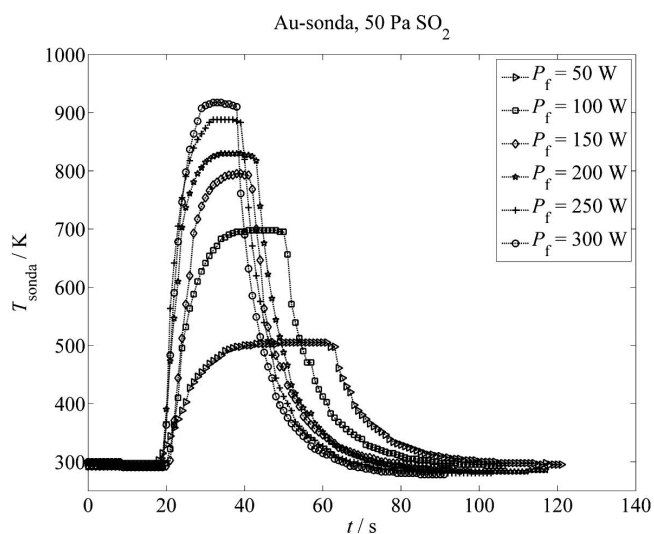
členom. Uporabili smo pet različnih moči RF-generatorja od 50 W do 300 W s korakom po 50 W pri štirih različnih tlakih plina SO<sub>2</sub>: (20, 50, 80 in 100) Pa ter štirih različnih tlakih mešanice plina SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Pri plinski mešanici je bil tlak SO<sub>2</sub> konstanten, in sicer 80 Pa, spreminjali pa smo le pritisk vpusta kisika (5 Pa, 10 Pa, 20 Pa in 80 Pa). Plazemski sistem je bil opremljen tudi z optičnim spektrometrom Avantes 3648, s katerim smo zajeli optične emisijske spektre (OES) plazme SO<sub>2</sub> in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

Plazmo smo najprej natančno karakterizirali s katalitično sondo in OES-spektroskopijo. Uporabili smo sondo, katere konica je bila izdelana iz zlata oziroma molibdena. Nato smo v plazmi še poskusno obdelali vzorce polimera PET, da bi ugotovili, ali lahko nanj vežemo SO<sub>3</sub>-skupine. Kemijske spremembe, ki so nastale na plazemsko obdelanem polimeru PET, smo karakterizirali z metodo rentgenske fotoelektronske spektroskopije (XPS) [6].

### 3 REZULTATI

**Sliki 1 in 2** prikazujeta značilen časovni potek temperature zlate katalitične sonde. Prva slika prikazuje signal sonde v plazmi SO<sub>2</sub> pri tlaku 50 Pa, druga pa v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri razmerju tlakov 10 Pa/80 Pa. Podobno prikazujeta **sliki 3 in 4** časovni potek temperature molibdenove katalitične sonde. Prva slika prikazuje signal molibdenove sonde v plazmi SO<sub>2</sub> pri tlaku 20 Pa, druga pa v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri razmerju tlakov 5 Pa/80 Pa. S **slik 1 in 2** je razvidno, da se zlata sonda v primerjavi z molibdenovo močnejše greje in doseže višje temperature, zato ima veliko boljši signal v primerjavi z molibdenovo.

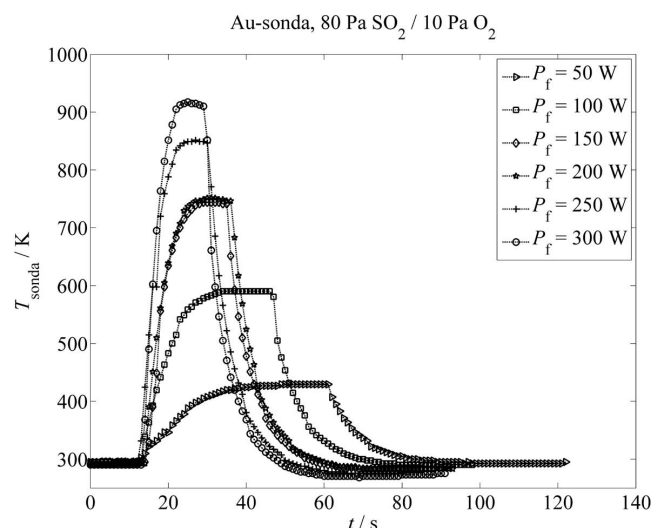
Gostoto atomov v plazmi smo izmerili pri štirih različnih tlakih in šestih različnih močeh. Meritve z



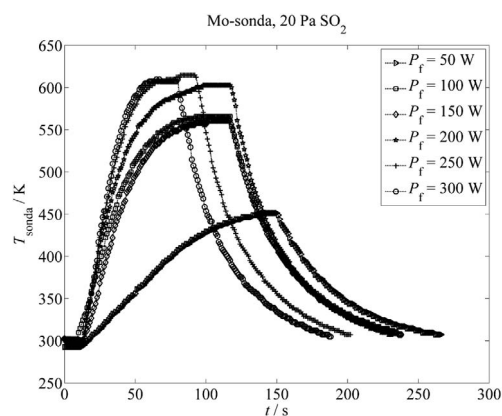
**Slika 1:** Temperaturni potek zlate sonde v odvisnosti od časa v plazmi SO<sub>2</sub> pri tlaku 50 Pa

zlato sondo so omogočale določitev gostote nevtralnih kisikovih atomov preko odvodov, prikazanih na **slikah 5 in 6** za plazmo SO<sub>2</sub> in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, ki smo jih odčitali s **slik 1 in 2**. Gostota nevtralnih kisikovih atomov, izmerjena z zlato katalitično sondo v plazmi SO<sub>2</sub> in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, je prikazana na **slikah 7 in 8**. Podobno prikazujeta **sliki 9 in 10** gostoto nevtralnih kisikovih atomov, izmerjeno z molibdenovo katalitično sondo. Opazimo lahko, da je gostota atomov kisika v plazmi večja, če uporabimo mešanico SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Pri molibdenovi sondi je razlika v gostoti atomov zanemarljiva, kar je verjetno posledica eksperimentalne napake. Podoben efekt, da je v mešanici po navadi večja gostota atomov, je znan tudi iz mešanice argonske in kisikove plazme, kjer dodatek argona poveča stopnjo disociacije kisikovih molekul v plazmi.

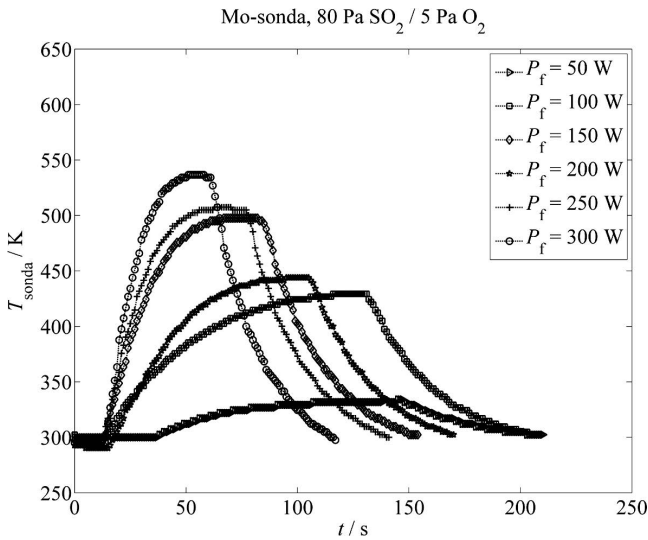
Tu velja še omeniti, da pri molibdenovi sondi dobimo tudi nekoliko višje gostote atomov kot pri zlati sondi, kar bomo razložili kasneje. Na **slikah 11 in 12** je prikazana stopnja disociacije v plazmi SO<sub>2</sub>, izmerjena z zlato in molibdenovo sondo. Tudi tukaj smo



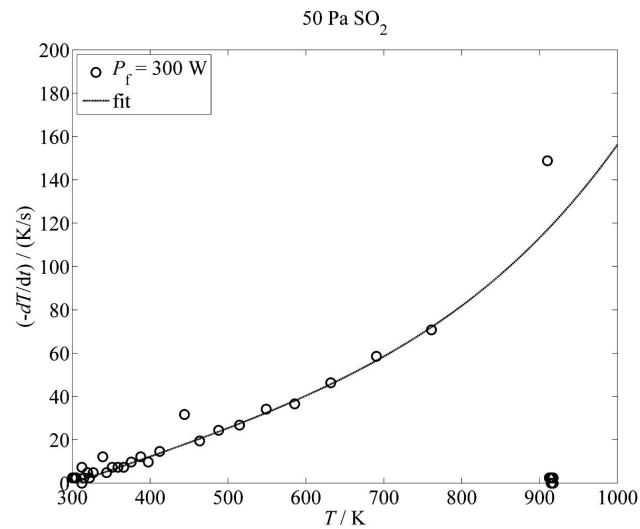
**Slika 2:** Temperaturni potek zlate sonde v odvisnosti od časa v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri razmerju tlakov 80 Pa/10 Pa



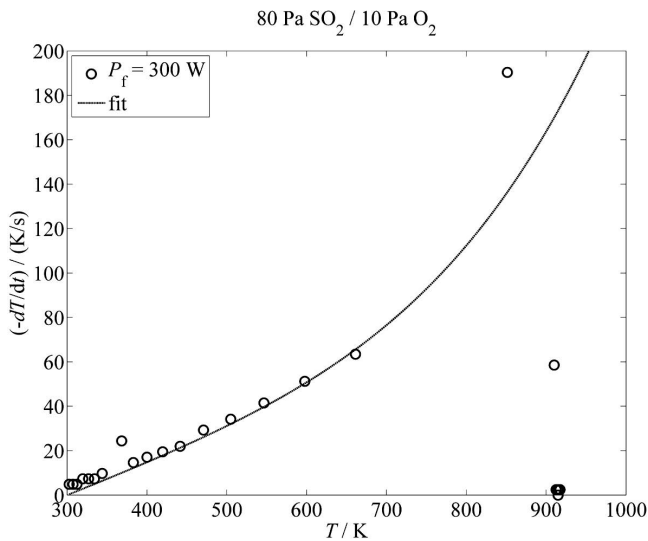
**Slika 3:** Temperaturni potek molibdenove sonde v odvisnosti od časa v plazmi SO<sub>2</sub> pri tlaku 20 Pa



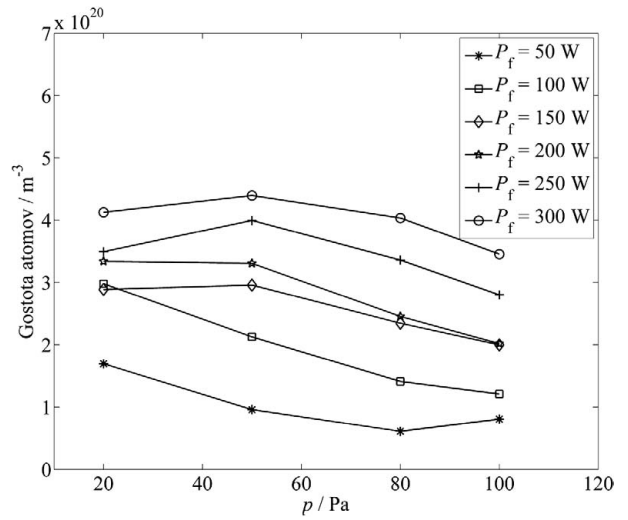
Slika 4: Temperaturni potek molibdenove sonda v odvisnosti od časa v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri tlaku 80 Pa/5 Pa



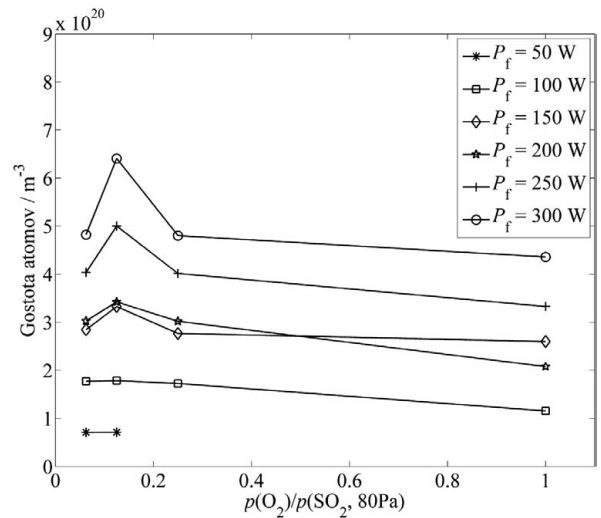
Slika 5: Odvodi pri zlati sondi v plazmi SO<sub>2</sub> pri tlaku 50 Pa in največji moči 300 W



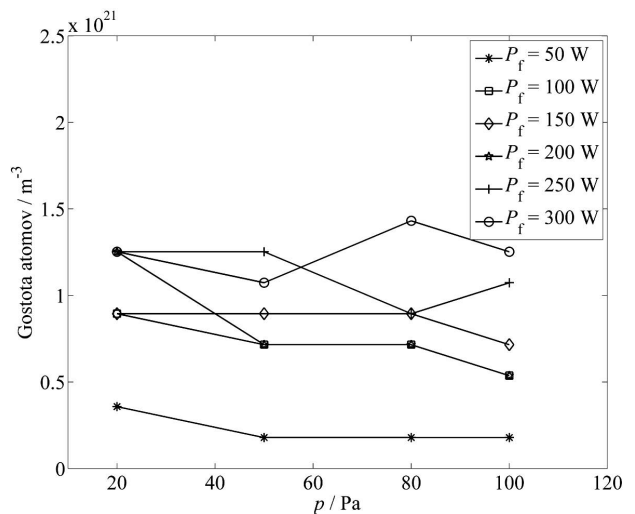
Slika 6: Odvodi pri zlati sondi v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri razmerju tlakov 80 Pa/10 Pa in največji moči 300 W



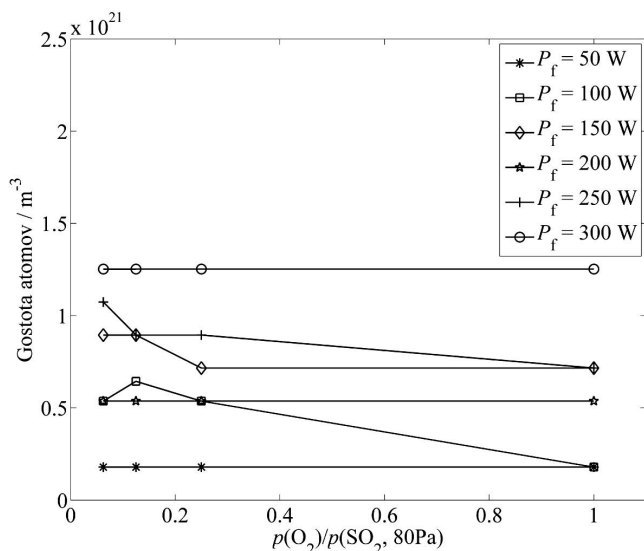
Slika 7: Gostota nevtralnih atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>, izmerjena z zlato sondi v odvisnosti od tlaka ter pri različnih močeh



Slika 8: Gostota nevtralnih atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, izmerjena z zlato sondi v odvisnosti od tlačnega razmerja ter pri različnih močeh



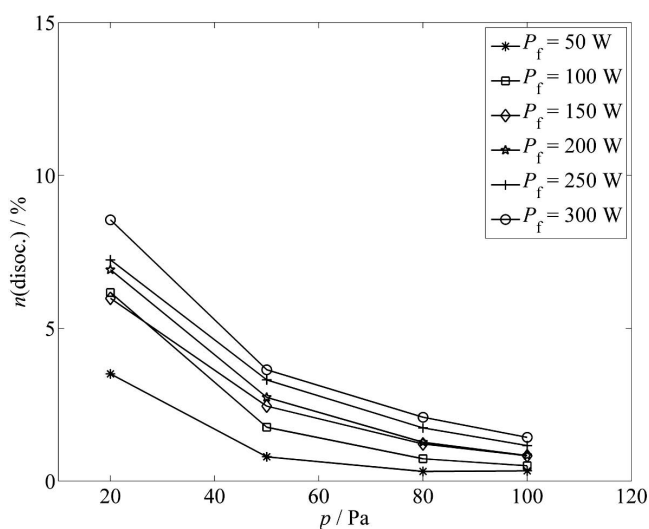
Slika 9: Gostota nevtralnih atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>, izmerjena z molibdenovo sondi v odvisnosti od tlaka ter pri različnih močeh



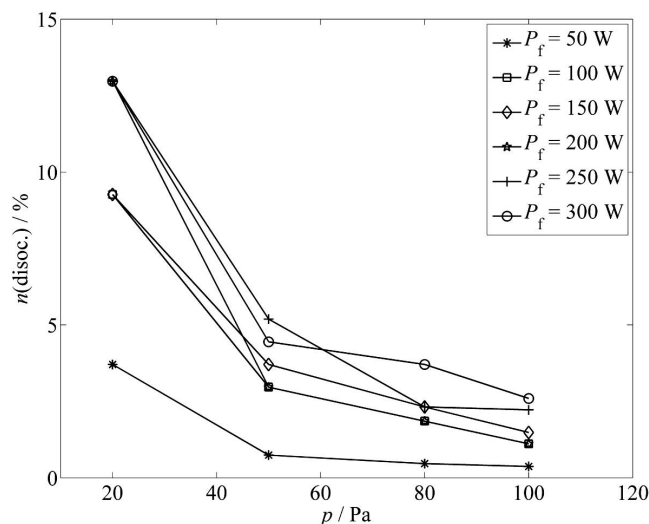
**Slika 10:** Gostota nevtralnih atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, izmerjena z molibdenovo sondo v odvisnosti od tlačnega razmerja ter pri različnih močeh

opazili nekoliko višjo stopnjo disociacije pri molibdenovi sondi.

**Sliki 13 in 14** prikazujeta značilni spekter plazme SO<sub>2</sub> in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Oba spektra sta si močno podobna. Za plazmo SO<sub>2</sub> je značilen SO-kontinuum v območju med 300 nm in 450 nm ter manjši pas med približno 450 nm in 550 nm. V spektru opazimo tudi črte atomov kisika (O) pri 533 nm, 777 nm (3p<sup>5</sup>P-3s<sup>5</sup>S) in pri 844 nm (3p<sup>3</sup>P-3s<sup>5</sup>S). Pri valovni dolžini 923 nm opazimo črte atomov žvepla (S). Razvidno je, da dodaten vpust kisika zmanjša intenziteto SO-kontinuum, prav tako izgine črta atomov žvepla, intenziteta kisikovih črt pa se poveča. Če uporabimo mešanico SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (**slika 14**), se razmerje intenzitet kisika poveča v primerjavi z intenziteto kontinuuma.



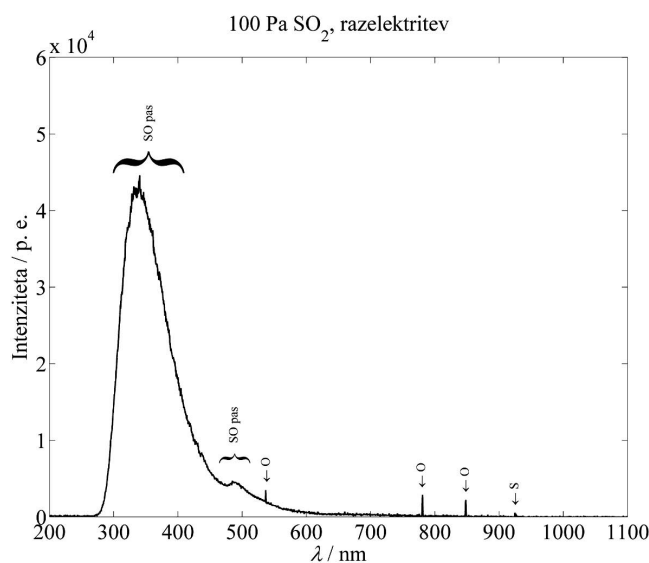
**Slika 11:** Disociacija atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>, izmerjena z zlato sondo v odvisnosti od tlaka ter pri različnih močeh



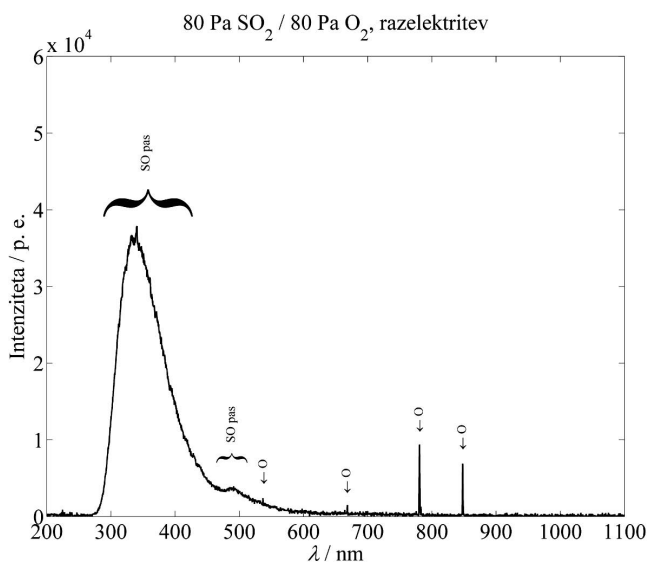
**Slika 12:** Disociacija atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub>, izmerjena z molibdenovo sondo v odvisnosti od tlaka ter pri različnih močeh

Zanimiva lastnost žveplove plazme je, da ne sveti samo znotraj razelektritvenega dela, temveč lahko opazimo šibko svetlobo tudi v porazelektritvenem delu, česar v čisti kisikovi plazmi ne opazimo. Žveplova plazma je torej zelo močan sevalec, sveti pa v izrazito modri barvi.

Da bi preverili, ali lahko plazmo SO<sub>2</sub> uspešno uporabimo za funkcionalizacijo polimernih materialov za doseganje protitrombogenih učinkov, smo polimer PET, ki se uporablja za umetne žilne vsadke, izpostavili tej plazmi za 30 s. Sestava površine pred plazemsko obdelavo in po njej, kot je bila ugotovljena z metodo XPS, je prikazana v **tabeli 1**. Opazimo, da pride na površini tako do povečanja koncentracije kisika kot tudi žvepla. Da bi ugotovili, kakšne

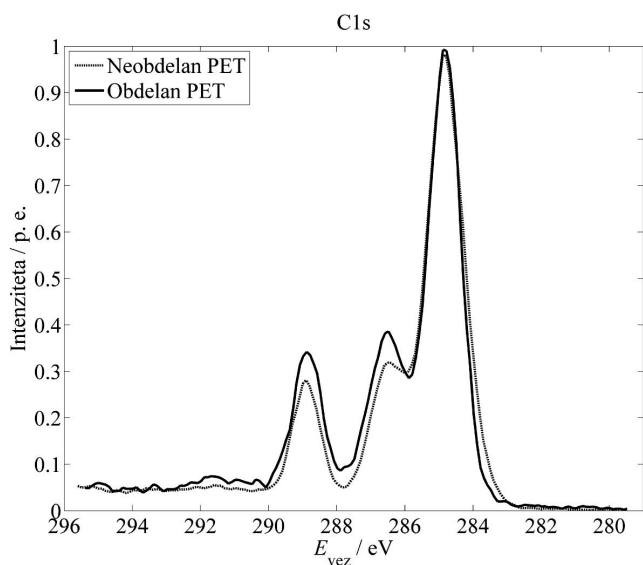


**Slika 13:** Spekter plazme SO<sub>2</sub> pri tlaku 100 Pa v območju razelektritve

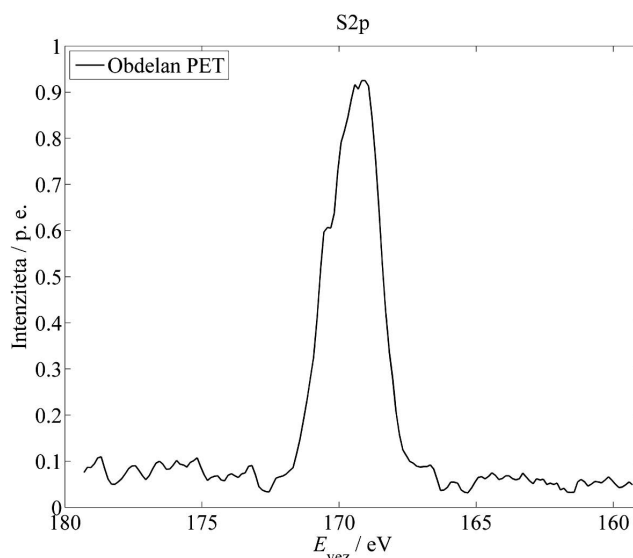


**Slika 14:** Spektar plazme SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pri razmerju tlakov 80 Pa/80 Pa v območju razelektritve

funkcionalne skupine so nastale na površini, smo posneli še visoko ločljiva spektra ogljika in žvepla, prikazana na slikah 15 in 16. V spektru ogljika (slika 15) ne opazimo bistvenih sprememb pred obdelavo in po njej. Če bi se kisik iz plazme vezal na atome ogljika, bi morali opaziti močan porast obeh manjših vrhov na levi [7]. Ker tega nismo opazili, lahko sklepamo, da je bil kisik, katerega koncentracija se je po plazemski obdelavi povečala, vezan večinoma v žveplovih funkcionalnih skupinah, kar je razvidno tudi s slike 14. Žveplo se torej nahaja v visoko oksidiranem stanju, zato lahko predpostavimo prisotnost SO<sub>3</sub>-skupin. Tukaj velja še omeniti, da vezi C–S v samem spektru ogljika nismo opazili. Razlog je v tem, da je vezavna energija vezi C–S blizu vezavni energiji



**Slika 15:** Primerjava visoko ločljivega XPS-spektra ogljika neobdelanega in plazemsko obdelanega vzorca PET



**Slika 16:** Primer visoko ločljivega XPS-spektra žvepla, posnetega na plazemsko obdelanem vzorcu PET

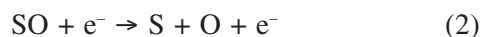
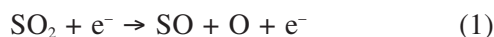
vezi C–C (glavni vrh), zato vrha C–S ne moremo jasno razločiti od glavnega vrha ogljika.

**Tabela 1:** Površinska sestava polimera PET (atomske deleži), ugotovljena z metodo XPS pred obdelavo in po njej v plazmi SO<sub>2</sub>

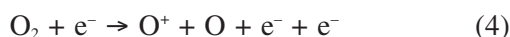
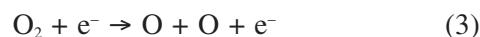
Vzorec PET	C	O	S
neobdelan	73,5	26,5	
obdelan v plazmi	60,7	36,2	3,1

## 4 DISKUSIJA

V plazmi SO<sub>2</sub> imamo naslednji reakciji za disociacijo molekule SO<sub>2</sub> [8]:



Ker smo poleg plazme SO<sub>2</sub> uporabljali tudi mešanico SO<sub>2</sub> in O<sub>2</sub>, imamo še nekaj dodatnih možnosti za disociacijo O<sub>2</sub> [8]:



Energija, potrebna za disociacijo kisikove molekule, je  $W_{\text{dis}}^{\text{O}_2} = 5,12$  eV, za ionizacijo  $W_{\text{ion}}^{\text{O}_2} = 12,2$  eV in za ionizacijo kisikovega atoma  $W_{\text{ion}}^{\text{O}} = 13,6$  eV. Za disociacijo molekul SO<sub>2</sub> in SO pa potrebujemo energiji  $W_{\text{ion}}^{\text{SO}_2} = 5,7$  eV in  $W_{\text{ion}}^{\text{SO}} = 5,4$  eV [9–12]. V plazmi, kjer je energija elektronov nekaj elektronvoltov, je najverjetnejši proces torej disociacija.

Rekombinacije potekajo skoraj izključno le na stenah plazemskega reaktorja, saj je verjetnost za trk treh delcev v plinu pri tlakih, ki smo jih uporabljali (od

20 Pa do 100 Pa), majhna [13]. Prav zato je reaktorska cev najpogosteje izdelana iz materiala z majhno verjetnostjo za površinsko rekombinacijo atomov (v našem primeru pyrex), saj stremimo k čim manjšim izgubam nevtralnih atomov. S tem dosežemo visoko gostoto nevtralnih atomov ob razmeroma nizki gostoti ionov, saj je namreč verjetnost za nevtralizacijo ionov na površini domala neodvisna od vrste materiala in je blizu 1.

Možnosti za rekombinacijo atomov v molekule je več. Naj posebej omenimo tri, za naš eksperiment najpomembnejše [14]:

- Na površini sta vezana dva atoma nedaleč drug od drugega. Po površini migrirata drug proti drugemu in se združita v molekulo (Lanhuir-Hinshelwoodov mehanizem).
- Atom, ki prileti na površino, zadene ob atom, ki je vezan na površino. Združita se v molekulo, ki pa ne čuti istega privlačnega potenciala, zato zapusti površino (Eley-Ridealov mehanizem).
- Na isto mesto na površini priletita dva atoma hkrati in se združita v molekulo.

Tretji proces lahko zanemarimo, saj je verjetnost, da bosta na majhen del površine hkrati padla dva atoma, zelo majhna [15]. Na prvi in drugi proces pa močno vplivajo lastnosti površine. Odvisnost rekombinacije od površinskih lastnosti opišemo z rekombinacijskim koeficientom  $\gamma$ , ki je definiran kot verjetnost, da se atom ob trku s površino rekombinira v molekulo. Katalitična sonda je v osnovi zelo majhen kos kovine [16], ki je potopljen v plazmo. Kovina katalitične sonde deluje kot katalizator za rekombinacije ter tudi prevzema večji del toplote, ki se sprosti ob rekombinacijah na sami površini sonde. Bolj ko so rekombinacije pogoste, bolj se sonda greje. Posredno lahko z opazovanjem temperature določimo gostoto atomov v plazmi. Moč gretja sonde lahko zapišemo kot:

$$P = \frac{1}{4} n \bar{v} S \gamma \frac{W_{\text{dis}}}{2} \quad (6)$$

kjer je  $n$  številska gostota atomov v plazmi,  $\bar{v}$  povprečna velikost hitrosti atomov v plazmi,  $S$  površina sonde,  $\gamma$  rekombinacijski koeficient sonde in  $W_{\text{dis}}$  disociacijska energija, ki se sprosti pri rekombinaciji. Po drugi strani lahko moč segrevanja sonde zapišemo tudi kot:

$$P = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

kjer je  $m$  masa sonde,  $c_p$  specifična toplotna kapaciteta sonde,  $dT/dt$  maksimum časovnega odvoda temperature krivulje tik za tem, ko smo izklopili vzbujanje plazme. S kombinacijo enačb (6) in (7) lahko gostoto atomov izračunamo kot:

$$n = \frac{8mc_p}{\bar{v}S\gamma W_{\text{dis}}} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

Za katalitično sondo je zelo pomembna prava izbira katalizatorja. Za kisikovo plazmo se najbolj obnese nikljeva sonda, za dušikovo železna, za vodikovo pa zlata ali platinasta. Pri plazmi SO<sub>2</sub> smo se odločili za zlato in molibdenovo sondo, saj je navadna nikljeva sonda imela preslab signal in je bila neuporabna.

Velja še omeniti, da smo pri izračunu gostote po enačbi (8) uporabili naslednje vrednosti konstant za zlato katalitično sondo:

$$m = 1,671 \cdot 10^{-5} \text{ kg}; c_p = 128 \text{ J/(kg K)}; \bar{v} = 630 \text{ m/s}; W_{\text{dis}}^{\text{O}_2} = 5,12 \text{ eV} = 8,129 \cdot 10^{-19} \text{ J}; \gamma = 0,47;$$

$$A = 1,9242 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

ter za molibdenovo katalitično sondo:

$$m = 5,137 \cdot 10^{-5} \text{ kg}; c_p = 250 \text{ J/(kg K)}; \bar{v} = 630 \text{ m/s}; W_{\text{dis}}^{\text{O}_2} = 5,12 \text{ eV} = 8,129 \cdot 10^{-19} \text{ J}; \gamma = 0,11;$$

$$A = 2,5133 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Tu je potrebna še opomba, da je bila katalitična ploščica iz molibdena precej debela (0,4 mm), medtem ko je bila zlata standardne debeline 0,04 mm. Zato je bil tudi odziv molibdenove sonde precej počasnejši. Mo- in Au-sonda sta bili najprej aktivirani v kisikovi plazmi. Po tej aktivaciji, s čimer smo sondi očistili nečistoč, smo z njima merili temperaturni signal v plazmi SO<sub>2</sub> ali njeni mešanici s kisikom.

Pri primerjavi **slik 7 in 9** ter **8 in 10** opazimo, da dobimo pri molibdenovi sondi nekoliko večje gostote atomov kot pri zlati sondi. Poleg zgornjega razloga (slabše odzivnosti sonde) je razlog verjetno tudi v rekombinacijskem koeficientu za oba katalitična materiala, ki ni natančno poznan.

Na koncu velja še omeniti reakcije, ki potekajo na površini sonde v plazmi SO<sub>2</sub>. Pri kisikovi plazmi poteka na površini samo reakcija  $O + O \rightarrow O_2$ . Pri plazmi SO<sub>2</sub> pa je zadeva bolj komplicirana, ker imamo na voljo več različnih delcev (SO, O, S) in zato tudi več različnih rekombinacijskih mehanizmov. Tako poleg reakcije  $O + O \rightarrow O_2$  predpostavimo vsaj še reakcijo  $SO + O \rightarrow SO_2$ . Ker bi upoštevanje prispevkov obeh reakcij pri segrevanju sonde otežilo izračun gostote (za reakcijo  $SO + O \rightarrow SO_2$  namreč ne poznamo verjetnosti za rekombinacijo), smo v našem primeru predpostavili, da se površina katalitičnega materiala, iz katerega je narejena sonda, zasiti s kisikovimi atomi in da je verjetnost za reakcijo  $O + O \rightarrow O_2$  bistveno večja od verjetnosti za reakcijo  $SO + O \rightarrow SO_2$ . Izračunane gostote nevtralnih atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub> so zato zgolj okvirna ocena. Da je prva predpostavka upravičena, smo pokazali tudi z XPS-analizami, saj je površina sond vsebovala zelo

veliko kisika (molski delež 30 % oziroma 50 % za Au oziroma Mo) in zelo malo žvepla (okoli 5 %).

## 5 SKLEPI

Dokazali smo, da sta tako zlata kot molibdenova katalitična sonda primerni za karakterizacijo plazme SO<sub>2</sub> in SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Izmerjena gostota atomov kisika v plazmi SO<sub>2</sub> je bila v območju 10<sup>20</sup>–10<sup>21</sup> m<sup>-3</sup>. Gostota je naraščala z naraščajočo močjo in v splošnem padala z naraščajočim tlakom. Kot smo že omenili, je gostota v mešanici SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> večja v primerjavi s čisto plazmo SO<sub>2</sub>. Na sondi smo pri izračunu gostote predpostavili samo reakcijo O + O → O<sub>2</sub>, medtem ko smo reakcijo SO + O → SO<sub>2</sub> zanemarili. To smo opravičili z veliko adsorpcijo kisika na površino sonde in z nastankom kovinskih oksidov, medtem ko je bila količina žvepla, ki smo jo našli na sondi, zelo majhna. Plazmo SO<sub>2</sub> smo med drugim uporabili tudi za uspešno funkcionalizacijo polimera PET s SO<sub>3</sub>-skupinami.

## 6 LITERATURA

- [1] M. Mozetič, A. Vesel, U. Cvelbar, A. Ricard, *Plasma Chem. Plasma P.*, 26 (2006), 103–117
- [2] M. Mozetič, U. Cvelbar, A. Vesel, A. Ricard, D. Babič, I. Poberaj, *J. Appl. Phys.*, 97 (2005), 103308-1–103308-7
- [3] A. Vesel, M. Mozetič, A. Drenik, M. Balat – Pichelin, *Chem. Phys.*, 382 (2011), 127–131
- [4] Y. H. Sun, L. X. Feng, X. X. Zheng, *J. Appl. Polym. Sci.*, 74 (1999), 2826–2831
- [5] D. Klee, H. Hocker, *Biomedical Applications*, 149 (1999), 1–57
- [6] J. Kovač, A. Zalar, *Vakuumist*, 25 (2005) 3, 19–24
- [7] A. Vesel, I. Junkar, U. Cvelbar, J. Kovač, M. Mozetič, *Surf. Interface Anal.*, 40 (2008), 1444–1453
- [8] W. Xinliang, L. Tingting, W. Dongxiang, W. Yanli, G. Fan, *Plasma Sci. Technol.*, 6 (2008), 710–716
- [9] T. L. Cottrell, *The Strengths of Chemical Bonds*, 2<sup>nd</sup> ed., Butterworth, London, 1958
- [10] B. de B. Darwent, *National Standard Reference Data Series*, National Bureau of Standards (1970), 31, Washington
- [11] S. W. Benson, *J. Chem. Educ.*, 42 (1965), 502
- [12] J. A. Kerr, *Chem. Rev.*, 66 (1966), 465
- [13] A. Drenik, Disertacija: Verjetnost za heterogeno rekombinacijo vodikovih in kisikovih atomov na površinah fuzijsko relevantnih materialov, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, Ljubljana, 2009
- [14] M. Mozetič, Disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 1997
- [15] A. Drenik, U. Cvelbar, A. Vesel, M. Mozetič, *Inform. Midem*, 35 (2005), 85–91
- [16] I. Poberaj, M. Mozetič, D. Babič, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 20 (2002), 189–193

## OBVESTILO

Člane DVTS pozivamo, da poravnajo članarino za leto 2012 v višini 25,00 EUR. Znesek lahko nakažete na naš transakcijski račun SI56 0208 3001 4712 647 preko interneta (klik) ali s plačilnim nalogom, ki ga dobite na banki. V pomoč prilagamo primer izpolnjenega plačilnega naloga.

<b>PLAČNIK</b>	IBAN:	SI56 xxxx xxxx xxxx xxx	
	Referenca:		
	Naziv:	Ime Priimek	Naslov:
	Kraj:	Kraj bivanja	Ulica in hišna št.
	Koda namena:	NOWS - Plačilo neopredeljene storitve	Država:
			SLOVENIJA - 705
			<input type="checkbox"/> Nujno <b>i</b>
			Namen / rok plačila:
			članarina 2012
	Znesek:	EUR 25,00	Datum plačila:
			vpiši tekoči datum
			BIC banke prejemnika:
			LJBASI2X
<b>PREJEMNIK</b>	IBAN:	SI56 0208 3001 4712 647	Seznam bank v območju SEPA
	Referenca:	NRC	UPN - Univerzalni plačilni nalog
	Naziv:	DVTS	Naslov:
	Kraj:	Ljubljana	Teslova 30
			Država:
			SLOVENIJA - 705