

DOLOČANJE RELATIVNE KONCENTRACIJE VIBRACIJSKO EKSCITIRANIH MOLEKUL VODIKA

Iztok Čadež*, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, Ljubljana

DETERMINATION OF RELATIVE CONCENTRATION OF EXCITED HYDROGEN MOLECULES

ABSTRACT

The method for determination of the vibrational excitation of hydrogen molecules is described. The method is based on the detection of H⁺ ions, formed by the dissociative attachment of low energy electrons (between 0 and 4.5 eV). The method allows the detection of vibrational states of H₂ molecule up to v=9 (up to v=10 for HD and up to v=13 for D₂).

POVZETEK

Opisana je metoda za določanje vibracijske ekscitacije molekul vodika. Temelji na detekciji H⁺ ionov iz procesa disociativnega zajetja elektronov z majhno energijo (med 0 in 4,5 eV). Metoda omogoča detekcijo vibracijskih stanj H₂ molekule do v=9 (do v=10 za HD oz. v=13 za D₂).

1 UVOD

Vpliv atomske fizike na druga področja fizike, druge naravoslovne vede kot tudi na različne tehnološke dejavnosti, je velik. Posebno je očiten pri razvoju novih instrumentalnih metod, ki slonijo na specifičnih lastnostih posameznih atomskih delcev. Takšnih primerov je veliko, omenimo naj samo uporabo specifičnih lastnosti atomov ali molekul pri razvoju laserjev, plazemskih tehnologij, ki se uporabljajo pri razvoju novih materialov, ter razvoj novih metod za določanje minimalnih sledi specifičnih snovi v različnih vzorcih. Sistematično raziskovanje posameznih lastnosti atomov in molekul je v bistvu izredno donosna dejavnost, saj poleg tega, da pogloblja razumevanje fundamentalnih lastnosti materije in osnovnih zakonitosti, ki v mikrosvetu obstajajo, tudi bistveno vpliva na razvoj drugih fundamentalnih znanosti (druga področja fizike, npr. astrofizike, kemije, biologije), tehnologije, medicine in tako prispeva k izboljšanju kakovosti vsakdanjega življenja.

O enem primeru razvoja nove merilne metode, ki sloni na poznavanju detajlov atomskih procesov, bo govora v tem prispevku. Poznavanje specifičnih lastnosti disociativnega zajetja elektronov majhne energije na molekule vodika smo uporabili za razvoj popolnoma nove metode za določanje stanj rotacijsko-vibracijske ekscitacije teh molekul. Zanimivo je, da je, zaradi simetrije molekule, življenjska doba različnih vibracijsko in rotacijsko ekscitiranih stanj popolnoma proste molekule vodika izredno velika, od okoli 24 dni pa do več let (najnižja rotacijska stanja).

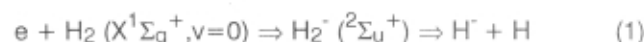
Velik je temeljni pomen vibracijsko in rotacijsko ekscitiranih vodikovih molekul, tako v naravi kot tudi pri različnih raziskavah tehnološkega pomena. Naj samo omenimo pomen za astrofiziko /1/, za intenzivne volumske izvire H⁺ ionov /2/ in za procese na površinah /3/. Rekombinacija atomov vodika na površinah je naj-

bolj elementaren katalitični proces, zato je zelo pomembno poznavanje lastnosti molekul, ki se pri tem tvorijo /4/. Poleg metode, opisane v tem prispevku, obstajajo tudi laserske metode, ki omogočajo detektiranje ro-vibracijskih nivojev vodikovih molekul /5/. Te metode so praviloma dražje, omogočajo zadostno občutljivost zaznavanja nižjih ekscitiranih nivojev, so pa hitre in imajo odlično ločljivost.

Z metodo, o kateri govorimo, smo prvič zaznali izredno veliko vibracijsko ekscitacijo molekul vodika, ki se tvorijo z rekombinacijo na površinah volframa in tantala /6/, in s tem pričeli bolj detajlno analizo tega procesa. Metodo smo uporabili za analizo vibracijske ekscitacije molekul vodika, nastalih pri rekombinaciji na površinah 12 različnih kovin /7/, kot tudi na površini amorfne ogljika /8/. Eksperimentalno metodo smo razvili v Laboratoire de Dynamique Moleculaire et Atomique, Université Pierre et Marie Curie, Paris, odgovarjajočo numerično zasnovano analizo eksperimentalnih spektrov pa na Institutu za fiziko v Beogradu.

2 EKSPERIMENTALNA METODA

Metoda za detekcijo vibracijsko ekscitiranih molekul vodika je že detajlno opisana /9/. Metoda sloni na lastnostih disociativnega zajetja elektronov na molekulo vodika v področju njenega najnižjega resonančnega stanja:



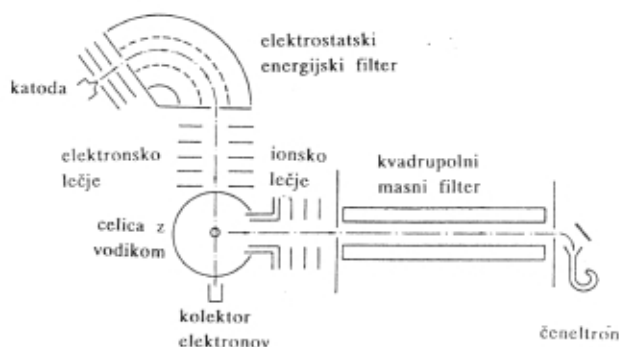
Disociativno zajetje je resonančni proces (dogaja se samo v ozkem intervalu energije vpadnega elektrona). Pri resonančnih procesih prihaja, v prvem koraku, do začasnega zajetja elektrona oziroma formiranja nestabilnega negativnega iona. Obstojnost tako formiranih negativnih ionov je različna za različne molekule in je lahko od približno 10⁻¹¹s pri O₂, 10⁻¹⁴s pri N₂ in 10⁻¹⁶s za proces (1) v H₂. Vedno prisoten način razpada takega nestabilnega iona je izpuščanje zajetega elektrona, to se pravi inverzni proces zajetja. Pri tem procesu, imenujemo ga resonančno sipanje elektrona, praviloma prihaja do bolj ali manj pomembnega vibracijskega ekscitiranja nevtralne molekule. V primeru, ko imajo neki atomi, ki tvorijo molekulo, pozitivno elektronsko afiniteto, je mogoč tudi razpad nestabilnega negativnega iona z disociacijo na nevtralni del in stabilni negativni ion. Ta, drugi kanal resonančnega procesa imenujemo disociativno zajetje.

Presek v maksimumu za disociativno zajetje (1) elektrona na molekulo H₂ je zelo majhen, 1,8x10⁻²¹cm²/10/. Proces ima prag pri 3,71 eV, presek pa je zaradi specifičnih lastnosti molekularnih potencialov ustreznih stanj končen, takoj nad pragom - vertikalni porast. Stabilni negativni ioni vodika, ki s tem procesom nastanejo, imajo energijo E_{H-} = 0,5(E_{eI} - 3,71 eV), kar pomeni, da je energija v bližini praga zelo majhna. Zelo

* stalni naslov: Institut za fiziko, Pregrevica 118, 11080 Zemun

pomembna lastnost tega najnižjega procesa disociativnega zajetja je, da ustrezeni preseki izredno hitro naraščajo, če je molekula vibracijsko ali rotacijsko ekscitirana - v začetku za več kot en velikostni red za vsako naslednje višje vibracijsko stanje /11/. Tako doseže preseki za disociativno zajetje na molekulo v vibracijskem stanju $v=5$ vrednost okoli 10^{-16}cm^2 ! Prag za disociativno zajetje na molekulo, ki ima energijo ro-vibracijske ekscitacije E_{ex} , je ravno za velikost te energije nižji od praga za primer $v=0$ oziroma se prag nahaja na $3,71 \cdot E_{\text{ex}}$, če energijo izrazimo v eV. Posebnosti disociativnega zajetja na vodik, so razlog, da je ta proces ugoden za diagnostiko vibracijske (in tudi rotacijske) ekscitacije te molekule. Ta ugodna naključja so: 1) relativno velika razdalja med vibracijskimi nivoji v vodik (okoli 0,5 eV za nižje nivoje) in s tem razmaknjeni pragovi za zajetje, 2) nastali ioni imajo majhno energijo pri pragu in 3) preseki so izredno veliki za molekule v višjih ekscitiranih stanjih.

Da bi opisane lastnosti disociativnega zajetja elektrona na molekule vodika uporabili kot diagnostično metodo, smo postavili eksperimentalno aparaturo, ki je shematsko prikazana na sliki 1.



Slika 1. Shematska predstavitev eksperimenta za določanje vibracijske ekscitacije molekul vodika

Elektroni, ki jih s termično emisijo sprošča katoda, tvorijo začetni elektronski curek, ki nato preide skozi elektrostatski energijski filter (127-stopinjski cilindrični, odklonski). S tem se zmanjša širina energijske porazdelitve prepuščenih elektronov na, značilno, okoli 60 meV. Te elektrone nato z ustreznim lečjem pospešimo ali zavremo do končne želene energije. Tako formirani curek elektronov seka pod pravim kotom curek vodika, ki ga želimo analizirati, in ga nato ujamo v kolektorju elektronov. Značilni tok elektronskega curka je okoli 20 nA. Vodik, ki ga analiziramo, prihaja iz celice, ki je bila opisana v prejšnjem prispevku /12/ (slika 4 v /12/). V njej prihaja do nastanka ro-vibracijsko ekscitiranih molekul vodika ob rekombinaciji atomov vodika na kovinskih stenah. Razni procesi v sami celici (rekombinacija na površini, prenos vibracijske energije molekul pri trkih s stenami ali z drugimi molekulami) so najbolj zanimivi in je njihovo raziskovanje tudi cilj našega eksperimenta. Bolj detajlni opis teh procesov in stanje njihovega trenutnega poznavanja bo objavljeno v prihodnjem prispevku v Vakuumistu.

Navpično na smer elektronskega curka in curka plina iz celice postavimo sistem za detekcijo nastalih H^+ ionov, ki ga sestavljajo:

- i) ionsko lečje, ki nam omogoči učinkovito zbiranje nastalih H^+ ionov z majhno energijo in oblikovanje ustreznega ionskega curka
- ii) kvadrupolni masni filter, ki je nastavljen tako da loči H^+ ione od elektronov in eventualno drugih negativnih ionov, in
- iii) čeneltrona, ki detektira posamezne ione. Čeneltron je postavljen zunaj osi, da bi fotoni ter metastabilni atomi in molekule čim manj prispevali k signalu ozadja. H^+ ione detektiramo z čeneltronom s standardno tehniko večkanalnega skaliranja.

Metodo, ki jo opisujemo, lahko uporabimo le v vakuumu (do okoli 10^{-5} mbar) zaradi nemotenega transporta elektronskega in ionskega curka in tudi zaradi ustreznih razmer za uporabo čeneltrona. Vakuumsko komora in črpalni sistem omogočata čisto delo z osnovnim vakuumom okoli 10^{-8} mbar.

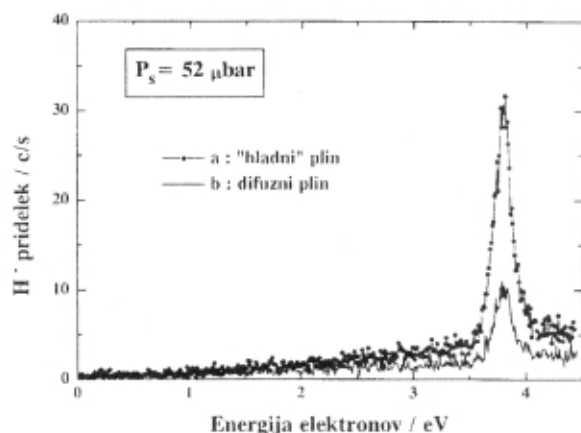
Populacijo vibracijske ekscitacije vodikovih molekul iz plinskega curka določimo iz spektra, ki ga dobimo, ko zvezno spreminjamo energijo elektronskega curka od okoli 0 eV pa do 4,5 eV. Istočasno s spreminjanjem energije elektronskega curka detektiramo H^+ ione. Na sliki 2 je prikazana odvisnost ionskega signala od energije elektronov za primer, ko je tarča vodik pri normalni, sobni temperaturi. Za energijo curka, manjšo od 3,6 eV, opazimo samo signal ozadja, medtem ko nato signal hitro narašča in dobimo maksimum, ki že nad okoli 4,1 eV ponovno preide v ozadje. Širina vrha signala je odvisna od širine energijske porazdelitve elektronskega curka, selektivnosti vhodne ionske optike na ione "nulte" energije in temperature plina. Vhodno ionsko lečje uporabljamo po načinu, znanem pod imenom "spektroskopijski pragov". Ker v opisanem eksperimentu ne uporabljamo tehnike diferencialnega črpanja, je del signala, ki ga izmerimo na opisani način, posledica trkov z molekulami, ki se nahajajo v preostali atmosferi vodika v celici. Te molekule ne prihajajo direktno iz celice, pač pa so tu zaradi počasnega izčrpanja in karakterizirajo molekule, ki so se velikokrat zaleteli ob stene vakuumske komore, predno so, naključno, prispeli nazaj do interakcijskega prostora. Da bi ocenili prispevek signala, ki je posledica tega, difuznega plina, snemamo posebej tudi H^+ signal, ko z istim pretokom vodika, in s tem pri enakem tlaku v vakuumski komori, vpuščamo plin skozi posebno stransko cev, ne pa skozi celico. V tem primeru imamo v vakuumski komori enakomerno porazdelitev plina in ustrezno manjši signal. Tako izmerjeni signal je za ilustracijo relativnega prispevka k signalu od difuznega plina prikazan na sliki 2 (krivulja b). Za oba spektra, kakor tudi za spekter (a) s slike 3, je bil čas zbiranja signala 10 s na kanal.

Skala za energijo elektronskega curka na sliki 2 in na naslednjih slikah je določena tako, da je vrh $v=0$ signala postavljen na 3,8 eV. Zaradi kontaktne razlike potencialov različnih materialov in drugih vzrokov pa obstaja pri eksperimentih z elektronskimi curki majhnih energij vedno razlika (tudi do nekaj sto meV) med eksperimentalno (določeno z razliko napetosti med katodo in prostorom interakcije) in pravo energijo elektronov. Precizno kalibracijo je možno narediti z natančnim merjenjem praga za disociativno zajetje (1)

ali pa, recimo, s pragom za proces formiranja ionskega para:

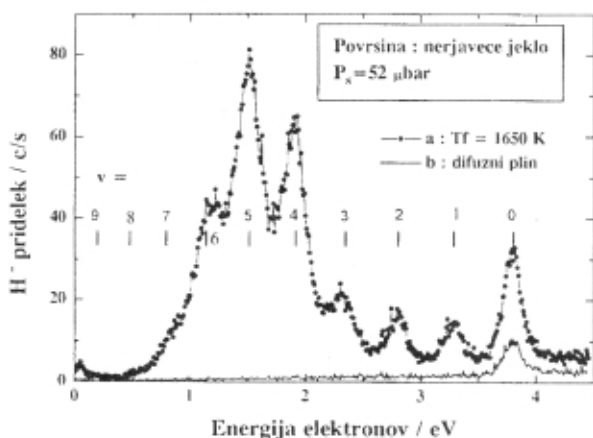


ki se nahaja pri nekoliko višji energiji (17,34 eV).



Slika 2. Odvisnost pridelka H^- ionov od energije elektronov: a) molekule iz celice niso vibracijsko ekscitirane - hladen plin; b) prispevek signalu od plina ozadja

Ko imamo v plinskem curku, ki prihaja iz celice, tudi molekule vodika, ki so vibracijsko ekscitirane, prihaja do disociativnega zajetja že pri nižji energiji elektronov in s tem tudi do spremembe H^- spektra glede na spekter na sliki 2. Primer spektra H^- ionov, dobljenega z vzorcem vodika, ki vsebuje tudi visoko ekscitirane molekule, je prikazan na sliki 3. V tem primeru vidimo niz vrhov v signalu pri energiji elektronskega curka, ki je nižja od tiste, na kateri se pojavi signal za molekule z $v=0$. Razlika energij vrha, ki odgovarja $v=0$, in nekega drugega vrha iz spektra je ravno enaka energiji ekscitacije molekul, iz katerih prihajajo ioni na tem



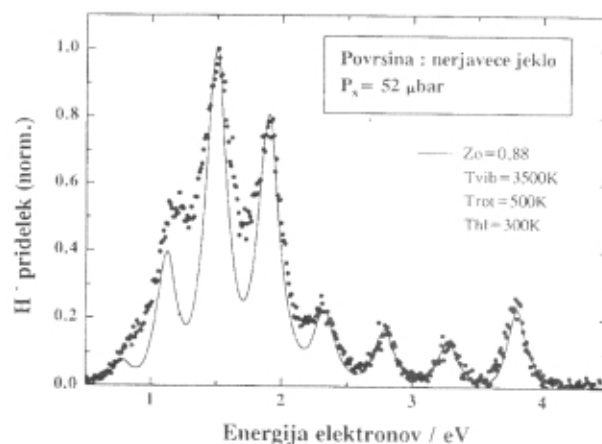
Slika 3. Odvisnost pridelka H^- ionov od energije elektronov: a) molekule iz celice so vibracijsko ekscitirane, s T_f označimo temperaturo volframske nitke za disociacijo; b) prispevek k signalu od plina ozadja - isto kot b na sliki 2

mestu. Tako je izmerjeni spekter v bistvu spekter ekscitacije vodikovih molekul v plinskem curku. Na sliki so z navpičnimi črtami predstavljeni položaji, ki odgovarjajo vrhovom za $v=0$ do 9. Prikazani spekter (a) s slike 3 je dobljen pri tlaku vodika v celici, $P_s=52 \mu\text{bar}$, ko na stene celice ni bilo naparjene druge kovine. To se pravi, da je ta spekter značilen za nerjaveče jeklo, iz katerega je celica narejena.

Pri obdelavi eksperimentalnih spektrov moramo najprej od signala odšteti prispevek difuznega plina in nato še približno linearno ozadje. Iz takega eksperimentalnega spektra dobimo relativno populacijo molekul v posameznih vibracijskih stanjih, če upoštevamo omejeno odvisnost presekov za disociativno zajetje od začetne ekscitacije molekul. Za to smo razvili posebni postopek dekonvolucije.

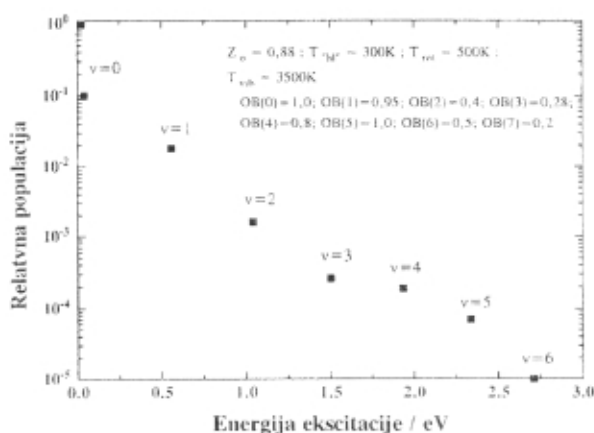
Z uporabo teorije lokalnega kompleksnega potenciala smo /9/ izračunali preseke za disociativno zajetje elektronov za vsa dosegljiva vibracijska stanja (do $v=9$ za H_2 , do $v=10$ za HD in do $v=13$ za D_2) za tri izotope molekule vodika (metoda, ki jo opisujemo, je uporabna za vse te izotope). Izračunali smo preseke za prvih 15 rotacijskih stanj vsakega od omenjenih vibracijskih stanj (razen za najvišja, kjer je bila omejitev zgornja meja celotne ro-vibracijske energije). Če z eksperimentalnim profilom črt konvoluiramo produkte populacij in izračunanih presekov, ki jih postavimo na ustrezne energije, dobimo izračunan spekter, podoben eksperimentalnemu. Eksperimentalni profil črt dobimo iz spektra za hladni plin. Poskusne populacije spreminjamo, dokler ne dobimo zadovoljivo ujemanje izračunanega in eksperimentalnega spektra. Pri iskanju populacij vedno začnemo z Boltzmannovo porazdelitvijo za vibracijske (vibracijska temperatura T_v) in rotacijske (temperatura T_R) nivoje. Da bi dobili končno ujemanje izračunanega in eksperimentalnega spektra, prilagodimo posamezne intenzitete vibracijskih vrhov. Zaradi omejene ločljivosti spektrov ponavadi ni mogoče bolj detajlno opisati populacijo rotacijskih nivojev.

Na sliki 4 je prikazan primer analize eksperimentalnega spektra (a) s slike 3. Uporabljeni so bili naslednji parametri: $Z_0=0,88$ (kar pomeni, da je 88% prispevka v $v=0$ vrhu posledica molekul, ki niso nastale z rekombinacijo na površini), $T_{HI}=300$ K (temperatura teh, "hladnih" molekul), $T_{vib}=3500$ K (začetna približna vibracijska temperatura) in $T_{rot}=500$ K (rotacijska temperatura,



Slika 4. Eksperimentalni in izračunani spekter pridelka H^- ionov za značilen zgled - spekter a s slike 3

predpostavljeno enaka za vsa vibracijska stanja). Intenzitete posameznih vrhov so glede na Boltzmannovo, ki bi ustrezala temperaturi $T_{\text{vib}}=3500$ K, individualno korigirane z množenjem z naslednjimi faktorji: 1,0 (za $v=0$), 0,95 (za $v=1$), 0,4 (2), 0,28 (3), 0,8 (4), 1,0 (5), 0,5 (6), 0,2 (7). Primerjava izračunanega in eksperimentalnega spektra je zadovoljiva, čeprav oblike vrhov kažejo, da obstajajo neujemanja, ki so posledica različne rotacijske populacije molekul za različna vibracijska stanja. V izračunanem spektru je predpostavljena stalna rotacijska temperatura $T_R = 500$ K za celotni spekter. Zaradi omejene ločljivosti metode, vpliva rotacijska temperatura v glavnem na širino vrhov za posamezne vibracijske nivoje. Kot posebne vrhove ali bolj močne perturbacije oblik vibracijskih vrhov lahko zaznamo le višje (ponavadi $J=5$ in 7) rotacijske nivoje. S slike 2 je razvidno, da se pri rotacijski temperaturi 500 K ustrezno reproducirata le prva dva vibracijska vrhova ($v=1$ in $v=2$), da so pa vrhovi za višje vibracijske nivoje širši kar je posledica drugačne, višje, rotacijske temperature.



Slika 5. Porazdelitev populacij vibracijskih nivojev za spekter, prikazan na sliki 4 v odvisnosti od energije vibracijske ekscitacije

Končni rezultat analize eksperimentalnega spektra, ki je vključen v izračunanega s slike 4, je porazdelitev populacij vibracijskih nivojev, kar je za isti primer prikazano na sliki 5. Na tej sliki je prikazana relativna populacija nivojev glede na $v=0$ in v odvisnosti od energije vibracijske ekscitacije. Ugotavljamo, da prikazana porazdelitev odstopa od Boltzmannove, ki bi bila premica z naklonom, karakterističnim za T_v .

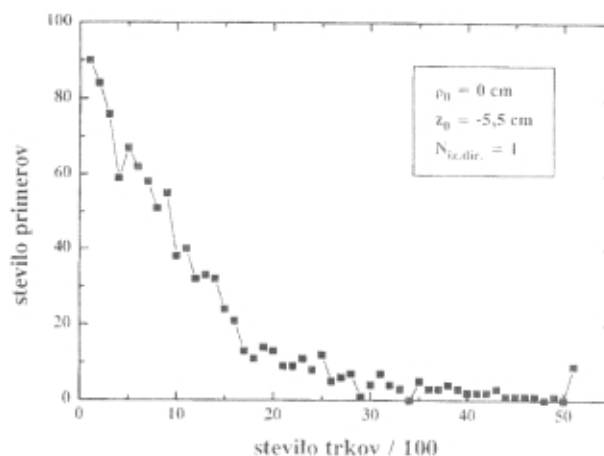
3 FORMIRANJE VIBRACIJSKO EKSCITIRANIH MOLEKUL

Tu bomo samo na kratko omenili način, kako pripravimo vodik z visoko vibracijsko ekscitacijo v celici. Kot je opisano v [12], imamo v celici, skozi katero prepuščamo vodik, vročo volframsko nitko, s katero povzročimo disociacijo molekul. Nastali atomi vodika se lahko pri trku ob kovinske stene celice adsorbirajo ali pa lahko pride do njihove rekombinacije z atomi, ki se na steni že nahajajo. Ta, drugi proces



je rekombinativna desorpcija, ki pripelje do vibracijske ekscitacije, ki je v naših eksperimentih opazimo. Reakcija (3) je dejansko najbolj elementarna kataliza in je zaradi tega njeno raziskovanje temeljnega pomena. V eksperimentih z opisanim sistemom lahko menjamo lastnosti površin z napajanjem različnih kovin, lahko spreminjamo tlak v celici in temperaturo njenih sten v območju od okoli 400 K pa do okoli 90 K.

V celici, v kateri z reakcijo (3) tvorimo vibracijsko ekscitirane molekule vodika, se dogajajo še drugi procesi, kar pripelje do tega, da interpretacija naših eksperimentalnih spektrov ni enostavna. Molekula ima nato, ko je formirana z reakcijo (3), majhno verjetnost, da direktno, brez trkov s steno, pride iz celice v prostor, kjer se sekata plinski in elektronski curek. Zaradi geometrijskih parametrov celice je ta verjetnost le okoli 0,1%. Na sliki 6 je pokazana porazdelitev števila trkov ob notranjo steno celice od trenutka nastanka pa do tedaj, ko molekula prileti skozi izhodno odprtino v območje interakcije oziroma v vakuumsko komoro. Porazdelitev s slike 6 je dobljena z računalniško simulacijo statističnega gibanja molekule v celici, brez upoštevanja medsebojnih trkov molekul. Predpostavljena je realna oblika in dimenzije celice: valj premera 37 mm in višine 55 mm s centralno izhodno odprtino premera 4 mm v sredi zgornje ploskve valja.



Slika 6. Porazdelitev števila trkov molekule na stenah celice po njenem nastanku z rekombinacijo na površini. Za prikazani primer vse molekule začnejo svojo pot v sredi dna celice. Računalniško je simuliranih 1000 naključnih primerov.

V splošnem se molekula po nastanku z rekombinacijo zaleti večkrat ob stene celice, predno prileti iz nje. Pri tem prihaja do spremembe njenega ro-vibracijskega stanja. V curku vodika, ki prihajajo iz celice, imamo torej neko "mešanico" molekul, ki so preživele različne nize dogodkov: i) molekule, ki so nastale z rekombinacijo in se nato večkrat zaletale ob stene celice, ii) molekule, ki so udarile ali nastale na vroči volframski nitki in nato po trkih z stenami celice priletele v interakcijski prostor ter iii) molekule, ki so po nekem številu trkov s stenami celice brez kakršne koli spremembe prišle v interakcijski prostor. Molekula doživi povprečno okoli 680 trkov,

preden prispe v prostor interakcije. Dejstvo, da v eksperimentih zaznamo veliko vibracijsko ekscitacijo, priča, da je vibracijska relaksacija pri trkih s površinami šibka.

V tej diskusiji smo zanemarili trke med samimi molekulami ter med molekulami in atomi v sami celici, kar je upravičeno glede na relativno nizek tlak v celici - največ do okoli 70 μbar . Ker je srednja prosta pot za vodik $\lambda(\text{cm}) = 12/P_s(\mu\text{bar})$, imamo v našem primeru še vedno pomembno število tudi med-molekulskih trkov. Vseeno je njihov vpliv na eksperimentalne spektre majhen zaradi zelo majhne verjetnosti vibracijsko-vibracijskega (V-V), vibracijsko-rotacijskega (V-R) in vibracijsko-translatornega (V-T) prenosa energije pri posamičnem trku. Zanemarljivost vpliva volumnih trkov dokažemo iz nespremenjene oblike spektrov, ko spreminjamo tlak v celici pri posameznih eksperimentih. Spremembe tlaka v celici v območju med okoli 5 μbar in 70 μbar pripeljejo samo do proporcionalne spremembe intenzitete signala ne pa tudi do spremembe oblike spektra. Bolj verjetni so V-T prenosi pri trkih molekul z atomi vodika, toda v našem primeru je stopnja disocijacije vedno majhna, značilno okoli 1%.

Iz povedanega je razvidno, da je za točno interpretacijo rezultatov eksperimenta potrebna ustrezna statistična analiza. Vendar tudi brez take detajlne analize lahko sklepamo na določene lastnosti procesov.

4 REZULTATI

Z opisano metodo smo analizirali vpliv sestave sten v celici na vibracijsko ekscitacijo molekul, ki iz celice izhajajo. Na stene smo naparili tanke plasti, značilno okoli 0.1 μm , raznih kovin in opazili pomembne spremembe spektrov. Raziskali smo vpliv Al, Ag, Au, C, Cu, Fe, Mo, Nb, Ni, Pd, Pt, Re, Ta, Ti, W in nerjavečega jekla (meritev z čisto celico brez naporevanja). Ugotovljene so bile bistveno različne porazdelitve ro-vibracijskih stanj vodika za različne kovine in ti vplivi so zelo reproducibilni. V nekaterih primerih praktično nismo zaznali vibracijske ekscitacije ali pa je le-ta bila zelo šibka (srebro, renij, sveže naparjena površina zlata), pri nekaterih smo zaznali bolj ali manj izrazito ekscitacijo samo prvih treh ali štirih nivojev (platina, baker, stabilna plast zlata), pri nekaterih pa izrazito ekscitacijo do najvišjih nivojev (volfram, nerjaveče jeklo, molibden, tantal in še posebno aluminij in niobij). Posamezni primeri imajo svoje, zelo zanimive karakteristike. Tako, recimo, pri niobiju zaznamo poleg zelo velike vibracijske ekscitacije tudi zelo široke vrhove, kar pomeni, da je tudi rotacijska energija zelo visoka (okoli 2000 K). Pri tantalu je nasprotno: čeprav opazimo zelo visoko vibracijsko ekscitacijo, imamo najnižjo rotacijsko, samo okoli 600 K za visoke vibracijske nivoje in manj za nižje. Pri bakru imamo posebnost, da zaznamo veliko rotacijsko ekscitacijo, čeprav so ekscitirani le samo prvi trije vibracijski nivoji.

Po relativno površnem eksperimentalnem "obisku" mnogih vrst površin sledi detajlna analiza posameznih

primerov, ki so pokazali določene zanimive posebnosti. Prvo od teh raziskav smo pred kratkim naredili z zlatom. Dobro poznavanje mehanizmov za vzbujanje in gasitev vibracijske ekscitacije molekul vodika bo verjetno imelo pomembne, tudi praktično uporabne posledice.

5 SKLEP

V prispevku smo se omejili na opis metode za detektiranje ro-vibracijskih ekscitacij molekul vodika. Skupaj z metodo za določanje relativne stopnje disocijacije, ki je bila opisana v /12/, pa opisani eksperimentalni sistem predstavlja močno orodje za diagnostiko vodika, ki bi ga lahko uporabili tudi za dopolnilno diagnostiko plazme, v kateri je vodik prisoten primarno ali pa kot produkt reakcij. Eksperimente lahko nadalje razvijamo z dveh vidikov: da omogočimo meritev hitrosti molekul, ki iz celice prihajajo, in da z uporabo diferencialnega črpanja, omogočimo "čisti" eksperiment. To se pravi, da bi molekule, ki jih detektiramo, prihajale direktno v območje interakcije z elektronskim curkom brez trkov s površinami sten.

V prihodnjem prispevku bomo obravnavali proces rekombinativne desorpcije vodika in sedanje stanje poznavanja tega procesa.

LITERATURA

- /1/ W.W. Duley and D.A. Williams, *Interstellar Chemistry*, Academic Press, London, 1984
- /2/ M. Bacal and D.A. Skinner, *Comments At. Mol. Phys.*, 23 (1990) 283
- /3/ C.T. Rettner and M.N.R. Ashfold, *Dynamics of Gas-Surface Interactions*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1991
- /4/ K. Christmann, *Introduction to Surface Physical Chemistry*, Springer, 1991; tudi: K.Christmann, *Surf. Sci. Rep.*, 9 (1988) 1
- /5/ I. Čadež, R.I. Hall, M. Landau, F. Pichou, D. Popović and C. Schermann, 14th International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG-88), Sarajevo, August 15-19, 1988. Progress Report, Eds. N.Konjević, L.Tanović and N.Tanović, Nova Science Publishers, Commack, NewYork, 1989, 93
- /6/ R.I. Hall, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou and C. Schermann, *Phys. Rev. Lett.*, 60 (1988) 337
- /7/ I. Čadež, C. Schermann, M. Landau, F. Pichou, D. Popović, and R.I. Hall, *Z. Phys. D: At. Mol. Clusters*, 26 (1993) 328 in: Schermann C., Pichou F., Landau M., Čadež I. and R.I. Hall, *J. Chem. Phys.*, 101 (1994) 8152
- /8/ S. Gough, C. Schermann, F. Pichou, M. Landau, I. Čadež and R.I. Hall, *Ap. J.*, 1995, v tisku; tudi: C. Schermann, S.F. Gough, F. Pichou, M. Landau, R.I. Hall and I. Čadež, *Physical Chemistry of Molecules and Grains in Space*, 50th international meeting, 6-10 Septembre 1993, Mont Sainte - Odile, France; AIP Conference Proceedings No: 312: Molecules and Grains in Space, Ed. Irene Nenner, 1994, 801-9
- /9/ D. Popović, I. Čadež, M. Landau, F. Pichou, C. Schermann and R.I. Hall, *Meas. Sci. Technol.*, 1 (1990) 1041
- /10/ G.J. Schulz and R.K. Asundi, *Phys. Rev.*, 158 (1967) 25-9
- /11/ M. Allan and S.F. Wong, *Phys. Rev. Lett.*, 41 (1978) 1791-4
- /12/ I. Čadež, *Vakuumist*, 13/3 (1993) 16

OBVESTILO

Naročnike *Vakuumista* prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 1996. Cena štirih številčk, kolikor jih bo izšlo v letu, je 1000,00 tolarjev.