

NASVETI

Kako uporabiti masni spektrometer za karakterizacijo plazme?

Masni spektrometer s kvadrupolnim filtrom je koristen instrument za merjenje sestave plina v vakuumskih sistemih. Z nekaterimi spremembami ga lahko uporabimo za popolno karakterizacijo plazme, saj lahko poleg osnovnih parametrov (gostota plazme, temperatura elektronov, potencial plazme, Debyejeva dolžina) izmerimo tudi gostoto in energijo nevtralnih in nabitih delcev v njej. Takšen analizator ponujajo nekatere svetovne firme, med drugimi tudi multinacionalka VG Quadrupoles. Z vsem priborom in računalnikom ga dobite za okroglih 100.000 DEM. Kot za vse instrumente tudi za kvadrupolni analizator plazme velja, da je treba biti pri tolmačenju rezultatov zelo previden. V nadaljnjem besedilu zapišimo, kje so meje uporabe tega instrumenta. Pri tem je snov podana zelo poljudno in pogosto močno poenostavljeno.

Pri tehnološko zanimivih primerih generiramo plazmo v mešanici različnih plinov, ki jih vpuščamo v razelektivitveno komoro skozi dozirne ventile. V plazmi molekule plinov v precejšnji meri razpadejo na atome, ki se lahko spet vežejo v najrazličnejše molekule. Nekateri atomi se vežejo na stene razelektivitvene komore, tako da v splošnem sestava plazme ni enaka sestavi doziranih plinov. Lep primer je postopek depozicije tankih plasti diamanta v nizkotlačnih plazmah, o katerem smo v naši reviji že poročali. V tem primeru se ogljik iz plina veže na površine (žal veliko več v obliki saj (amorfn C) in navodičenega ogljika (a-C:H) kot diamanta). Zato je ugodno, da sestavo plina v plazmi merimo in se ne zanašamo na podatke o doziranju.

Gostota plazme je seštevek gostot vseh vrst ionov v plazmi. Tudi v tem primeru velja, da se razmerje med gostotami ioniziranih atomov v splošnem razlikuje od ustreznih koncentracij nevtralnih atomov v plinski mešanici. Lep primer so Penningove zmesi plinov. V heliju z 1% živega srebra je gostota Hg^+ ionov več velikostnih redov večja od gostote He^+ ionov. V tehnoloških procesih se pogosto, če ne običajno, uporabljajo prav Penningove zmesi plinov.

Če hočemo razumeti kinetiko plazemskih procesov, je dober analizator vsekakor koristno orodje. Metod za analizo plazme je ogromno, za vse pa velja, da merijo le določene parametre, pa še te bolj ali manj natančno. Še najbolj univerzalen instrument za karakterizacijo plazme je kvadrupolni analizator. Literatura na temo masnih spektrometrov je izredno bogata, zato na tem mestu omenimo samo princip delovanja.

V kvadrupolni filter masnega spektrometra vstopajo različni nevtralni in nabiti delci z gostotami $n_1, n_2 \dots n_x$ in $n_1^+, n_2^+ \dots n_x^+$. Kvadrupolni filter prepusti le tiste nabite delce, ki imajo določeno maso. Prepuščene ione s primerno elektroniko preštejemo in dobimo koncentracije posameznih vrst ionov. Nevtralne delce analiziramo tako, da jih pred vstopom v kvadrupolni filter ioniziramo s curkom elektronov s kinetično energijo 50 eV. Nastale ione preštejemo itd. Tako dobimo še koncentracije nevtralnih delcev. Elektronika skrbi za to, da pri izračunu gostot posameznih delcev upošteva različne verjetnosti za ionizacijo pri trku z elektroni. Če le nimamo preveč

bogate zmesi plinov, lahko torej z nekoliko prirejenim kvadrupolnim masnim spektrometrom dovolj natančno izmerimo gostote n_i in n_i^+ pred vstopom v kvadrupolni filter.

Za pravilno delovanje instrumenta je zelo pomembno, da je tlak v merilni glavi spektrometra vselej nižji od -10^{-4} mbar. S tem tudi zagotovimo razmeroma dolgo obstojnost katode.

Oglejmo si sedaj delovanje instrumenta v praksi. Za začetek privzemimo, da naš tehnološki postopek poteka pri tlaku 10^{-4} mbar ali manj (takšni postopki so v resnici redki, saj so prepočasni; uporabni so le za nanašanje tankih plasti). V tehnološko pomembnih plazmah je potencial plazme (električna napetost med nemoteno plazmo in steno razelektivitvene komore) nekaj 10 V, v nekaterih primerih pa celo nekaj 100 V. Potencial pade v mejni plasti, ki je velikostnega reda 10 Debyejevih dolžin. Primerno spremembi potenciala se spreminja tudi energija in gostota nabitih delcev v mejni plasti. Pozitivni delci so pospešeni, negativni pa zavrti. Zgornji razmislek velja tudi za analizator delcev, ki je prav tako del stene razelektivitvene komore. Če hočemo, da nam dejansko izmeri gostote in energije delcev v plazmi, ne pa na steni komore, moramo zagotoviti vsaj dvoje: 1. vstopna mrežica analizatorja mora biti na potencialu plazme in 2. analizator mora biti potisnjen globoko v plazmo (ne pa postavljen v stranski vod komore).

Recept za dvig potenciala je znan: Analizator je potrebno električno izolirati od ozemljene komore in med njiju pritisniti enosmerno napetost. Potencialna razlika med analizatorjem in plazmo lepo sledi spremembi zunanje napetosti samo v primeru, ko je površina ozemljene elektrode tri velikostne rede večja od površine analizatorja, ki je izpostavljen plazmi. To je posledica dejstva, da je razmerje med povprečno hitrostjo elektronov in pozitivnih ionov v plazmi $10^2 - 10^4$. Če je torej učinkovita površina analizatorja 10 cm^2 , mora biti ozemljena površina komore reda 10^4 cm^2 . V kolikor to ni res, z zunanjo napetostjo spremenimo potencialno razliko med plazmo in komoro (to potencialno razliko smo malo prej imenovali potencial plazme). S tem smo spremenili enega od bistvenih parametrov plazme in tako tudi naš tehnološki proces. Tovrstni analizator plazme je torej uporaben samo v velikih razelektivitvenih komorah.

Pri vseh stvari se nismo vprašali, kdo nam bo sploh zaupal, koliko je potencial plazme. Z obstoječim analizatorjem ga lahko izmerimo samo v primeru, ko je energijska porazdelitev elektronov vsaj približno maxwellska. Sicer pa je potrebno potencial plazme izmeriti kako drugače, na primer z emisijsko sondo.

Če nas ne zanimajo karakteristike plazme, ampak le energije in gostote toka delcev na izbrano površino, pozabimo na zgornja odstavka in opravimo meritve tako, da je naš analizator kar električno ozemljen. V tem primeru je najugodnejše, da namestimo analizator na mesto naše podlage (substrata). To pogosto ni tehnično izvedljivo, vsekakor pa ni posebno praktično. Gostote toka delcev

izmerimo nekje drugje - pred izbiro mesta za naš analizator je koristno razmisliti, ali so pogoji tam vsaj približno enaki kot pri podlagi. Mnoge tehnološko uporabne plazme niso niti izotropne, kaj šele homogene.

Predno se odločimo za meritve gostot nevtralnih (počasnih) delcev, se moramo zavedati, da je nizkotlačna plazma termodinamsko izredno neravnotežen sistem. Plini, ki so v naravi prisotni v molekularni obliki, so v plazmi v veliki meri disociirani. Vsak neravnotežni sistem teži k ravnovesju, zato lahko izredno neravnotežno stanje vzdržujemo samo s stalnim vzburjanjem. Pogosto je tehnološki proces zasnovan tako, da je produkcija posameznih vrst delcev koncentrirana v razmeroma majhnem volumnu tik pred podlago. Gostota delcev, ki so v neravnotežnem stanju (npr. atomarni vodik), v splošnem pada v smeri sten razelektrivne komore. Pri nizkih tlakih, ko je povprečna prosta pot primerljiva z razsežnostjo komore, je gradient koncentracije majhen (rekombinacija poteka samo na stenah komore), pri višjih tlakih pa poteka izdatna rekombinacija tudi v plinu. V tem primeru je lahko gostota atomarnega vodika ob steni razelektrivne komore, še posebej pa v stranskih vodih, tudi več velikostnih redov nižja od ustrezne gostote v sredini razelektrivne komore. Razmislek velja tudi za druge delce, ki niso v termodinamskem ravnovesju - nevtralni kovinski atomi, radikali ... Naš analizator je

običajno nameščen na steni razelektrivne komore, pogosto daleč stran od podlage in seveda meri koncentracije delcev tik pred kvadrupolnim filtrom, ki je lahko posebej v primeru diferencialnega črpanja za naše neravnotežne delce neskončno daleč od mesta njihovega nastanka. V tem primeru so meritve samo informativnega značaja - v najboljšem primeru lahko merimo relativne spremembe gostote. Če hočemo oceniti gostote teh delcev v nemoteni plazmi, je pred nami račun gradienta koncentracije, ki je vse prej kot trivialen.

Ko smo torej ugotovili, kaj dejansko meri naš analizator plazme, in se odločili za nakup, imamo na voljo vrhunsko napravo za karakterizacijo plazme, ki lahko v nekaterih primerih deluje tudi kot odlični analizator atomske sestave površine (SIMS - Secondary Ion Mass Spectrometry). Naša naprava deluje torej kot:

- energijski in masni analizator nabitih delcev v plazmi
- energijski in masni analizator nevtralnih delcev v plazmi
- energijsko nastavljen detektor SIMS
- klasični masni spektrometer za analizo residualne atmosfere.

mag. Miran Mozetič

Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko
Teslova 30, 61000 Ljubljana

IZOBRAŽEVANJA V LETU 1994

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije organizira že več kot dve desetletji različne strokovno izobraževalne tečaje s področja vakuumistike. Jeseni 1994 razpisujemo naslednje:

1. Vzdrževanje vakuumskih naprav (15.-17. november)

Na tečaju bo predvsem obravnavana tematika, ki jo srečujemo v tehniki grobega vakuuma, to je delovanje, vzdrževanje in popravila rotacijskih črpalk, pregled in uporaba različnih vrst črpalk, ventilov in drugih standardnih elementov, meritve vakuuma, hermetičnost in odkrivanje netesnosti v vakuumskih sistemih, materiali za popravila ter tehnike čiščenja in spajanja. Tečaj bo trajal 18 ur, od tega več kot tretjina praktičnih prikazov in vaj. Cena tečaja je 28.000 SIT. Vsak tečajnik prejme brošuro "Vzdrževanje vakuumskih naprav" in potrdilo o opravljenem tečaju.

2. Osnove vakuumске tehnike (18.-20. oktober)

Tečaj podrobneje obravnava ista področja kot prvi, poleg tega pa še pomen in razvoj vakuumске tehnike, fizikalne osnove, črpalke za visoki vakuum, tankoplastne in druge

vakuumске tehnologije, čiste postopke, analize površin ter doziranje plinov, čiščenje in preiskave plinov - skupno 22 ur z vajami in ogledom Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko. Cena tečaja je 24.000 SIT. Udeleženci prejmejo zbornik predavanj "Osnove vakuumске tehnike" in potrdilo o opravljenem tečaju.

Oba tečaja se bosta pričela ob 8.00 uri v knjižnici Inštituta za elektroniko in vakuumsko tehniko, Teslova 30, Ljubljana.

Prosimo zainteresirane, da se informativno prijavijo čimprej, za dokončno potrdilo udeležbe pa velja kopija položnice o plačilu - najkasneje štiri dni pred pričetkom tečaja, na naslov: **Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 61111 Ljubljana (št. ŽR: 50100-678-52240).**

Prijave sprejema organizacijski odbor (Koller, Spuk, Mozetič, Nemanič), ki daje tudi vse dodatne informacije (tel. 061 123-13-41).

6. slovensko-madžarsko-hrvaško-avstrijska vakuumska konferenca, Bled, 4-7. april 1995

Konferenco bodo organizirali:

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko in Ministrstvo za znanost in tehnologijo Slovenije. Na konferenci bodo obravnavane naslednje teme:

- znanost o površinah
- materiali za elektroniko
- fizika plazme in plazemske tehnologije
- tanke plasti

- uporaba znanosti o površinah
- vakuumska tehnika in tehnologije in
- vakuumska metalurgija.

Delovni jezik bo angleški. Dela, ki bodo uvrščena v program bodo predvidoma objavljena v posebni izdaji enega od znanstvenih časopisov. V času konference bo organizirana rastava opreme, materialov in znanstvene literature.

Dodatne informacije lahko dobite pri:

Dr. Monika Jenko
6th Joint Vacuum Conference
Institut za kovinske materiale in tehnologije
Lepi pot 11, P.O.B. 431
61001 Ljubljana

Tel.: (+386 61) 125 11 61
Fax: (+386 61) 213 780
E-mail: Monika.Jenkoatquest.arnes.si