

ICONISMUS XI



VAKUUMIST

ČASOPIS ZA VAKUUMSKO ZNANOST, TEHNIKO IN TEHNOLOGIJE, VAKUUMSKO
METALURGIJO, TANKE PLASTI, POVRŠINE IN FIZIKO PLAZME



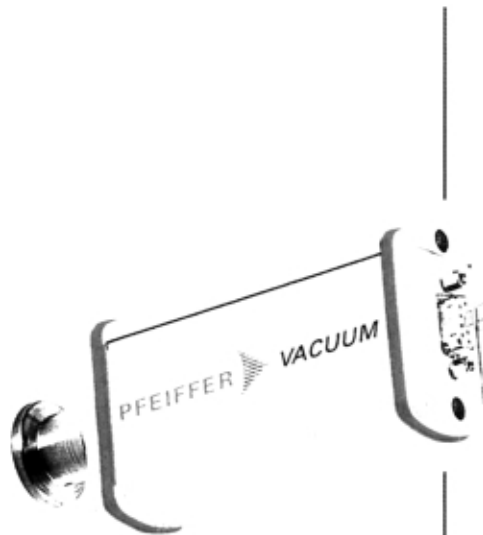
LJUBLJANA, DECEMBER 2001

ISSN 0351-9716

LETNIK 21, ŠT. 4 2001

UDK 533.5.62:539.2:669-982

Vacuum is nothing,



Advanced digital total
pressure gauges for the
entire vacuum range

DigiLine

- ▶ Digital signals – reliable data transmission
- ▶ No signal conversions required
- ▶ Simple calibration
- ▶ Low cost cabling

The modular pumping station
will fit your application

TurboCube

- ▶ Easy adaptation to your vacuum process
- ▶ No additional control necessary
- ▶ Integration in Profibus control



PFEIFFER VACUUM

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Phone +43 (0) 1 8941 704 · Fax +43 (0) 1 8941 707 · office@pfeiffer-vacuum.at · www.pfeiffer-vacuum.at

SCAN d.o.o. Slovenija

Phone +386 (0) 4-27 50 200 Fax +386 (0) 4-27 50 540 · scan@siol.net · www.scan.si

VSEBINA

- Študij interakcije med vodikom in titanom z jedrsko spektroskopsko metodo ERDA (I. del) (B. Zorko, M. Budnar, H.D. Carstanjen, I. Čadež, M. Žitnik)

- Avtomatski varilski filter (A. Demšar, B. Marin, M. Pesek)

- Meritve nekaterih lastnosti večkrat nabitih ionov, ki so pomembne za astrofiziko (I. Čadež)

- Vakuum in plazma v zemeljski atmosferi (M. Čekada)

- Zgodovina raziskovanja tekočih kristalov (S. Južnič)

- NASVETI: Uporaba impedančne spektroskopije za študij električnih lastnosti tankih plasti (D. Kek)

- DRUŠTVENE NOVICE

Obvestilo

Naročnike Vakuumista prosimo, da čim prej poravnate naročnino za leto 2001.

Cena štirih števil, kolikor jih bo izšlo v letu, je 3000,00 tolarjev.

SPONZORJI VAKUUMISTA:

- **Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Urad za znanost**
- **Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport, Urad za šolstvo**
- **PFEIFFER Vacuum Austria GmbH**

- VAKUUMIST
- Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije
- Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan
- Uredniški odbor: mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Stanislav Južnič, dr. Janez Kovač, dr. Ingrid Milošev, dr. Miran Mozetič, dr. Vinko Nemanič, mag. Miha Čekada, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, mag. Janez Šetina in dr. Anton Zalar
- Lektor: dr. Jože Gasperič
- Korektor: mag. Miha Čekada
- Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 1000 Ljubljana, tel. (01) 477 66 00
- Elektronska pošta: DVTS.group@guest.arnes.si
- Domača stran DVTS: <http://www2.arnes.si/guest/ljdvts/index.htm>
- Številka žiro računa: Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, 50101-678-52240
- Oblikovanje naslovne strani: Ignac Kofol
- Grafična obdelava teksta: Jana Strušnik
- Tisk: Littera picta, d.o.o., Rožna dolina, c. IV/32-36, 1000 Ljubljana
- Naklada: 400 izvodov

Študij interakcije med vodikom in titanom z jedrsko spektroskopsko metodo ERDA (I. del)

Benjamin Zorko¹, Miloš Budnar¹, Heinz Dieter Carstanjen², Iztok Čadež¹, Matjaž Žitnik¹

¹Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

²Max-Planck-Institut, Heisenbergstrasse 1, D-70569 Stuttgart, Nemčija

Study of interaction between hydrogen and titanium by means of ERDA method (Part I)

ABSTRACT

For studying the system of hydrogen and titanium the ion beam analytical method ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) was used. The time evolution of hydrogen depth profiles in thick titanium samples were measured. The samples were etched in a solution of different acids and annealed in a vacuum chamber at 600 °C. Afterwards the samples were heated up to a certain temperature from 20 °C to 400 °C and exposed to the hydrogen molecules for 2000 seconds. The pressure in the vacuum chamber was changed from 10^{-6} mbar to 10 mbar. The escape of the hydrogen atoms from the samples was monitored at 380 °C for several hours. From results of the measurements with ERDA method the diffusion coefficient of hydrogen in cleaned titanium in the order of 10^{-12} cm²s⁻¹ was determined by suitable modeling. This value is many orders smaller than the value of the diffusion coefficient of hydrogen in pure titanium. The difference between the values show up that a thin layer of carbon and oxygen adsorbed on the surface of the sample slow down the mobility of hydrogen atoms in the sub-surface region. The amount of oxygen and carbon atoms in the sample were determined by means of the NRA (Nuclear Reaction Analysis) method.

POVZETEK

Za študij interakcije med vodikom in titanom je bila uporabljena jedrska spektroskopska metoda ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). Izmerili smo časovno odvisnost globinske porazdelitve koncentracije vodika v vzorcih, ki so bili kemijsko očiščeni in pregreti v vakuumu pri temperaturi 600 °C. Vzorci očiščenega titana so bili najprej segreti na izbrano temperaturo med 20 ° in 400 °C, nato pa okrog 2000 sekund v stiku z molekulami vodika. Tlak vodika v komori smo spreminjali od 10^{-6} mbar do 10 mbar. Na koncu priprave smo vzorec segreti na temperaturo 380 °C, pri kateri smo potem več ur spremljali zmanjševanje koncentracije vodika v njem. Iz rezultatov meritev z metodo ERDA smo izračunali, da je difuzijski koeficient vodika v očiščenem titanu reda velikosti 10^{-12} cm² s⁻¹, kar je za nekaj redov velikosti manj, kot je značilna vrednost difuzijskega koeficienta za vodik v čistem titanu. Opaženo razliko je mogoče razložiti s predpostavko, da je difuzija atomov vodika na površini očiščenega titana počasna zaradi adsorbiranih atomov kisika in ogljika na površini. Prisotnost teh nečistoč v vzorcu smo potrdili z meritvami z metodo NRA (Nuclear Reaction Analysis).

1 Uvod

Za doseganje in vzdrževanje ultravisokega vakuumu (UVV) se največ uporabljajo ionsko naprševalne črpalke. Odlikujejo jih nizek končni tlak (pod 10^{-10} mbar), znatna črpalna hitrost (reda 100 l/s za aktivne pline in 10 l/s za žlahtne pline), dolga doba trajanja (več 10000 ur pri tlaku 10^{-6} mbar ali manj), majhna poraba energije (reda 10 W) in izredna zanesljivost delovanja. Ionsko naprševalne črpalke ne uporabljajo nikakršnih pogonskih tekočin ali maziv, zato ustvarjajo zelo čist vakuum. Atmosfera, ki v dobro očiščenem in pregretem vakuumskem sistemu ostane po črpanju z ionsko črpalco, vsebuje le sledove vodika, ogljikovega monoksida, metana, dušika in kisika. Navadno prevladuje vodik, ki v sistem prihaja iz vakuumskih elementov, izdelanih iz nerjavnega jekla. V vakuumsko tesnih sistemih zato z ionsko črpalco črpamo pretežno

vodik. Drugačne so razmere v vakuumskih sistemih, ki niso popolnoma tesni, ali pa v sistemih, kjer je bilo predčrpanje opravljeno nestrokovno. V takih primerih ionska črpalca črpa pretežno kisik in dušik, pa tudi vodno paro in ogljikovodike.

Da bi prispevali k boljšemu razumevanju črpanja vodika z ionsko črpalco, smo se lotili študija interakcije med atomi vodika in titana. Uporabili smo vzorce očiščenega titana. Vzorci so bili jedkani in pregrevani do 600 °C. Z jedkanjem v raztopini kislina HF in HNO₃ je bila s površine titana odstranjena plast oksida. S pregrevanjem pa so površino zapustili radikali in druge sestavine, ki so tam ostale pri jedkanju. Tako pripravljene vzorce pri kontrolirani temperaturi so bili v stiku z molekulami vodika pri različnih tlakih. Z zaporednimi meritvami z metodo ERDA v daljšem časovnem intervalu smo nato opazovali spreminjanje koncentracij vodika v očiščenem titanu.

Vodik močno vpliva na fizikalne, kemijske in mehanske lastnosti kovin. Vplivi so posledica sprememb v elektronski strukturi kovin in faznih prehodov v sistemu vodik-kovina. Zaradi preproste atomske zgradbe, majhne mase in majhne velikosti, je vodik zelo zanimiv s stališča njegove difuzije v snovi. Če vodik vstopi v kovino, lahko pride do nastanka razpok in tvorbe plinskih mehurčkov, zmanjša se plastičnost in poveča krhkost. Kinetika interakcije vodika s kovino in njegov prehod skozi kovinske plasti sta pomembni pri reševanju ekoloških in tehničnih problemov, povezanih s fuzijo, ter pri razvoju raketnih motorjev, kjer bi se kot gorivo uporabljal vodik. Proces prehoda vodika skozi snov lahko razvrstimo v več stopenj, kot so adsorpcija, raztapljanje, difuzija in tvorba hidrida. Vsak izmed teh procesov je lahko kompleksen. Adsorpcijo vodika ob prisotnosti nečistoč na površini kovine lahko spremljajo katalitične reakcije, ki lahko bistveno vplivajo na pretok atomov skozi snov. Če želimo opisati kinetiko prehoda vodika skozi kovino, moramo poznati, kako so karakteristične konstante za posamezni proces vezave vodika na površino odvisne od tlaka, temperature in koncentracije. Pri tem sta značilna podatka tudi difuzijski koeficient in topnost vodika v določeni kovini. Če procesi, kot so adsorpcija, raztapljanje, difuzija in tvorba hidrida, pri prehodu vodika v kovino potekajo zaporedoma, je hitrost prehoda določena z najpočasnejšim izmed teh procesov.

Za določanje kemijske sestave materialov so zelo primerne jedrske spektroskopske metode, ki temeljijo na interakciji pospešenih ionov z atomi v snovi [1]. Nabiti delci se pri prodiranju v vzorec sipajo na atomih, jih odvajajo, predvsem pa iz atomov izbijajo elektrone ali pa jih dvigajo v nezasedena stanja. V sevanjih, ki pri tem nastanejo, se izražajo lastnosti merjenega vzorca, kot so njegova kemijska sestava, koncentracija posameznih elementov, kristalna struktura itd. Metode s pospešenimi ioni omogočajo predvsem študij površin, saj je globina prodora ionov v snov reda veli-

kosti nekaj deset mikrometrov. Pri določanju koncentracij elementov v vzorcih je v uporabi *spektrometrija rentgenskih žarkov, vzbujenih z nabitimi delci* (Particle Induced X-ray Emission, PIXE). Če želimo raziskovati globinske porazdelitve koncentracij kemijskih elementov v vzorcu, si pomagamo s *spektrometrijo odrinjenih jeder* (Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA), *spektrometrijo povratno sipanih izstrelkov* (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS), *spektrometrijo emitiranih delcev* (Nuclear Reaction Analysis, NRA) in *spektrometrijo izsevanih žarkov gama* (Nuclear Resonance Reaction Analysis, NRRA). Kadar je pomembna tudi mikrostruktura vzorca, uporabimo ionski mikrocurek, s katerim lahko opazujemo sestavo vzorca na področju, velikem le nekaj mikrometrov.

2 Analizna metoda ERDA

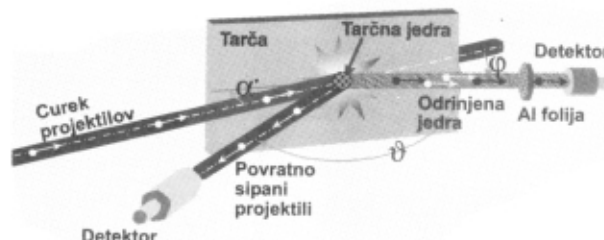
2.1 Osnove metode ERDA

Jedrsko spektroskopska metoda ERDA se je izkazala kot uspešna pri merjenju globinskih porazdelitev koncentracij lahkih elementov, še posebej vodika in njegovih izotopov. Občutljivost metode ERDA za vodik, tj. najmanjše količine vodika, ki jo lahko izmerimo, je pod 0,1 at. % za ione $^4\text{He}^+$ z energijo reda velikosti 1 MeV. Analizirana globina pri metodi ERDA je približno 500 nm za ione $^4\text{He}^+$ z energijo 3 MeV. Globinska ločljivost za vodik na površini tarče do globine 500 nm je od 25 do 50 nm za ione $^4\text{He}^+$ z energijami okrog 1 MeV.

Leta 1976 je J. L'Ecuyer s sodelavci /2/ izmeril globinsko porazdelitev koncentracije vodika in drugih lahkih elementov v vzorcu, pri čemer je tarčo obstreljeval s curkom ionov $^{35}\text{Cl}^{3+}$ s kinetično energijo 35 MeV. Leta 1979 sta B. L. Doyle in A. Peercy za merjenje globinske porazdelitve koncentracije vodika uporabila ione $^4\text{He}^+$ z energijo 2 MeV /3/. V zadnjem času so metodo ERDA še izpopolnili. K temu je prispeval tudi razvoj novih materialov ter potreba po globljem razumevanju njihovih površin. Metodo ERDA smo leta 1995 uspešno vpeljali tudi na Mikroanalitskem centru na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani /4/. Najprej smo izmerili globinsko porazdelitvi koncentracij vodika v polimerni foliji kaptona in amorfnem siliciju, kot projektele pa smo uporabili ione $^4\text{He}^+$ z energijo 1,45 MeV.

Metoda ERDA temelji na prožnem trku med vpadlim projektilom in jedrom v tarči, pri čemer izstrelke izbije tarčno jedro iz vzorca. Shematsko je to prikazano na sliki 1. Z merjenjem izgub kinetičnih energij nabitih delcev v snovi in merjenjem njihovih kinetičnih energij lahko ugotovimo, kje v tarči se je izbrani atom nahajal. Pri tem si pomagamo z znanjem o sipalnem procesu, ki ga opišemo z diferencialnim sipalnim presekom. V prvem približku se zadovoljimo z Rutherfordovim zapisom, ki upošteva, da med nabitima točkastima delcema deluje elektrostatična sila. Za natančnejše račune upoštevamo še vpliv jedrske sile med projektilom in tarčnim jedrom ter senčenje zaradi Coulombskega potenciala. V nekaterih primerih, kot na primer pri sipanju helijevih ionov z energijami nekaj MeV na vodik, pridejo do izraza tudi resonančne jedrske reakcije. Za analizo izmerjenih spektrov je treba poznati tudi razmazanost kinetične energije projektilov in izbitih jeder v snovi ter statistično naravo trkov, pri katerih nabiti delci izbijajo elektrone iz atomov. K energijski razmazanosti delcev po prehodu le-teh skozi snov

največ prispevajo končna energijska ločljivost detektorja, statistični pojavi v snovi, nedoločenost geometrijskih parametrov v eksperimentalni postavitvi in večkratno sipanje nabitih delcev na drugih nabitih delcih.



Slika 1: Odbojna geometrija pri metodi ERDA

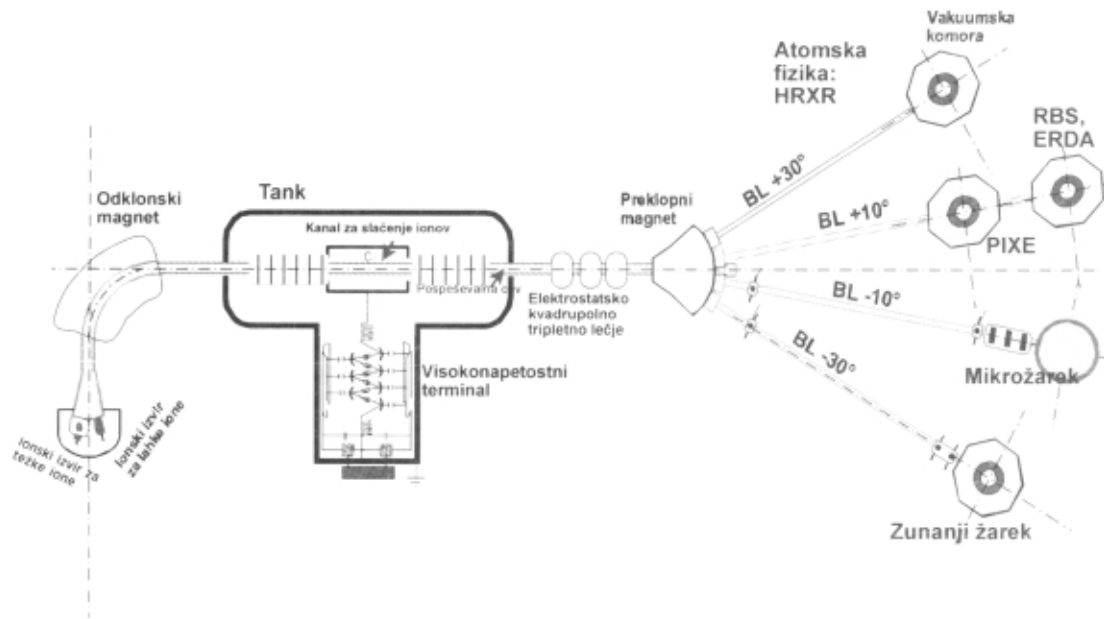
Z metodo ERDA sočasno določimo globinske porazdelitve koncentracij vseh elementov v tarči, ki so lažji od projektila. Kot projektele lahko uporabljamo ione, kot so: He, Li, C, N, O, Si, Ni, Au, z energijami nekaj MeV in gostoto toka nekaj 10 nA/mm^2 . Vpadni kot projektilov glede na normalo na tarčo je med 70° in 85° , če detektiramo odrinjena jedra v odbojni geometriji. Detekcijski kot za odrinjena jedra je med 10° in 40° glede na prvotno smer ionskega curka. Projektili, ki se v tarči sipajo v smeri naprej, izločimo z aluminijevo folijo z debelino nekaj μm (za 3 MeV ione $^4\text{He}^+$ potrebujemo $14 \mu\text{m}$ debelo Al-folijo). Namestimo jo tik pred detektor za odrinjena jedra. Število vpadlih delcev izračunamo iz sočasno merjenega spektra RBS /5/. Za določanje števila vpadlih delcev pa so na razpolago tudi druge rešitve. V laboratoriju na Institutu Max-Planck (MPI) v Stuttgartu, na primer, merijo tok projektilov tako, da štejejo projektele, ki zadevajo lopatice vetrnice, ki se vrtili z določeno frekvenco.

Metoda RBS je komplementarna metodi ERDA. Pri metodi RBS prav tako veljata ohranitev gibalne količine in energije delcev. Razlika je le v tem, da namesto odrinjenih jeder detektiramo povratno sipane projektele. Rezultat meritve so globinske porazdelitve koncentracij elementov, ki so težji od projektila.

2.2 Opis eksperimenta

Za določanje globinske porazdelitve koncentracije vodika v vzorcih titana, ki so bili obogateni z atomi vodika, smo uporabili analizo metodo ERDA. Del meritve je bilo opravljenih v laboratoriju v Mikroanalitskem centru (MiC) na Institutu »Jožef Stefan« (IJS) v Ljubljani, večina pa v laboratoriju na institutu v Stuttgartu (MPI).

Najprej si oglejmo postavitev eksperimenta, s kakršnim razpolagamo na IJS. Merilna oprema je sestavljena iz tandemskega pospeševalnika (sliki 2 in 3), ki rabi kot izvir curka enkrat nabitih ionov s kinetično energijo do 4 MeV, vakuumске komore z goniometrom in detekcijskega sistema, ki je prikazan na sliki 4. Curek vodimo po pospeševalni cevi skozi zaporedje optičnih elementov v vakuumsko celico s spektrometrom, ki je name-

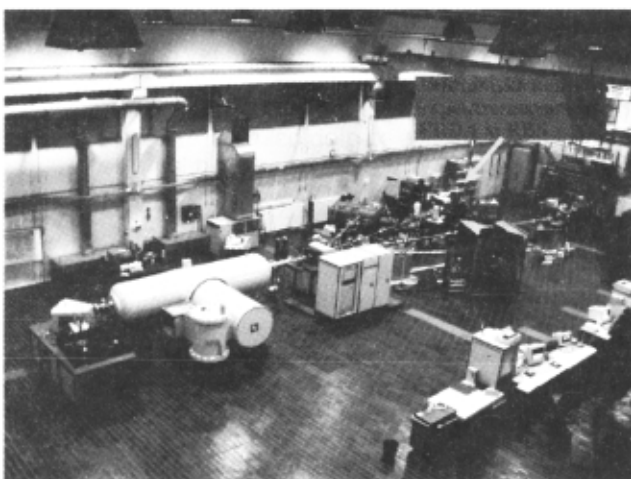


Slika 2: Shematski prikaz tandemskega pospeševalnika z žarkovnimi linijami

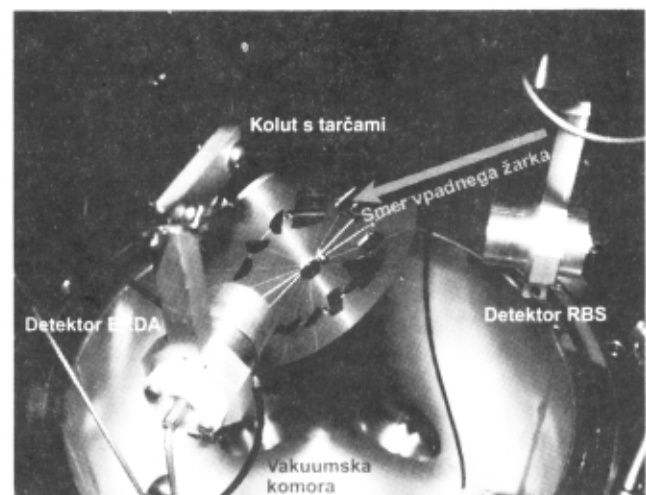
ščen na koncu žarkovne linije, kot je shematsko predstavljeno na sliki 2. Vakuumsko komoro izčrpavamo z vakuumskim sistemom, ki omogoča, da v njej dosežemo tlak do 10^{-7} mbar. Goniometer, ki se nahaja v vakuumski komori, sestoji iz mehanizma za upravljanje tarče in mehanizma za vrtenje detektorjev (slika 4). Kolut s tarčami lahko vrtimo okoli glavne osi tako, da kot med normalo na površino tarče ter smerjo projektila določa vpadni kot α . Kolut pa lahko vrtimo tudi okoli osi, ki je pravokotna na glavno os, kar omogoča zaporedne meritve na različnih tarčah. Za spektrometrijo sipanih projektilov ter odrinjenih jeder imamo na razpolago detektorja (RBS in ERDA), kot je razvidno na sliki 4. Detektorja, ki sta opremljena z zaslonko,

sučemo v izbrani razdalji okoli glavne osi. Meritev toka projektilov je zadovoljiva le pri dobro prevodnih tarčah, s tem da izmerimo naboj, ki se na tarči zbere med meritvijo.

Laboratorij na MPI je opremljen z elektrostatskim pospeševalnikom 6 MV, s katerim lahko pospešujejo različne ione do energij nekaj 10 MeV. Na koncu žarkovne cevi, ki je glede na središčnico zamaknjena za kot 30° , je vakuumska komora s spektrometrom. Sestavljen je iz goniometra, ki omogoča premikanje tarče v smeri koordinatnih osi x, y in z, ter ustreznega detekcijskega sistema. S sukanjem tarče izberemo najbolj prikladen vpadni kot projektilov. Vakuumsko komoro lahko izčrpamo do tlaka, nižjega od 10^{-9} mbar. Za merjenje naboja, ki se med meritvijo zbere na tarči, so zgradili zelo precizen sistem. Takoj za vhodno zaslonko se z izbrano frekvenco vrtil vetrnica, ki je zvezana z merilnikom toka. Na ohišje vetrnice je pritisnjena dodatna napetost -200 V, ki prepreči sekundarnim elektronom, da bi odleteli iz vetrnice.



Slika 3: Slika tandemskega pospeševalnika 2 MV na Institutu »Jožef Stefan« s štirimi žarkovnimi linijami, na katere so priključeni spektrometri za metode PIXE, ERDA in RBS, NRA, mikro-RBS, mikro-ERDA, mikro-PIXE, visokoločljivostno rentgensko spektroskopijo in PIXE z zunanjim žarkom.



Slika 4: Spektrometer za detekcijo odrinjenih in sipanih delcev

2.3 Spekter ERDA

Z opisanim spektrometrom, ki je prikazan na sliki 1, merimo energijske spektre odrinjenih jeder (ERDA) za določeno tarčo v odbojni geometriji, kar je shematsko prikazano na sliki 5. Detekcijska sistema za ERDA in RBS sta polprevodniška detektorja s pripadajočo elektroniko. Nabit delce v plasti detektorja, kjer ni nosilcev naboja, tvori pare elektron-vrzel /6/. Pri tem steče skozi detektor kratkotrajen tok v prevodni smeri. Na izhodu iz detektorja dobimo sunek, katerega višina je sorazmerna s številom nastalih ionskih parov in s tem tudi z energijo, ki jo je snov prejela od nabitih delcev. Sunke zazna nabojno občutljivi predojačevalnik. Analogni signal se ojači in preoblikuje v ojačevalniku tako, da je primeren za nadaljnjo obdelavo v analogno-digitalnem pretvorniku (ADC). Ta višini sunka priredi ustrezno številko kanala in poveča njegovo vsebino za ena. Tako je v izbranem kanalu zapisan podatek o energiji nabitega delca, ki ga je zaznal detektor. Iz spektra ERDA tako odčitamo število sunkov v izbranem energijskem intervalu, ki določa širino kanala Δg. Spekter ERDA pa je dejansko vsota števila sunkov pri izbranih kinetičnih energijah odrinjenih jeder, pomnoženih z ločljivostno funkcijo, ki določa razmazanost kinetične energije delcev v snovi. V spektru so prispevki odrinjenih jeder s kinetičnimi energijami od največje, ki jo imajo delci, ki priletijo v detektor s površine, do najmanjše, ki jo lahko še detektiramo. To energijo imajo delci po prehodu skozi folijo, ki jo preletijo iz določene globine, potem ko jih je vpadni projektil izbil iz tarče.

2.4 Globinska porazdelitev koncentracije določenega elementa v snovi

Oglejmo si, kako iz izmerjenega spektra določimo globinsko porazdelitev koncentracije elementa v snovi. S homogenim curkom ionov z ostro (±0,01 %) določeno kinetično energijo E₀ obstreljujemo tarčo pod kotom α glede na normalo na tarčo. Projektil interagira z jedri in elektroni atomov-sipalcev v snovi. Zaradi velikega števila trkov z elektroni se projektil ustavlja v snovi. V globini x je njegova kinetična energija E₀' = E₀ - S₁ x cosα. Tu je S₁ zavorna sila snovi za projektil. Predpostavimo, da je globinska porazdelitev sipalcev konstantna v delu tarče debeline dx. Pri elastičnem trku v določeni globini projektil odleti pod kotom δ s kinetično energijo K_{RBS}E₀', tarčno jedro pa pod kotom φ glede na začetno smer projektila s kinetično energijo K_{ERDA}E₀'. S K_{RBS} označimo kinematski faktor za projektil, s K_{ERDA} pa za odrinjeno jedro. Do površine tarče izbito jedro preleti še pot x / cos(φ - α). Z detektorjem, ki ga postavimo pri kotu φ, lahko izmerimo njegovo kinetično energijo E_d. Sorazmerna je z globino, iz katere je delce priletel. Tako je E_d = K_{ERDA}E₀' - S_{ef,ERDA} x. Efektivna zavorna sila S_{ef,ERDA} (enačba (6)) je enaka vsoti zavorne sile snovi za projektil S₁ in zavorne sile snovi za odrinjeno jedro S₂. Izraz je pomnožen še s faktorjem, ki določa zaustavljanje odrinjenih delcev v foliji. Z detektorjem preštejemo tudi število odrinjenih jeder v energijskem intervalu (E, E + ΔE), ki ustreza globinskemu intervalu (x, x + Δx). Pridetek odrinjenih jeder je sorazmeren z gostoto atomov izbrane vrste v snovi (enačba 3).

Projektili imajo v času meritve t, v delu tarče, na razpolago dN_k(x) sipalcev ene vrste. Število odrinjenih jeder iz dela tarče v prostorski kot 4π je enako:

$$dN(x) = \sigma(E'_0(x)) j_p t dN_k(x) \tag{1}$$

Z j_p označimo številsko gostoto toka projektilov, to je število vpadlih projektilov N₀ na prečni presek curka A. Sorazmernostni koeficient σ(E'(x)) je celotni sipalni presek. Z detektorjem, ki ga postavimo v razdalji L od površine tarče pri fiksnem kotu φ, detektiramo le delce, ki se sipljejo v prostorski kot ΔΩ detektorja. Če upoštevamo, da o sipanju v določen prostorski kot odloča diferencialni sipalni presek, enačbo prepišemo v obliko:

$$dN(x) = \left(\frac{N_0}{\cos \alpha} \right) \left(\frac{d\sigma(E'_0(x), \varphi)}{d\Omega} \right) \Delta\Omega n_k(x) dx \tag{2}$$

Tu smo z n_k(x) označili številsko gostoto tarčnih jeder v globini x. Ker z detektorjem dejansko izmerimo število sipanih odrinjenih jeder, ki imajo določene kinetične energije, enačbo pretvorimo v energijsko skalo. Če merimo le pridelke odrinjenih jeder, pred detektor postavimo folijo, s katero izločimo projekte, sipane v smeri naprej. Zavorna sila snovi za projekte je namreč večja kot za lažje delce, kar omogoča, da jih s folijo iz sipnega curka odstranimo v celoti. Folije so največkrat iz aluminija z debelino nekaj μm. Pridetek, P_k(E), odrinjenih jeder elementa k na energijski interval (E, E + dE), kateri pripada plast (x, x + dx), je konvolucija sipalnega preseka dσ/dΩ, porazdelitve koncentracije C_k(x) elementa in efektivne zavorne sile snovi S_{ef,ERDA}:

$$P_k(E) = \frac{dN}{dE} = \Lambda \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{ERDA} \Delta\Omega C_k(x) S_{ef,ERDA}^{-1} \tag{3}$$

Pri tem predpostavimo, da je izkoristek detektorja za detekcijo nabitih delcev enak ena. Z Λ označimo konstanto, ki je povezana z merskimi parametri, kot so število vpadlih projektilov v času meritve N₀, številska gostota snovi n_{vz}(x) in vpadni kot α:

$$\Lambda = \frac{N_0 n_{vz}(x)}{\cos \alpha} \tag{4}$$

s C_k(x) definiramo atomsko koncentracijo elementa k v snovi kot kvocient številske gostote n_k(x) določenega elementa v snovi in številske gostote snovi:

$$C_k(x) = \frac{n_k(x)}{n_{vz}(x)} \tag{5}$$

Efektivna zavorna sila snovi za odrinjeno jedro je merilo za to, koliko energije izgubi delce, če opravi v snovi pot dx:

$$S_{ef,ERDA} = \left[\frac{K_{ERDA} S_1 |_{E'_0}}{\cos \alpha} - \frac{S_2 |_{E_2}}{\cos(\alpha - \varphi)} \right] \frac{S_2 |_{E_2} S_{2,AI} |_{E_d}}{S_2 |_{E_2} S_{2,AI} |_{E_2}} \tag{6}$$

Tu je:

- S₁|_{E'₀} zavorna sila snovi za projektil pri kinetični energiji E'₀,

- $S_2|KERDAE^0$ zavorna sila snovi za odrinjena jedra pri kinetični energiji $E_2 = KERDAE^0$,
- $S_2|E_2$ zavorna sila snovi za odrinjeno jedro pri kinetični energiji E_2 , ki jo delec ima ob izstopu iz tarče
- $S_2,Al|Ed$ in $S_2,Al|E_2$ pa sta zavorni sili aluminija za odrinjeno jedro pri kinetičnih energijah ob izstopu in vstopu v folijo.

Globinska ločljivost, tj. najmanjša razdalja med točkama, ki ju lahko še ločimo med seboj, je nekaj atomskih plasti, zato računamo s povprečno koncentracijo elementa v izbranem intervalu ($x, x + \Delta x$). To pomeni, da enačbo integriramo v ustreznem energijskem območju ($E, E + \Delta E$):

$$A(E) = \int_E^{E+\Delta E} P_k(E) dE \quad (7)$$

Povprečno porazdelitev koncentracije izbranega kemijskega elementa v intervalu ($x, x + \Delta x$) izrazimo kot:

$$C_k(x) = P_k(E) \Lambda^{-1} \frac{d\sigma^{-1}}{d\Omega_{ERDA}} \Delta\Omega^{-1} S_{ef,ERDA} \quad (8)$$

V tem izrazu še ne upoštevamo razmazanosti energije zaradi končne energijske ločljivosti števca, sipalnega procesa in geometrijskih parametrov.

2.5 Modeliranje z numeričnim programom

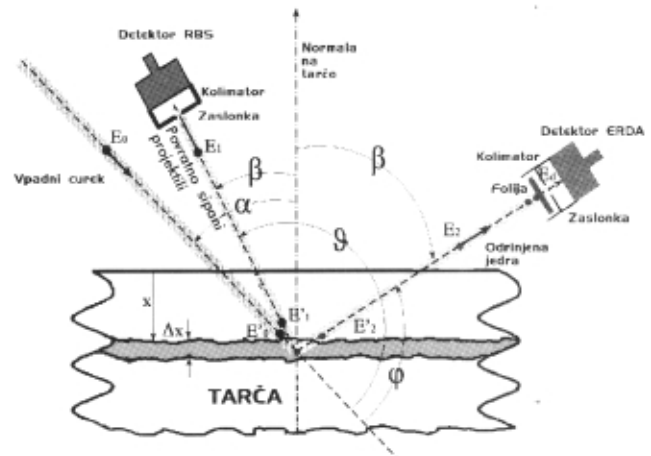
Za obdelavo izmerjenega spektra ERDA je treba poznati zvezo med kinetično energijo delcev in kanalom, v katerega ADC zapisuje pripadajoče sunke. Energijsko umeritev detektorja lahko dokaj dobro naredimo s metodo RBS. Pri tem tarčo z znanimi kemijskimi sestavami obsevamo z različnimi energijami protonov in helijevih ionov. Iz visokoenergijskih robov v spektru odčitamo točke kanal-energija. Skozi točke, po metodi najmanjših kvadratov, potegnemo umeritveni premici za protone in helijeve ione.

Pri modeliranju spektra ERDA smo si pomagali z numeričnim programom "RBX" [7]. Ta razdeli tarčo na enako debele rezine v globinski skali. Z vhodnimi podatki opišemo sestavo tarče, stehiometrijska razmerja za posamezne dele tarče ter njihove atomske gostote.

Pri izbrani eksperimentalni geometriji, ki jo določata odrivni kot ϕ in vpadni kot α program izračuna kinetično energijo E_0' projektilov pred vstopom v posamezno plast, kinetično energijo E_2' odrinjenih protonov ter kinetično energijo E_2 , ki jo ti delci odložijo v števcu. Za zavorno silo snovi za odrinjena jedra numerični program upošteva enačbo (6). Pri energijah E_0' izračuna diferencialni sipalni presek. Za modeliranje spektra ERDA imamo na razpolago več interpolacijskih izrazov. Pri modeliranju spektrov navadno uporabljamo Quilletov izraz. Nato program naredi navidezni večkanalni analizator. Širina kanala Δg je določena z naklonom umeritvene premice. Z enačbo (3) program v vsakem kanalu izračuna pridelek odrinjenih protonov. Za ΔE uporabi izraz, ki določa energijsko ločljivost metode ERDA.

Tako dobljeni modelski spekter prilagajamo izmerjenemu, pri čemer spreminjamo prosti parameter $C_k(x)n_{vz}$. Kakovost prilagajanja temelji na iskanju najmanjšega

reduciranega hi-kvadrata, ki izraža razliko med vrednostmi modelskega in izmerjenega spektra glede na število prostih parametrov. Če je razlika med modelskim in izmerjenim spektrom majhna, je vrednost reduciranega hi-kvadrata blizu ena.

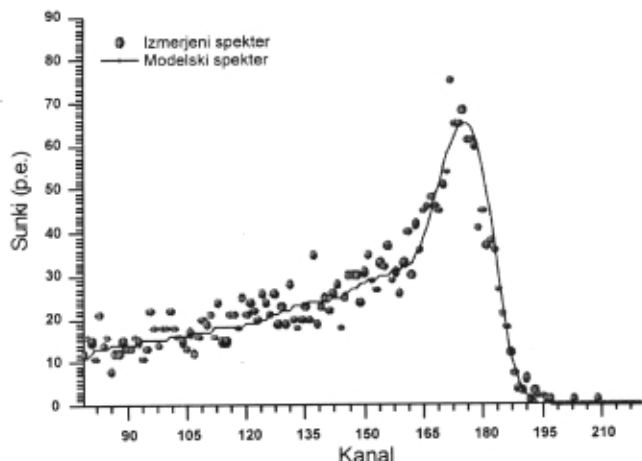


Slika 5: Odbojna geometrija pri ERDA in RBS

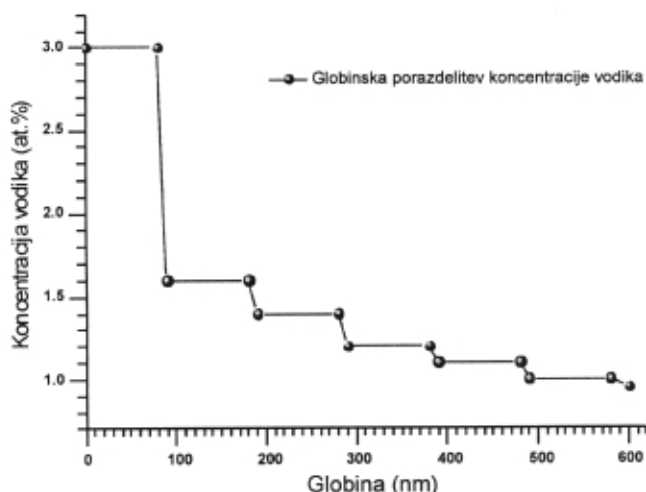
Metodo ERDA smo uporabili na primer tudi za merjenje globinske porazdelitve koncentracije vodika v kristalih litijevega niobata $LiNbO_3$ [8]. Material se uporablja za optične vodnike. Pri tem je pomembna dobro določena kemijska sestava, saj je od tega odvisen lomni količnik snovi. Študirali smo, kako se spreminja globinska porazdelitev koncentracije vodika v kristalih litijevega niobata pri različnih postopkih priprave. Če ga pripravijo tako, da atome litija nadomestijo z vodikom, se poveča lomni količnik. Na sliki 5 sta prikazana izmerjeni in modelski spekter odrinjenih protonov za kristal litijevega niobata, ki je bil pripravljen tako, da smo ga izpostavili staranju 1,5 ure in postopku »protonske izmenjave« (proton exchange) 5 minut. Tarčo, ki je bila zasukana za 75° glede na smer vpadnega curka, je bila obsevana s curkom helijevih ionov s kinetično energijo 3 MeV. Odrinjene protone smo detektirali pri kotu 30° , projektili, sipani v smeri naprej, pa so bili izločeni z aluminijevo folijo z debelino $14 \mu m$. Meritev je potekala 2600 s, gostota toka vpadnih delcev je bila $J = 10^{15} \text{ mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ki smo jo izračunali iz sočasno merjenega spektra RBS za litijev niobat. Detekcijski kot za povratno sipana helijeva jedra na jedrih atomov litija, kisika in niobija je bil 150° . Na sliki 7 je prikazana izračunana globinska porazdelitev koncentracije vodika v litijevem niobatu do globine 600 nm.

2.6 Uporaba Fourierove analize pri računanju globinske porazdelitve koncentracije

Globinsko porazdelitev koncentracije elementa v snovi lahko izračunamo tudi z normalizacijo izračunane globinske porazdelitve koncentracije istega elementa, ki je lahko dobro poznana, ali pa izračunana za primer, ko ima spekter dobro statistiko. Pri računanju si pomagamo s Fourierovo analizo. Pridelek odrinjenih jeder, $P_k(E)$ (enačba (7)) je enak konvoluciji instrumentalne funkcije $N(E)$ - opisuje parametre, kot sta efektivna



Slika 6: Izmerjeni in modelski spekter odrinjenih protonov za kristal LiNbO₃, ki je bil 300 sekund izpostavljen izmenjavi atomov litija z atomi vodika in 1,5 ure na T = 300 °C



Slika 7: Globinska porazdelitev vodika v kristalu LiNbO₃, ki je izračunana iz spektra, prikazanega na sliki 6

zavorna sila $S_{ef,ERDA}$ in diferencialni sipalni presek za odrinjena jedra $d\sigma / d\Omega_{ERDA}$ - ter globinske porazdelitve koncentracije $C_k(x)$ elementa k v snovi:

$$P_k(E) = N(E) * C_k(x) \tag{9}$$

Upoštevamo izrek o konvoluciji [9], ki pravi, da je Fourierova transformiranka konvoluirane funkcije enaka produktu Fourierovih transformirank posameznih funkcij. Fourierovo transformiranko pri poljubni funkciji $f(z)$, zapišemo kot:

$$\hat{f}(K) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \exp(iKz) dz \tag{10}$$

Tu je z poljubna spremenljivka v realnem prostoru Re. Če naredimo Fourierovo transformacijo funkcij $P_k(E)$, $N(E)$ in $C_k(x)$, se Fourierova transformiranka zapiše kot:

$$\hat{P}_k(K) = \hat{N}(K) \hat{C}_k(K) \tag{11}$$

Izračunati želimo še globinsko porazdelitev koncentracije elementa iz spektra, izmerjenega za vzorec z neznano porazdelitvijo koncentracije. Fourierovo transformiranko pridelka za poljuben spekter zapišemo potem:

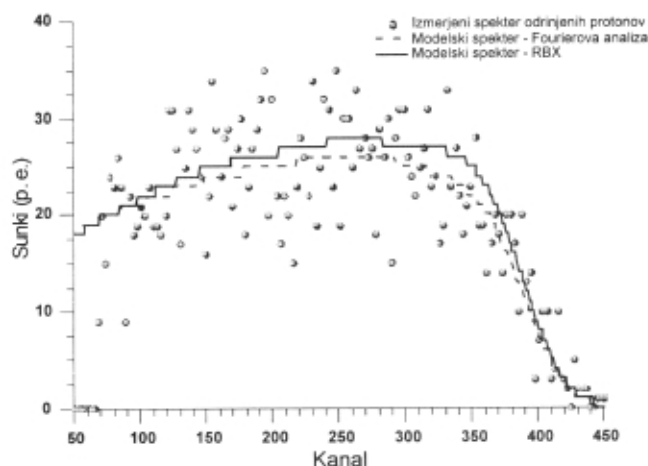
$$\hat{P}_{k,1}(K) = \hat{N}(K) \hat{C}_{k,1}(K) \tag{12}$$

Ker gre za navaden produkt, enačbi (11) in (12) lahko preprosto združimo in Fourierovo transformiranko porazdelitve iskane koncentracije $C_k(K)$ zapišemo kot:

$$\hat{C}_{k,1}(K) = \hat{C}_{k,1}(K) \frac{\hat{P}_{k,1}(K)}{\hat{P}_k(K)} \tag{13}$$

Če smo opravili meritve za enake tarče pri enakih eksperimentalnih parametrih, smo privzeli, da je prenosna funkcija v enačbi (15) ves čas enaka. Če naredimo obratno Fourierovo transformacijo funkcije $C_{k,1}(K)$, pridelamo globinsko porazdelitev koncentracije elementa v realnem prostoru $C_1(x)$.

Napako $C_{k,1}(K)$ določajo napake: $C_k(K)$, $P_{k,1}(K)$ in še posebej v $P_k(K)$, ki v enačbi (15) nastopa v imenovalcu. Na sliki 8 so prikazani izmerjeni spekter odrinjenih protonov za vzorec titana pri T = 350 °C, ki je bil v atmosferi vodika pri p = 10 mbar, modelski spekter, ki smo ga modelirali z 18 plastmi debeline 20 nm z različnimi razmerji koncentracij med titanom in vodikom, in globinska porazdelitev koncentracije vodika, ki je



Slika 8: Izmerjeni spekter odrinjenih protonov za vzorec očiščenega titana pri T = 350 °C, ki je bil v atmosferi vodika pri p = 10 mbar. Poleg izmerjenega spektra sta prikazana še modelska spektra. Oba modelska spektra sta bila izračunana s programom RBX, pri čemer smo pri drugem spektru (črtkanem) kemijsko sestavo v posameznih plasteh tarče določili z uporabo Fourierove analize.

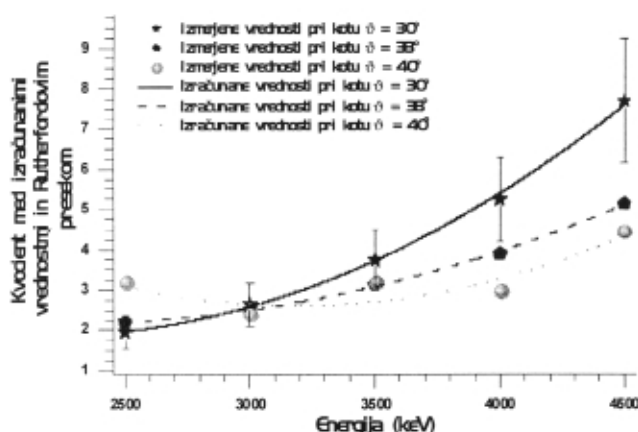
bila izračunana s Fourierovo analizo, pri čemer smo kot referenčni spekter upoštevali spekter odrinjenih protonov za vzorec titana pri $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, ki je bil v atmosferi vodika pri $p = 10\text{ mbar}$ in nato ohlajen na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ugotovili smo, da je napaka pri modeliranju $\pm 15\%$. S slike 8 je razvidno, da je razlika v koncentracijski porazdelitvi vodika pri modeliranju z numeričnim programom in pri računanju z uporabo enačbe (15) neznatna. Način, ki smo ga predstavili zgoraj, je lahko zelo primeren, če je za isti vzorec pri enakih eksperimentalnih parametrih izmerjeno več globinskih porazdelitev koncentracij vodika.

2.7 Diferencialni sipalni presek

Če želimo izračunati globinsko porazdelitev koncentracije kemijskega elementa v vzorcu, moramo poznati parametre, ki določajo pridelok odrinjenih jeder, še posebej diferencialni sipalni presek, ki izraža naravo sipalnega procesa. Pri tem je navadno treba upoštevati, da je Rutherfordov presek (enačba (14)) samo približek:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{ERDA,Ruth}} = \left(\frac{z_1 z_2 e_0^2}{8\pi \epsilon_0} \right) \frac{1}{E_0^2} \frac{(1+\eta)^2}{\eta^2 \cos^3 \varphi} \quad (14)$$

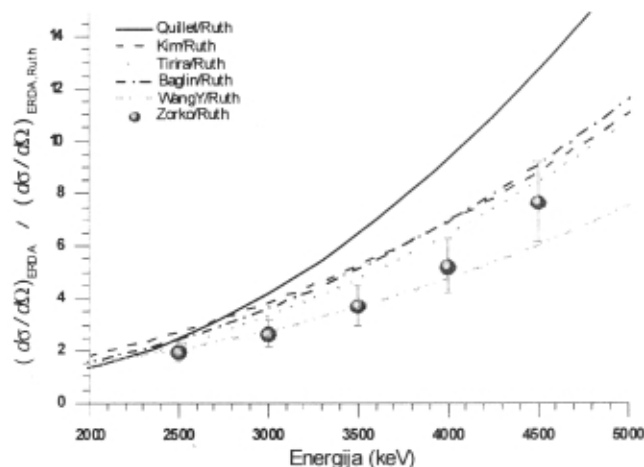
Tu je $z_1 e_0$ naboj projektila, $z_2 e_0$ naboj tarčnega jedra, $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}\text{ As/Vm}$, η pa je razmerje mas projektila in tarčnega jedra. Pri kinetičnih energijah nekaj MeV se protoni ali helijevi ioni približajo tarčnemu jedru na razdaljo, kjer moramo poleg odbojne elektrostatske sile upoštevati še vpliv jedrske sile. Za težke izstrelke pa moramo upoštevati še senčenje coulombskega potenciala tarčnega jedra.



Slika 9: Izračunane vrednosti diferencialnega sipalnega preseka, normalizirane na vrednosti Rutherfordovega približka za sipanje helijevih ionov na protonih pri detekcijskih kotih 30° , 38° in 40° pri kinetičnih energijah helijevih ionov 2,5; 3; 3,5; 4 in 4,5 MeV. Vpadni kot projektilov je bil 75° glede na normalo na tarčo.

V tabeli 1 so izračunana razmerja med izmerjenimi vrednostmi diferencialnih presekov in Rutherfordovim presekom pri kotu 30° za različne kinetične energije. Vidimo, da je najmanjši odklik pri kinetični energiji 1 MeV, nato pa razlika narašča. Vrednosti diferencialnega sipalnega preseka, ki smo jih izračunali, se pri energijah helijevih ionov 2,5 in 3 MeV ne razlikujejo za več kot 30% od tistih, ki so jih izračunali drugi avtorji. Pri večjih energijah je razlika med vrednostmi večja. To razliko lahko pojasnimo s tem, da so vrednosti diferencialnega sipalnega preseka pri večjih energijah raztresene, kar je najverjetneje posledica dejstva, da so bile opravljene meritve za različne vzorce, od polimernih do kovinskih, implantiranih z atomi vodika.

Izmerili smo kotno odvisnost diferencialnega sipalnega preseka za sipanje helijevih ionov na protonih v energijskem območju od 2,5 MeV do 4,5 MeV, pri detekcijskih kotih: 30° , 38° in 40° . V ta namen smo uporabili tarčo vanadijevega hidrida. Na sliki 9 so prikazane izračunane vrednosti sipalnega preseka, ki so pri določenih energijah helijevih ionov normalizirane na vrednosti Rutherfordovega izraza pri različnih kotih. Po metodi najmanjših kvadratov smo skozi eksperimentalne točke potegnili krivuljo s prostimi koeficienti od a_1 do a_4 . Izračunane vrednosti diferencialnega sipalnega preseka imajo napako $\pm 20\%$, h kateri največ prispeva statistična napaka v izmerjenih spektrih ERDA. Na sliki 10 je razvidno, da se vrednost diferencialnega sipalnega preseka za vse sipalne kote parabolno veča z energijo vpadnih projektilov. Takšna odvisnost diferencialnega sipalnega preseka od energije potrjuje domnevo, da med nabitima točkastima delcema ne deluje le odbojna coulombska sila, marveč je potrebno, kot je to v primeru sistema helijevo jedro-proton, upoštevati še vpliv jedrske sile med delcema. Na sliki 9 so prikazane še izračunane vrednosti diferencialnega sipalnega preseka pri kotu 30° pri določenih energijah v primerjavi z eksperimentalnimi vrednostmi diferencialnega sipalnega preseka drugih avtorjev /10-17/. Tudi tu so vrednosti diferencialnega sipalnega preseka normalizirane na vrednosti Rutherfordovega izraza (14).



Slika 10: Normalizirane izračunane vrednosti diferencialnega sipalnega preseka pri kotu 30° v energijskem območju od 2,5 do 4,5 MeV v primerjavi z vrednostmi drugih avtorjev: Tirira /10/, Baglin /12/, Kim /14/, Quillet /13/

Tabela 1: Primerjava izmerjenih presekov (Baglin [12], Quillet [13]), teoretične napovedi preseka (Tirira [10]) in vrednosti, izmerjene v okviru doktorskega dela z Rutherfordovim presekom pri kotu 30° v odvisnosti od kinetične energije helijevega iona

E(MeV)	$\sigma_{\text{Tirira}} / \Omega_{\text{Ruth}}$	$\sigma_{\text{Baglin}} / \Omega_{\text{Ruth}}$	$\sigma_{\text{Quillet}} / \Omega_{\text{Ruth}}$	$\sigma_{\text{Zorko}} / \Omega_{\text{Ruth}}$
1	1,1	1	1,2	-
1,5	1,4	1,2	1,5	-
2	1,7	1,6	1,9	-
2,5	2,2	2,1	2,6	2
3	3	2,7	3,8	2,7
3,5	4	3,4	5,3	3,8
4	6	4,7	8,4	5,3
4,5	8,3	5,9	12,3	7,7

3 Sklep

Predstavljeni so rezultati meritev porazdelitev koncentracij vodika v trdih vzorcih z jedrsko spektroskopsko metodo ERDA. Metoda temelji na zaznavanju delcev, ki jih izbijejo izstrelki z določeno kinetično energijo. Nabiti delci pri prehodu skozi snov izgubljajo energijo pri trkih z elektroni v snovi. Od tod izhaja, da imajo odrinjeni delci, ki priletijo iz različnih globlin, različne energije. Koncentracija elementa v izbrani globlini je sorazmerna s številom zaznanih delcev v energijskem intervalu in je obratno sorazmerna z energijskimi izgubami delcev v snovi, diferencialnim sipalnim presekom, ki določa verjetnost za sipanje v prostorski kot detektorja, ter eksperimentalnimi parametri (nagib tarče proti smeri curka izstrelkov, število vpadnih delcev). Uporabili smo spektrometer, ki je sestavljen iz dvoosnega goniometra, ki je kot nosilec tarč in omogoča spreminjanje nagiba tarče glede na vpadni curek izstrelkov, in detekcijskega sistema, ki pa je sestavljen iz dveh detektorjev in pripadajoče elektronike. Z enim detektorjem smo zaznavali le odrinjene protone (ERDA), pri čemer smo pred detektor postavili $14 \mu\text{m}$ debelo Al-folijo, da smo izločili helijeve ione, ki so se sipali v smeri naprej. Z drugim detektorjem smo zaznavali le povratno sipane helijeve ione (RBS). Iz sočasne meritve z detektorjema smo dobili popolno informacijo o porazdelitvah koncentracij vseh kemijskih elementov v vzorcu. Tarče smo obsevali s curki ionov $^4\text{He}^+$ z energijo 3 MeV pod kotom 75° glede na normalo površine tarče. Gostota toka projektilov na tarči je bila reda velikosti 20 nA/cm^2 . Izbite protone smo detektirali pri kotu 30° .

V literaturi nismo našli dovolj podatkov o vrednostih diferencialnega sipalnega preseka za odriv protonov na jedrih helija pri energijah, večjih od 2,5 MeV. Zato smo v energijskem intervalu od 2,5 MeV do 4,5 MeV izmerili vrednosti diferencialnega sipalnega preseka, pri čemer smo za tarčo uporabili vzorec termično obstojnega vanadijevega hidrida. Izbite protone smo detektirali pri kotih 30° , 38° in 40° . Rezultati meritev se odmikajo od že znanih vrednosti diferencialnega sipalnega preseka za 10 do 20 % v energijskem intervalu od 2,5 do 3,5 MeV. Ugotovili smo, da bo v prihodnje

potrebno meriti v manjših energijskih intervalih in na različnih tarčah z znano globinsko porazdelitvijo vodika, da bi lahko točno določili vrednosti diferencialnega sipalnega preseka za odriv protonov na jedrih helija.

V drugem delu članka se bomo posvetili analizi rezultatov meritev z metodo ERDA za vzorce tehnično čistega titana, ki so bili najprej jedkani, nato v vakuumu pregreti do 600°C in nato še pri različnih temperaturah vzorcev v stiku z molekulami vodika pri različnih tlakih.

4 Literatura

- /1/ M. Budnar, A. Cvelbar, P. Panjan, P. Pelicon, Ž. Šmit, B. Zorko, Vakuumist 14/3 (1994) 1
- /2/ J. L' Ecuyer, et. al., J. Appl. Phys. 47 (1976) 881
- /3/ B. L. Doyle, A. Peercy, Appl. Phys. Lett., 34/11 (1979) 811-813
- /4/ B. Zorko, Diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, 1995
- /5/ W. K. Chu, J. W. Mayer, M. A. Nicolet, Backscattering Spectrometry, Academic Press, New York, 1978
- /6/ Techniques for nuclear and particle physics experiments, Springer, Berlin 1987
- /7/ E. Kotai, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B92 (1994) 540-546
- /8/ M. Budnar, B. Zorko, P. Pelicon, J. Špírkova-Hradilova, P. Kolarova-Nekvindova, H. Turčičova, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 161-163 (2000) 568-572
- /9/ Kreyszig, Mathematical methods in advanced engineering, John Wiley's & Sons, Singapur, 1994
- /10/ J. Tirira, F. Bodart, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B74 (1993) 496-502
- /11/ Y. Kido, S. Miyauchi, O. Takeda, Y. Nakayama, M. Sato, K. Kusao, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B82 (1993) 474-480
- /12/ J. E. E. Baglin, A. J. Kellock, M. A. Crockett, A. H. Shih Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B64 (1992) 469-474
- /13/ V. Quillet, F. Abel, M. Schott, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B83 (1993) 47-61
- /14/ C.-S. Kim, S.-K. Kim, H. D. Choi, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B155 (1999) 229-237
- /15/ Y. Wang, J. Chen, F. Huang, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B17 (1986) 11-14
- /16/ H. Wang, G. Q. Zhou, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B34 (1988) 145-151
- /17/ R. E. Benenson, L. S. Wielunski, W. A. Lanford, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, B15 (1986) 453-458

AVTOMATSKI VARILSKI FILTER

Andrej Demšar, Bojan Marin, Miha Pesek

Balder, optoelektronski elementi in merilna tehnika, d. o. o., Teslova ulica 30, 1000 Ljubljana

Automatic welding filter

ABSTRACT

Compared to the classic passive welding filter (darkened glass or plastic sheet), automatic LCD welding protection filter allows the welder undisturbed work without unnecessary lifting and lowering of the welding helmet. The automatic filter adjusts the light transmission according to the lighting condition, so that it darkens to the required shade level when welding light is detected and brightens when welding finishes. This results in more precise welding and increased productivity. Important performance of the automatic welding filter is that it provides full and permanent protection of the eyes against harmful IR and UV light, regardless of the transparency state. This protection is provided by vacuum deposited thin film layer interference filter which transmits a visible part of the spectrum and reflects UV and IR parts.

POVZETEK

Avtomatski varilski filter v primerjavi s klasičnim (obarvano steklo ali plastika) varilcu omogoča neovirano varjenje brez dvigovanja in spuščanja zaščitne varilske maske, saj lahko skozi filter gleda tudi, kadar ne vari. S tem mu je omogočena uporaba obeh rok, zato se pomembno izboljšajo storilnost, kvaliteta in natančnost varjenja. Najbolj pomembno pa je, da avtomatski varilski filter varilcu zagotavlja popolno zaščito oči pred škodljivimi svetlobnimi sevanji med celotnim postopkom varjenja, ker tudi v optično odprtem stanju prepušča samo vidno svetlobo in absorbira/ odbija nevarno UV in IR svetlobo.

1 Predstavitev podjetja

Balder je podjetje, ki je bilo ustanovljeno za prenos izsledkov razvojno-aplikativnih raziskav Instituta "Jožef Stefan" v redno proizvodnjo. Strokovno jedro podjetja izhaja iz Odseka za fiziko trdne snovi, katerega številna in svetovno priznana skupina raziskovalcev se ukvarja z osnovnimi raziskavami na področju tekočerkristalne tehnologije. Balder od leta 1996 dalje deluje v okviru Tehnološkega parka Ljubljana, v letu 1997 pa je pričel velikoserijsko proizvodnjo in prodajo visokotehnoloških izdelkov - zaščitnih avtomatskih varilskih filtrov (AVF).

2 Predstavitev izdelka in tehnični opis

Avtomatski varilski filter je osnovan na uporabi hitrega tekočerkristalnega (LCD - Liquid Crystal Display) svetlobnega preklopnika, ki pod nadzorom posebej v ta namen razvitega elektronskega vezja prilagaja svetlobno prepustnost filtra, tako da lahko varilec ves čas brez težav spremlja potek varjenja. To pomeni, da AVF v nekaj sto mikrosekundah po detekciji svetlobe varjenja potemni do nastavitvene zatemnitvene stopnje in se takoj po prenehanju varjenja povrne nazaj v prozorno "odprto" stanje. AVF je uporaben pri vseh vrstah električnih varilnih naprav in za vse tehnike elektro-varjenja: MIG/MAG, WIG/TIG (argon/helij), varjenje s pokritimi elektrodami, plazemsko rezanje in plazemsko varjenje.

Sestavni deli avtomatskega varilskega filtra so plastično ohišje, optični sklop, sončna celica, fotodetektorji in krmilna elektronika (slika 1).

Ohišje je izdelano iz trpežnega, temperaturno in mehansko obstojnega ter samougasilivega materiala. Balder za ohišja svojih varilskih filtrov uporablja zmesi ABS.

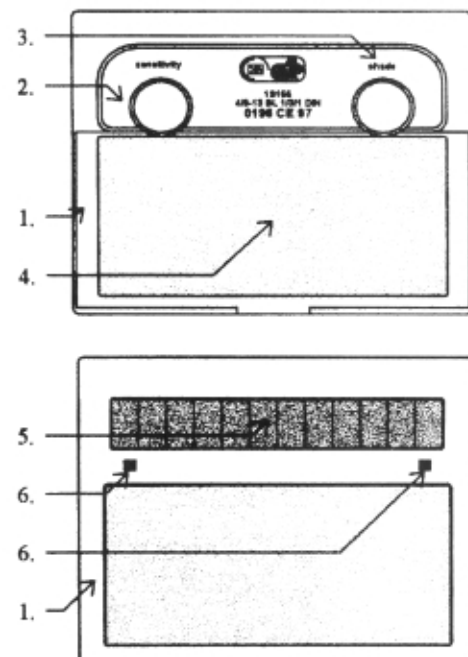
Fotocelica zagotavlja večino energije, potrebne za delovanje AVF-ja. To omogoča, da AVF deluje z vgrajeno litijevo baterijo 7 let in več.

Fotodetektorji selektivno zaznavajo infrardečo svetlobo varjenja in posredujejo signal elektronskemu vezju, ki krmili delovanje optičnega sklopa.

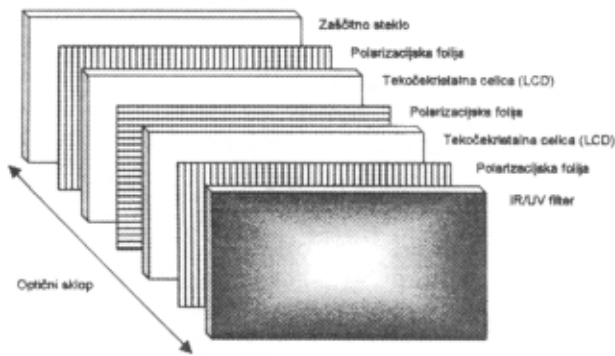
Optični sklop (slika 2) je tehnološko najzahtevnejši del AVF-ja. Sestavljen je iz dveh tekočerkristalnih celic, treh ali štirih polarizacijskih folij, zaščitnega IR-UV filtra ter zaščitnega stekla. Pri tem je pomembno, da IR-UV filter zagotavlja 100 % pasivno varnost varilskega filtra, saj prepreže (delno absorbira in delno odbija) vsa očem nevarna IR- in UV-sevanja, tudi v primeru, če AVF odpove. S tekočerkristalnimi celicami in polarizacijskimi folijami se namreč uravnava le vidni, očem nenevarni del svetlobnega spektra.

IR-UV filter je narejen z vakuumsko tankoplastno tehnologijo nanašanja tankih plasti kovinskih oksidov in kovin iz parne faze (PVD-postopek) na steklo. Na sliki 3 je prikazan prerez takega tankoplastnega pasivnega filtra.

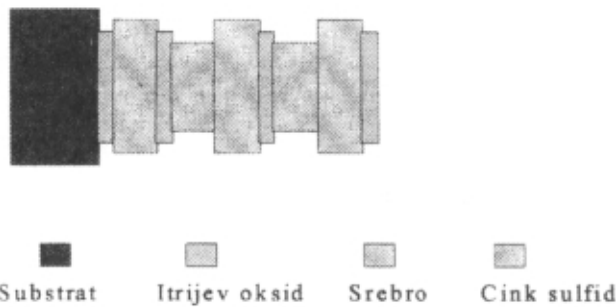
Pasivni filter zapira med 380 in 400 nm boljše od 5×10^{-4} in od 760 nm naprej v IR-območje boljše od 1×10^{-4} . Barvna selektivnost je v vidnem delu takšna, da vidimo



Slika 1: Avtomatski varilski filter (Balder - WLF Professional); 1. Okvir filtra, 2. Gumb za nastavitev občutljivosti, 3. Gumb za nastavitev stopnje zatemnitve, 4. Tekočerkristalni aktivni svetlobni filter, 5. Fotocelica, 6. Fotodetektorji (fotodiode)



Slika 2: Sestavni deli optičnega sklopa avtomatskega varijskega filtra



Slika 3: Prerez tankoplastnega pasivnega IR-UV filtra (značilne debeline posameznih plasti so med 20 in 50 nm)

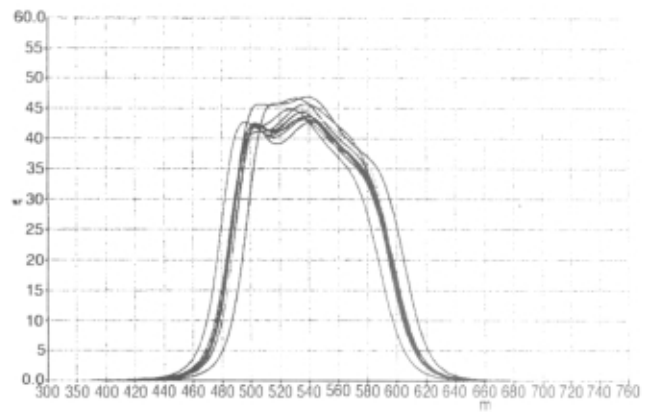
skozi filter tudi rdečo barvo, kar je za varilca zelo pomembno. Na sliki 4 so prikazani značilni optični spektri filtrov iz različnih naparevanj - odmiki spektrov od idealne krivulje so 10 nm v vsako smer, kar je v mejah tolerance.

Tehnologija sestave optičnega sklopa je zahtevna, saj je treba s popolnim optičnim stikom sestaviti v "optični sendvič" kar osem različnih plasti ter pri tem zagotoviti, da se mednje ne ujame niti najmanjša smet ali zračni mehur. To seveda zahteva posebne delovne razmere, in sicer uporabo čistih prostorov in brezprašnih komor ter kontrolirano klimo. Prav tako je treba zagotoviti visoko kvaliteto optičnih elementov, ki sestavljajo "optični sendvič", saj morajo biti tudi le-ti optično brezhibni (ravnost, homogenost, čistost, brez defektov...).

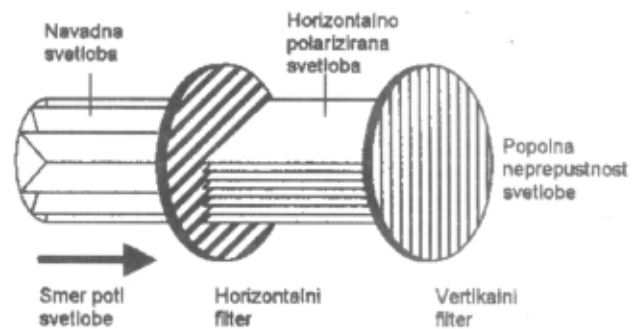
Na osnovi svetlobe, ki jo zaznajo fotodetektorji, **elektronsko vezje** krmili optični sklop. Njegova naloga je prepoznati frekvenco signala oz. svetlobe, ki nastane pri varjenju, in izločiti moteče vire, kot so na primer sončna svetloba, svetloba žarnic, neonskih luči in podobno. Prav tako skrbi za nepretrgano pripravljenost filtra za delo, za samodejen vklop in izklop ter s tem ob čim enostavnejši uporabi tudi čim manjšo porabo energije. Krmila elektronika AVF-ja je takorekoč pravi mali analogni računalnik, kar potrjuje tudi dejstvo, da je vanjo vgrajeno preko 150 elektronskih komponent.

3 Osnovni principi delovanja

Svetloba je valovanje, ki niha v vseh smereh. Ko ji pot prestrežemo s polarizacijskim filtrom, dosežemo, da preide skozi polarizator le tista svetloba, ki niha v eni



Slika 4: Optični spektri desetih zaporednih naparevanj pasivnega filtra



Slika 5: Polarizacija svetlobe

smeri (polarizacija). Če tako polarizirani svetlobi prestrežemo pot še z enim polarizacijskim filtrom, ki ima os polarizacije obrnjeno za 90° glede na polarizacijsko os prvega polarizacijskega filtra, pa dosežemo popolno svetlobno zaporo (slika 5).

Ko med dva polarizacijska filtra, katerih osi polarizacije sta postavljeni pravokotno ena na drugo, postavimo dvolomen prozoren medij, v našem primeru neaktivirano tekočekristalno celico, se polarizirani svetlobi med prehodom skozi le-to zavrti polarizacija za 90°. Zaradi zasuka polarizacije svetloba neovirano preide skozi drugi polarizator.

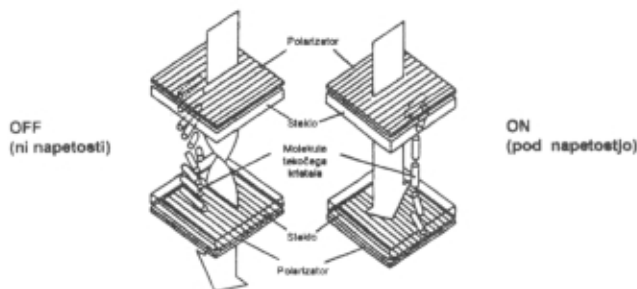
Če pa tekočekristalno celico aktiviramo s tem, da priklopimo električno polje na njene krmilne elektrode, se struktura tekočega kristala spremeni tako, da polarizacije ne zasuka, zato se polarizirana svetloba v drugem polarizatorju enostavno absorbira (glej sliko 6).

4 Prednosti avtomatskega varijskega filtra v primerjavi s klasičnim pasivnim filtrom

Avtomatski varijski filter omogoča popolno zaščito oči med celotnim postopkom varjenja:

- a) Delo je **varnejše in udobnejše**
 - zaščita pred nenadnimi svetlobnimi bliski med varjenjem
 - popolna zaščita oči pred UV- in IR-svetlobo

- dobra vidljivost pred varjenjem, med njim in po njem
 - dvigovanje maske med varjenjem ni več potrebno
 - obe roki sta prosti za delo
- b) Izboljšana kvaliteta varjenja
- dobra vidljivost omogoča boljše pozicioniranje elektrod pred začetkom varjenja in zato boljše varjenje in večjo delovno storilnost
- c) Povečana učinkovitost dela
- zaradi povečane storilnosti, prihranka časa in zmanjšanja nevarnosti poškodb so stroški za nakup AVF-ja povrnjeni že po približno 14 dneh intenzivnega varjenja.



Slika 6: Delovanje aktivirane in neaktivirane tekočerkristalne celice

5 Prednosti Balderjevih filtrov v primerjavi s konkurenčnimi izdelki

Balderjevi AVF-ji so osnovani na zadnjih dosežkih s področja tekočerkristalnih in tankoplastnih tehnologij kot tudi novih tehničnih izpopolnitvah. Omogočajo popolnoma avtomatsko, preprosto in varno delo ter zagotavljajo tudi naslednje lastnosti:

- Posebno, večnivojsko krmiljenje tekočerkristalnih optičnih preklonnikov omogoča ultrahitro preklonno čase (0,20 ms), kar je približno petkrat hitrejše od večine konkurenčnih izdelkov in petnajstkrat hitrejše od zahtev veljavnih standardov.
- Elektronsko krmilno vezje napaja sončna celica in dodatno vgrajena Li-baterija, ki je ni treba menjavati, zagotavlja pa stalno pripravljenost za varno delo tudi pri zelo šibki zunanji svetlobi. Nizka poraba omogoča več kot 7-letno normalno uporabo oziroma skladiščenje ob 2-letni garanciji.
- Invertorski aparati ter aplikacije TIG pri majhnih tokovih (<20A) so za večino konkurenčnih filtrov pretrd oreh, ali pa imajo zanje posebne, znatno dražje izdelke z magnetnim senzorjem. Vsi Balderjevi filtri pa so zaradi uporabe naprednih tehničnih rešitev optimizirani tudi za te aplikacije, še posebej izdelek z nastavljivo zatemnitvijo in nastavljivo občutljivostjo.
- Večplastni pasivni svetlobni filter ščiti pred UV- in IR-svetlobo in obenem zagotavlja odlično vidljivost ter ločljivost naravnih barv, všteti rdečo.

6 Standardi in normativi

Po direktivi EN 89/686/EEC se AVF uvršča v drugo kategorijo PPE (Personal Protective Equipment - ose-

ba zaščitna oprema), kar pomeni, da je treba za pridobitev certifikata CE opraviti vrsto zahtevnih preskusov, kot jih predpisuje standard EN 379. Pridobitev certifikata CE sama po sebi sicer že pomeni dovoljenje za prodajo izdelkov na trgu Evropske zveze, vendar brez zahtevnejšega, sicer neobveznega certifikata DIN, prodaja tovrstnih izdelkov zaradi specifičnih zahtev trga praktično ni mogoča. Poleg certifikata DIN pa se med proizvajalci PPE- izdelkov čedalje bolj uveljavlja tudi nadstandardna in prestižna oznaka "DIN Plus", ki označuje izdelke, pri katerih tako proizvajalec kot tudi certifikacijska organizacija "DIN Certco" uporabniku zagotavlja višjo stopnjo kvalitete in varnosti. Proizvajalec mora imeti ustrezno znanje in opremo, s katero lahko opravlja primerljive preskuse in meritve kot nemški preskusni center Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Z njimi mora zagotavljati kvaliteto izdelkov skladno s standardom. Izvajanje le-tega redno nadzoruje certifikacijski urad DIN Certco z najmanj vsakoletnim napovedanim ali nenapovedanim obiskom pri proizvajalcu, kjer preveri ustreznost njegovih proizvodnih postopkov, proizvodne dokumentacije, kvaliteto izhodne kontrole in merilnih aparatov. Ob obisku zastopnika DIN Certca le-ta iz redne proizvodnje naključno izbere izdelke, ki jih na stroške proizvajalca preskusi v PTB.

7 Sklep

Balder je s svojim močnim strokovnim zaledjem sedaj edini svetovni proizvajalec AVF-jev, ki v redni proizvodnji lahko zagotavlja kvaliteto "DIN Plus" za vse svoje izdelke. "DIN Plus" je tako Balderjev močan prodajni argument in hkrati eden najmočnejših temeljev Balderjeve strokovne, tehnične in poslovne politike. Pravilnost izbranih smernic se kaže v tem, da je nad 95 % Balderjeve proizvodnje namenjeno izvozu. S svojimi izdelki se je v izjemno kratkem času uveljavil na svetovnem trgu, predvsem uspešen pa je na najzahtevnejših trgih Evropske zveze, kjer v posameznih državah dosega že do 20-odstotni tržni delež.

Literatura

- /1/ Tehnična dokumentacija Balder
- /2/ Standardi: EN 379, EN 165, EN 166, EN 167, EN 168, EN 169
- /3/ EC Direktiva 89/686 - EEC
- /4/ Hilmar Ganser, DIN Plus requirements for personal protective equipment 1998



Slika 5: Uveljavljeni evropski standardi CE, GS, DIN, DIN Plus

MERITVE NEKATERIH LASTNOSTI VEČKRAT NABITIH IONOV, KI SO POMEMBNE ZA ASTROFIZIKO

Iztok Čadež, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Measurement of Some Properties of Multiply Charged Ions Important for Astrophysics

ABSTRACT

A short overview of experimental studies of some properties of multiply charged ions interesting for the space observations is presented. These are cross sections for electron impact excitation of ions, cross sections for charge exchange in ion - molecule collisions and life-times of metastable states of ions. Described studies were performed during one year stay in Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA.

POVZETEK

V prispevku so v kratkem predstavljene eksperimentalne raziskave nekaterih lastnosti večkrat nabitih ionov, ki so pomembne za razlago vesoljskih opazovanj. Gre za preseke za vzbujanje ionov z elektronskim udarom, preseke za izmenjavo naboja pri trkih ionov in nevtralnih molekul ter dobe trajanja metastabilnih stanj ionov. Opisane raziskave so bile narejene v preteklem letu v Laboratoriju za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory), Pasadena, Kalifornija, ZDA.

1 Uvod

V Laboratoriju za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory - JPL, Pasadena, Kalifornija) sem bil od 15. maja 2000 do 31. julija 2001. Delal sem v skupini za atomske in molekulske trke (Atomic and Molecular Collisions Team), ki jo vodi Dr. Ara Chutjian. Osnovna dejavnost skupine so raziskave lastnosti atomskih trkov, pomembnih pri razlagi rezultatov opazovanj vesolja, kakor tudi za razvoj analitskih instrumentov (v glavnem s področja masne spektrometrije). Skupina je del Oddelka za znanost o Zemlji in vesolju (Earth and Space Sciences Division). JPL je vodilni laboratorij NASE za raziskave vesolja z uporabo samodejnih (avtomatskih) naprav. Administrativno deluje kot del znane univerze California Institute of Technology v Pasadeni. Moj obisk v JPL-ju je financiral ameriški Nacionalni raziskovalni svet (National Research Council - NRC) v okviru Research Associateship Programa. NRC je administrativni organ ameriških akademij (National Academy of Sciences, National Academy of Engineering in Institute of Medicine).

Po programu dela sem bil angažiran pri meritvah lastnosti večkrat nabitih ionov (VNI), ki so pomembne za razlago rezultatov opazovanj vesolja. S tega področja so nas posebno zanimali preseki za vzbujanje VNI z elektronskimi trki. Ti preseki so ključnega pomena, če želimo iz eksperimentalnih spektrov sončeve korone določiti parametre te oddaljene plazme - elektronsko temperaturo, koncentracijo elektronov in koncentracijo ionov. Za podobne namene je pomembna lastnost VNI tudi doba trajanja metastabilnih stanj teh ionov, kar smo tudi eksperimentalno določali. Zaradi nedavnega odkritja rentgenskega sevanja s kometa Hyakutake (/2/) ter novih meritev takega sevanja s sateliti Chandra in Newton je posebno pospešeno raziskovanje procesa izmenjave naboja (IN) (charge exchange) pri trkih ionov ter posameznih atomov in molekul (H_2 , CO, CO_2 , H_2O ...). To namreč zato, ker je omenjeno sevanje posledica trkov ionov sončevega vetra in nevtralnih

molekul atmosfere kometov. Pri teh trkih vpadni ion zajame enega ali več elektronov in postane manj nabit, toda praviloma visoko vzbujen, in nato seva karakteristične fotone. Podrobno razlago merjenih spektrov omogočajo modeli, ki pa potrebujejo natančne preseke za vse pomembne procese.

2 Opis naprave

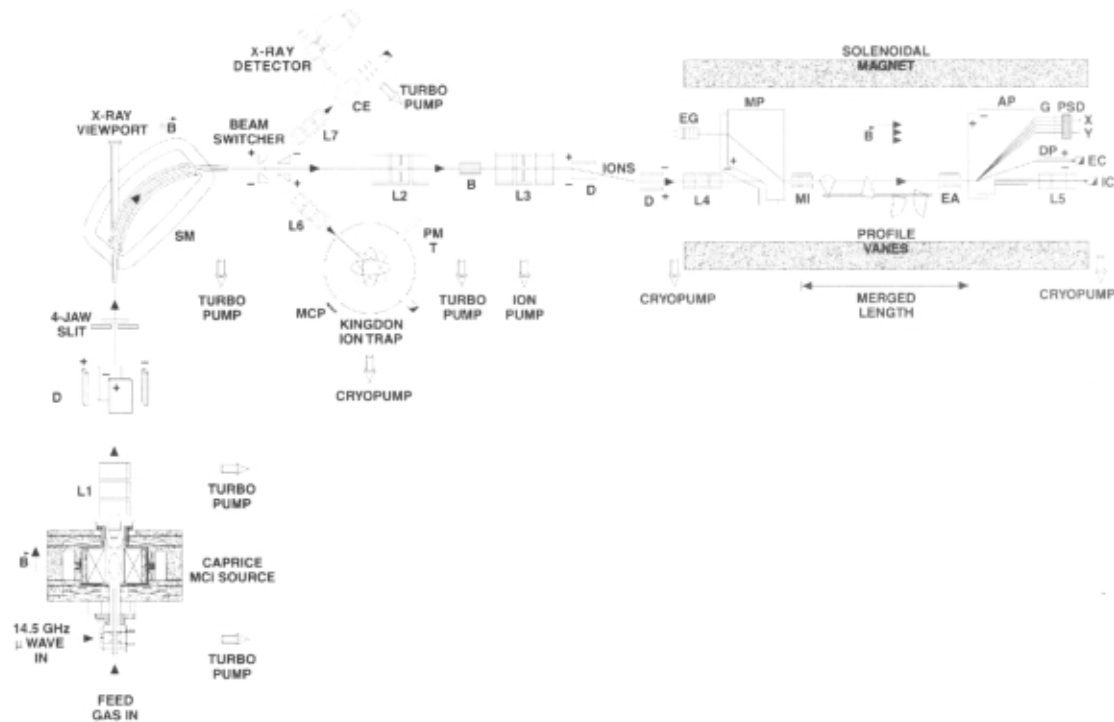
Za raziskave lastnosti VNI imajo v laboratoriju posebno eksperimentalno aparaturu, s katero sem delal tudi sam. Osnovni elementi aparature so: ionski izvir, ekstrakcijska ionska optika za oblikovanje začetnega ionskega curka, 90° odklonski magnet, ki omogoča izbiro določene ionske vrste, in končno, trije žarkovni kanali za meritve treh različnih lastnosti VNI. Eksperimentalna postavitve je podrobno opisana v /1/. Njena shema je podana na sliki 1.

Izvir ionov je redka plazma, ki se vzbuja z resonančnim radiofrekvenčnim sevanjem in je prostorsko omejena z močnim magnetnim poljem (Electron Cyclotron Resonance Ion Source - ECRIS). Osnovi element ECR ionskega izvira je cilindrična plazemska celica, ki se nahaja v posebno oblikovanem magnetnem polju - aksialno polje zrcalnega tipa, ki lokalizira plazmo vzdolž osi. Tvori ga par navojev ter na njega superponirano heksapolno polje močnih permanentnih magnetov. To heksapolno polje omejuje razsežnost plazme v radialni smeri znotraj plazemske celice. Plazma se vzbuja z radiofrekvenčnim (RF) sevanjem frekvence 14,5 GHz, ki se v celico uvaja po posebnem valovodu. Ionski izvir je na visoki pozitivni napetosti V_{ECR} (v glavnem od 2 do 10 kV), ki je istočasno pospeševalna napetost za ione. Tako je energija ionov, katerih lastnosti raziskujemo, enaka qV_{ECR} , pri čemer je q naboj iona. Temperatura plazme ECRIS je taka, da lahko dá zelo podobne porazdelitve ionov po nabojnih stanjih, kot jih imamo v sončevem vetru.

Ekstrakcijsko optiko sestavlja posebno oblikovan ekstrakcijski sklop, elektrostatska (einzeln) cilindrična leča (L1), elektrostatski deflektor (D) in nastavljen par rež. Nato sledi 90° odklonski magnet (SM), s katerim izberemo vrsto ionov glede na razmerje masa/naboj (M/q).

Del žarkovne cevi po magnetu uporabimo za določanje vsebine metastabilnih ionov v ionskem curku. Naslednji element v žarkovnem kanalu je posebni elektrostatski preklopni deflektor (beam switcher), ki usmerja ionski curek v enega od treh eksperimentalnih kanalov.

V smeri naprej je prvi eksperimentalni kanal - za meritve presekov za vzbujanje ionov z elektronskim trkom. Po oblikovanju in premiku ionskega curka s tremi elektrostatskimi lečami (L2, L3, L4) in dvojnimi deflektorjem (D) vpeljemo curek v območje šibkega homogenega magnetnega polja (okoli 10 mT), ki je koaksialno s curkom. Magnetno polje ustvarijo z velikim superprevodnim solenoidom. V isti komori je postavljena elektronska puška (EG), iz katere dobimo začetni elektronski curek, vzporeden ionskemu. Z uporabo prečnega električnega polja (elektrodi MP) premaknemo elektronski



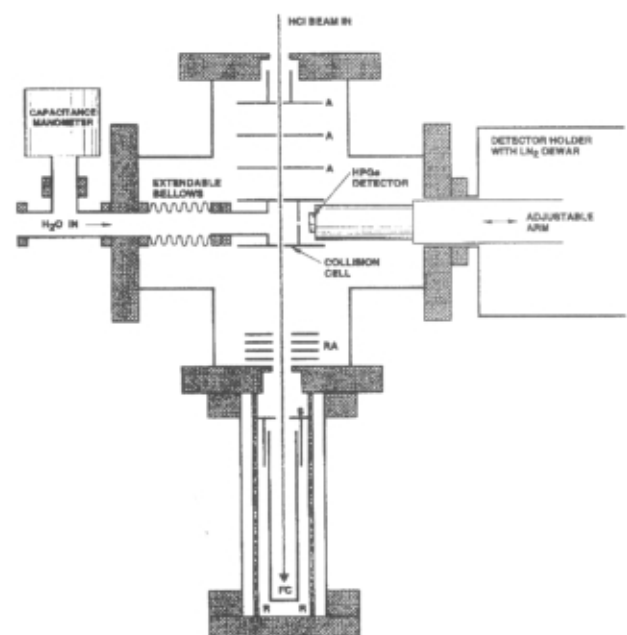
Slika 1: Shema celotne aparature za raziskovanje VNI

curek tako, da se prekrije z ionskim v določenem območju - metoda prekritih curkov (merged beams). To geometrijo uporabijo zato, da bi bila verjetnost za trk, in s tem merski signal, čim večja. Končno, s ponovno uporabo transverzalnega električnega polja (AP) po območju prekritih curkov, razklopimo dve komponenti - elektrone in ione - in jih posebej detektiramo. Elektrone analiziramo na večkanalni plošči s prostorsko ločljivostjo (PSD), ione pa merimo v posebnem kolektorju (IC). Iz slike na PSD lahko določimo velikost signala, ki je posledica vzbujanja iona, kar privede do preseka za proces. Energijo trka elektrona in iona lahko spreminjamo ali s spreminjanjem energije elektronov v curku ali pa, v manjšem območju, s spreminjanjem energije ionskega curka. Priprave za meritve presekov so dokaj zahtevne, saj je treba zagotoviti dobro prekrivanje obeh curkov. To se preverja in meri s posebnim sistemom kontrolnih zaslonk (Profile Vanes). Da bi zagotovili celotno detekcijo elektronov, uporabimo elektrostatsko zrcalo za v nazaj sipane elektrone (MI). Za zmanjševanje signala ozadja pa rabi posebna multipolna elektrostatska zaslonka (EA). Meritve opravljamo avtomatično v štirih fazah s periodičnim odklanjem ionskega in elektronskega curka.

Druga žarkovna cev vodi v elektrostatsko past (Kingdon Ion Trap), v kateri se ioni lahko zajamejo za čas do par sto ms. V tem času s fotopomnoževalko opazujemo svetlobni signal določene valovne dolžine, kar omogoča določanje dobe trajanja metastabilnih ionov v curku.

Tretja žarkovna cev je postavljena za meritve presekov za izmenjavo naboja (IN) pri trkih VNI z atomi in molekulami, ki sestavljajo plinsko tarčo. Končni del žarkovne cevi eksperimenta za meritve presekov za IN je prikazan na sliki 2.

Iz vpadnega ionskega curka s tremi zaslonkami (A) definiramo ozek in dobro usmerjen ionski curek. Ioni nato preletijo celico (Collision Cell), v katero uvajamo tarčni plin. V celici pride do trkov, pri katerih vpadni ion zajame enega ali več elektronov. Večina teh novih ionov nadaljuje pot z malo spremenjeno hitrostjo do sistema dveh zaviralnih elektrod (RA). Novonastali ioni imajo približno enako energijo kot vpadni, toda različen naboj in jih zato enostavno med seboj ločimo z zaviranjem v električnem polju. Tako ione v določenem



Slika 2: Shema eksperimenta za določanje presekov za izmenjavo naboja

nabojnem stanju izločamo iz prepuščenega ionskega curka. Intenziteto prepuščenega curka merimo z elektrometrom v posebnem ionskem kolektorju (FC). Iz merilnih podatkov, kot so: ionski tok za različne vrednosti zaviralnega potenciala, pritisk in temperatura plina-tarče, lahko določimo absolutni presek za izmenjavo naboja. Ti so navadno velikostnega reda 10^{-15} cm². Na steni plinske tarčne celice je majhna odprtina, nasproti katere postavimo detektor (Ortec, IGLET HPGE) nizkoenergijskega rentgenskega sevanja (fotoni energije nad približno 400 eV). Tako lahko tudi merimo spektre emitiranih fotonov iz procesa IN. Ioni po IN so praviloma v vzbujenem stanju in spekter izsevanih fotonov kaže, katero je začetno in končno stanje iona in tudi kakšna je porazdelitev začetnih stanj.

3 Vsebina meritev

Precej časa smo porabili za pripravo pogojev za učinkovito pridobivanje dovolj intenzivnih curkov ionov železa. Zaradi posebnega pomena teh ionov za astrofiziko je poznanje različnih lastnosti le-teh zelo pomembno, zato bodo v laboratoriju nadaljevali začete raziskave. Obvladali smo tehniko rutinskega pridobivanja curkov ionov železa do Fe¹³⁺, pri čemer smo kot delovno snov v ECR plazmi uporabljali hlape organske spojine ferrocene, Fe(C₅H₅)₂.

Meritve presekov za spremembo nabojnega stanja VNI pri trkih z atomi in molekulami

Merili smo preseke za enojno in dvojno zajetje elektrona pri trku ³He²⁺ in molekul CO v območju vpadne energije od 4 do 14 keV. Te meritve smo opravljali zaradi konkretne potrebe pri razlagi razmerij helijevih črt v spektrih kometov Hyakutake in Hale-Bopp. Največji del pozornosti in časa smo posvetili meritvam z ioni železa. Merili smo preseke za IN pri trkih ionov Fe⁵⁺ do Fe¹³⁺ s He, CO in CO₂ pri vpadni energiji 7 keV. Pri tem smo vzporedno tudi izboljševali metodo. Ker trki omenjenih ionov železa nimajo dovolj energije za vzbujanje sevanja v območju, ki ga obstoječi detektor lahko zazna (nad okoli 450 eV) med mojim obiskom nismo merili fotonov. Opravili smo tudi nekaj meritev presekov za IN pri trkih ionov kisika, ogljika in dušika s CO.

Meritve presekov za vzbujanje VNI z elektronskim trkom

Te meritve so posebno zahtevne, ker je treba pazljivo prekriti curek ionov in curek elektronov. To dosežemo s transversalnim električnim poljem, ki skupaj z vzdolžnim aksialnim magnetnim poljem omogoča premik elektronskega curka. Poleg tega je za te meritve pomembno poznati vsebino metastabilnih ionov v tarčnem ionskem curku. To določamo s klasično atenuacijsko metodo, kar ima pri VNI svoje dodatne težave, ki smo jih z modifikacijami poskušali rešiti. Trajna rešitev tega problema bo postavitve posebnega dodatnega eksperimenta. Med mojim obiskom smo končali meritve preseka za prehod $2s^2 2p^2 \ ^3P_{0,1,2} \rightarrow 2s^2 2p^2 \ ^1D_2$ v ionu O²⁺ in nato merili presek za vzbujanje nivoja fine strukture osnovne konfiguracije iona Fe⁹⁺, $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3p^5 \ ^2P_{1/2}$. Čas ni omogočal, da bi opravili prej načrtovane meritve presekov za prehode $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3s3p^6 \ ^2S_{1/2}$ in $3p^5 \ ^2P_{3/2} \rightarrow 3p^4 3d \ ^4D$ v istem ionu.

Meritve dobe trajanja metastabilnih ionov

Med mojim obiskom v JPL-ju smo merili dobe trajanja naslednjih metastabilnih ionov: $2s^2 2p^2 \ ^1S^o$ v O²⁺, $2s2p^3 \ ^5S_2$ v Mg⁶⁺, $3s^2 3p^5 \ ^2P_{1/2}$ v Fe⁹⁺, $3s^2 3p^3 \ ^2D_{3/2}$ v Fe¹¹⁺ in $3s^2 3p \ ^2P_{3/2}$ v Fe¹³⁺.

Pulzno določanje vsebine metastabilnih ionov v vpadnem curku

Za meritve lastnosti VNI moramo vedeti, ali in koliko metastabilnih ionov je v tarčnem curku. Kot sem omenil, za to uporabimo klasično atenuacijsko metodo, pri kateri opazujemo spremembo intenzitete curka ob spremembi gostote plina v posebni celici na poti ionov. Če so preseki za ionske reakcije močno različni za različna ionska stanja, tedaj iz lastnosti eksponencialnega zmanjševanja intenzitete curka enostavno določamo relativni prispevek vzbujenih delcev. Pri uporabi te metode se pojavita dve težavi, ena bolj tehnične narave, druga pa je bolj bistvena. Prva je, da plin, ki ga uvajamo za analizo, zaradi omejene hitrosti črpanja vakuumskih črpalk, pride tudi v ionski izvir in s tem vpliva na njegovo delovanje in povzroča nezanesljivost dobljenih podatkov. Druga težava je praktična neuporabnost metode, kadar preseki niso bistveno različni za različna stanja. To je primer pri VNI, ko pogosto sami detajli elektronskega vzbujanja ne vplivajo na glavne procese z velikimi preseki, ki se dogajajo na velikih razdaljah od ionskega centra. Elegantna rešitev prve težave je bila impulzno uvajanje plina za analizo curka, tako da se analiza atenuacije lahko naredi, še preden motnja vpuščenega plina prispe do ionskega izvira. Zato smo uporabili hitri piezo ventil. Druga težava je veliko bolj bistvena, zato smo pričeli priprave za postavitve posebnega eksperimenta, s katerim bo mogoče opraviti analizo energije ionov po trku s tarčnim plinom in iz spektra le-teh analizirati sestavo ionov v curku.

4 Sklep

Trki atomskih delcev, atomov, molekul, elektronov in fotonov so izredno široko in zanimivo polje raziskav. Velikanski razvoj opazovalnih zmogljivosti v astronomiji, ki smo mu priča zadnja leta, je dal novo motivacijo za laboratorijske meritve in teoretične izračune presekov za atomske reakcije, kakor tudi lastnosti atomskih delcev. Kakor vesoljska opazovanja postajajo vse bolj natančna in kompleksna tako tudi modeli, ki astrofizične fenomene opisujejo, potrebujejo vse bolj kompleten in natančen sklop podatkov za vse večje število konkretnih reakcij. Za pridobivanje različnih in zanesljivih podatkov se eksperimentalno in teoretično delo prepletata in medsebojno preverjata ter izpopolnjujeta. Tu smo predstavili vsebinsko in na kratko tudi tehnično meritve presekov za izmenjavo naboja in elektronsko vzbujanje ter dob trajanja ionov, ki smo jih opravljali v preteklem letu v Laboratoriju za reaktivni pogon v Pasadeni, Kalifornija. Opisane raziskave so del trajnega programa študije lastnosti večkratno nabitenih ionov, ki so zanimive za astrofiziko.

5 Literatura

- 1/ Chutjian A., Greenwood, J.B. and Smith, S.J., Applications of Accelerators in Research and Industry (Eds. J.L.Duggan and I.L.Morgan) AIP Conf.Proc. 475, New York, 1999, s. 881
- 2/ Lisse et al., 1996 Science 274 s. 205

Laboratorij za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory) v Pasadeni, Kalifornija, ZDA

Laboratorij za reaktivni pogon (Jet Propulsion Laboratory, JPL) vodi znamenita univerza California Institute of Technology (Caltech) po pogodbi in za potrebe ameriške Nacionalne administracije za aeronavtiko in vesolje (National Aeronautics and Space Administration, NASA). JPL je zelo velika ustanova - približno 6000 vrhunskih znanstvenih, strokovnih in tehničnih sodelavcev. Nahaja se v vznožju hribovja San Gabriel kakšnih 30 km severno od centra Los Angelesa, v Pasadeni.

Sedanji JPL je nastal iz eksperimentalnega poligona za izstrelitve raket, ki so jih razvijali na Caltech-u. Osnova ga je leta 1936 znani strokovnjak za raketno tehniko Theodore von Kármán, ki je bil tudi njegov prvi direktor do leta 1946. Od svoje pridružitve k Nasi, leta 1958, je JPL postal vodilna ameriška ustanova za raziskovanje vesolja s sondami brez človeške posadke. Prvi v tem nizu je bil ameriški umetni satelit Explorer 1, ki so ga izdelali, lansirali in vodili strokovnjaki JPL-ja. Nato je sledila serija odmevnih samodejnih sond Ranger, Surveyor in Mariner, ki so pošiljale podatke o Luni, medplanetarnem prostoru ter o planetih Merkur, Venera in Mars. Vsekakor se živo spominjamo tudi kasnejših poletov sond Voyager (opazovanje in slikanje zunanjih planetov Sončevega sistema) in Galileo (Jupiter). V teku sta odpravi Ulysses (raziskovanje Sonca) in Cassini (Saturn) pri katerih sodelujejo z Evropsko vesoljsko agencijo (ESA). Sedaj je območje dejavnosti raziskav v JPL-ju izredno široko, od znanosti o Zemlji (natančne meritve temperature morja so pripeljale do odkritja fenomena el niño, precizna geodetska opazovanja, natančna radarska altimetrija), preko meritev v prostoru okoli Zemlje, opazovanj Sonca in raziskav planetov (posebno intenziven je program raziskovanja Marsa) in satelitov Sončevega sistema do iskanja planetov v drugih zvezdnih sistemih in opazovanj najbolj oddaljenih objektov vesolja.

Ključnega pomena za uspešnost raziskav vesolja je omogočanje telekomunikacij med Zemljo in sondami, od katerih so nekatere ekstremno daleč, na samem obrobju Sončevega sistema. To je tudi eden od pomembnih prispevkov JPL-ja, ker vodi Nasino omrežje daljnega vesolja (Deep Space Network). To omrežje sestavljajo 34- in 70-metrске antene po vsem svetu, ki so povezane s kontrolo v JPL-ju.

Uspešno realizacijo tako ambicioznih projektov omogoča široko sodelovanje s številnimi drugimi institucijami iz ZDA kakor tudi mednarodno sodelovanje z Evropo (ESA), Rusijo, Japonsko. Mnoge detajle o dejavnostih laboratorija lahko najdemo na njihovi zelo obiskani spletni strani www.jpl.nasa.gov. Laboratorij izdaja tudi dvotedenski informativni bilten Universe, v katerem so opisana posamezna aktualna dogajanja v raziskovalnem in družbenem življenju laboratorija. Tudi Universe je dostopen preko spletne strani JPL-ja.

JPL je izredno prijeten kraj za delo. Življenje in delo v laboratoriju je posvečeno omenjenim skrajno ambicioznim in zahtevnim projektom, ki so precizno usmerjeni ter lokaliziranim meritvam. Večina tistega, kar delajo, je na meji znanega in mogočega in zato zahteva izredno ustvarjalnost, ugodne razmere, zelo strogo načrtovanje in še posebno izredno kontrolo kakovosti. Ko je neka sonda lansirana, tedaj je zelo težko delati korekcije in odpravljati pomanjkljivosti. Delovanje sonde mora biti zanesljivo veliko let. Zaradi proračunske narave virov financiranja tovrstnih raziskav je JPL zelo odprt za stike z javnostjo. Vedno prihajajo skupine obiskovalcev, ki se seznanjajo z njegovo dejavnostjo, redna so odmevna predavanja in podobno. Posebno pomemben dogodek s tega področja je dan odprtih vrat, ki ga laboratorij prireja enkrat na leto, v maju. Takrat množica obiskovalcev hodi po posameznih laboratorijih, se pogovarja z raziskovalci, ki delajo na projektih, študirajo zanimive posterje. Veliko pozornosti posvečajo tudi mladim,

ki se udeležujejo tekmovanj s samostojno izdelavo robotov in podobno.

Poleg aktivnosti v samem laboratoriju je zelo razgibano tudi sodelovanje z zasebnimi podjetji, ki uporabljajo visoko tehnologijo. Pogosto se dogaja, da se izvrstni strokovnjaki odločajo za samostojno delo in sodelovanje JPL-jem v obojestransko korist. Posebnost vesoljskih raziskav je skrajna racionalizacija mase in energetske porabe posameznih komponent, ki jih vgrajujejo v sonde. Ta aktivnost na miniaturizaciji vodi do novih merških metod in instrumentov. Delo je podobno tistemu, ki ga eksperimentalni fiziki opravljamo, ko razvijamo lastna raziskovalna orodja.



Slika 3: Pogled na laboratorije JPL v Pasadeni

VAKUUM IN PLAZMA V ZEMELJSKI ATMOSFERI

Miha Čekada, Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

Vacuum and Plasma in Earth Atmosphere

ABSTRACT

In this paper, the composition and structure of Earth atmosphere is described. Emphasis is given on the chemical reactions in stratosphere and ionosphere, the vacuum environment in the area where manned spacecraft orbit, as well as examples of plasma in nature.

POVZETEK

V prispevku je opisana sestava in struktura zemeljske atmosfere. Natančneje so opisane kemijske reakcije v stratosferi in ionosferi, vakuumsko okolje v orbiti, kjer krožijo sonde s človeško posadko, in primeri plazme v naravi.

1 Uvod

V prejšnji številki Vakuumista smo opisali vakuum v vesolju, pomudili smo se tudi pri atmosferah drugih planetov. V tem prispevku pa bomo natančneje opisali atmosfero na Zemlji. S stališča vakuumske znanosti je najbolj zanimivo dogajanje v zgornjih plasteh atmosfere, saj so tam razmere do neke mere podobne kot v vakuumskih napravah v laboratoriju. Vsem tako poznano vremensko dogajanje je omejeno le na najnižji sloj atmosfere, ki pa nekako ne spada v okvir vakuumistike. Po kratkem opisu zemeljske atmosfere kot celote se bomo podrobneje posvetili nekaj izbranim temam.

Prve meritve in hipoteze o fiziki višjih plasti atmosfere niso starejše od 150 let [1]. To so bili prvi poleti z balonom v stratosfero, pojav nepredvidenih električnih tokov po telegrafskih vodnikih in vzpostavitev medcelinske radijske povezave. Le-ta je napeljevala na razlago, da se radijski valovi odbijejo od neke prevodne plasti v atmosferi, in že ob prelomu stoletja je bila postavljena hipoteza o plasti prostih elektronov in ionov v zgornji atmosferi. Danes ji pravimo ionosfera. Iz čisto praktičnih razlogov (prekinitev električnega toka v omrežju, prekinjena telegrafska zveza) pa so raziskovali motnje v zemeljskem magnetnem polju in s tem povezane električne tokove. Sčasoma so prišli do spoznanja, da je v precejšnji meri za te pojave odgovorna trenutna aktivnost Sonca. Do natančnejše slike je bilo treba počakati do petdesetih in šestdesetih let, ko so lahko izvedli prve in-situ meritve zgornjih plasti atmosfere.

2 Sestava in struktura zemeljske atmosfere

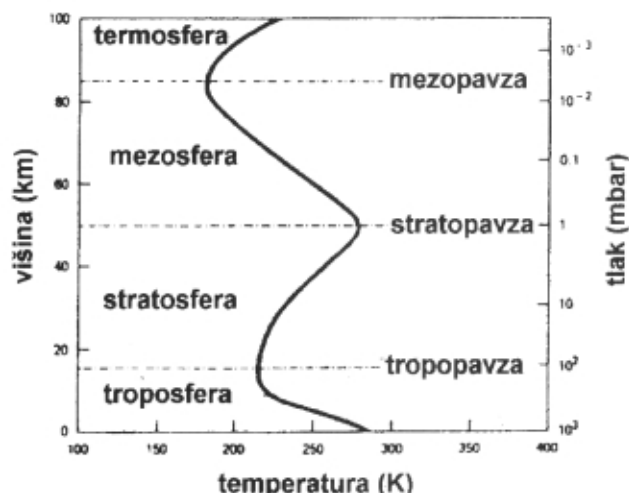
Ob nastanku Zemlje pred 4,5 milijardami let je bila zemeljska atmosfera popolnoma drugačna od današnje. Velike količine vodika in helija, nabrane iz prvotnega protoplanetarne oblaka, so sčasoma zapustile Zemljino privlačno polje. Razlog je v majhni molski masi in s tem povezano veliko hitrostjo molekul. Zemljina gravitacija je prešibka oz. ubežna hitrost premajhna, da bi jih lahko zadržala.

Vsi težji plini so prišli v atmosfero ob vulkanskih izbruhih, pretežno z razplinjanjem magme. Ti procesi v manjši meri potekajo še danes. Najpomembnejši plini

so bili vodna para (H₂O), ogljikov dioksid (CO₂), žveplov dioksid (SO₂) in molekularni dušik (N₂). V zemeljski zgodovini pa se je sestava bistveno spremenila. Vodna para je kondenzirala in se začela zbirati v oceanih. Ogljikov dioksid se je raztopil v vodi, reagiral s kalcijevimi in magnezijevimi ioni ter tvoril karbonatno oborino, kalcit - CaCO₃ in dolomit - (Mg,Ca)CO₃. Žveplov dioksid je reagiral z vodno paro in v obliki kislega dežja (H₂SO₄) zapustil atmosfero. Edini primarni plin, ki je ostal do danes v atmosferi, je dušik, ki je kemijsko inerten in netopen v vodi [1].

Ves kisik v današnji atmosferi je plod biogene dejavnosti, natančneje fotosinteze. K odlaganju karbonatnih kamnin in s tem odnašanju CO₂ iz atmosfere so tudi odločilno pripomogli morski organizmi. S slabim odstotkom volumskega deleža je argon tretji najpogostejši plin v zemeljski atmosferi. Nastal je radiogeno, in še vedno nastaja, z β-razpadom kalijevega izotopa ⁴⁰K. Navsezadnje moramo še omeniti antropogeni prispevek, torej pline, ki so prišli v atmosfero kot plod človekove aktivnosti. Predvidevajo, da je bila koncentracija CO₂ v predindustrijski dobi okrog 280 ppm, kar je za slabo petino manj od današnje vrednosti. Še posebej se ta aktivnost pozna pri plinih v sledovih, najbolj znan primer so klorofluorogljiki, ki jih prej v naravi ni bilo. V tabeli 1 je podana sestava zemeljske atmosfere ob površju.

Čeprav se podatki po literaturnih virih precej razlikujejo, je ustaljena delitev atmosfere na štiri sloje: troposfero, stratosfero, mezosfero in termosfero. Vmesne plasti imenujemo tropopavza, stratopavza in mezopavza. Ta delitev sloni na temperaturnem profilu (slika 1). **Troposfera** se razteza od gladine morja do nekako 10 - 15 km višine. Za primerjavo: Mt. Everest je visok 9 km, komercialni letalski poleti pa potekajo le nekaj kilometrov višje. Temperatura z višino pada, kot smo vajeni iz vsakdanjega življenja. **Stratosfera** se razteza med 10 in 50 km višine, zanjo pa je značilna plast ozona, ki absorbira ultravijolično sevanje iz vesolja,



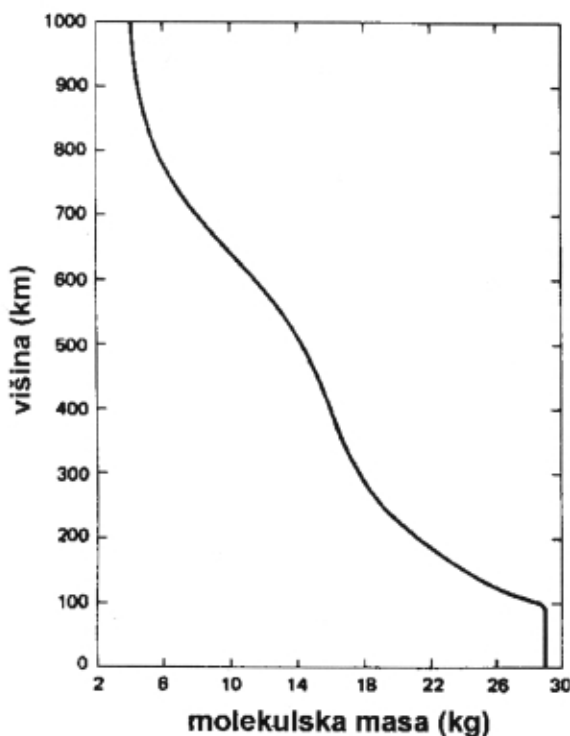
Slika 1: Temperaturni profil zemeljske atmosfere in osnovna delitev na štiri sloje [1]

zato v stratosferi zaradi absorpcije temperatura raste z višino. Med 50 in 80 km se razprostira **mezosfera**, kjer temperatura spet pada. Nad mezosfero je obširna **termosfera** (80 - 1000 km), kjer temperatura ponovno naraste, tja do 2000 K. V spodnjem delu termosfere, imenovanem ionosfera, prihaja do močne absorpcije v ultravijoličnem in rentgenskem področju in s tem povezano ionizacijo molekul. Včasih navajajo še eksosfero, ki z vrha termosfere zvezno preide v medplanetarni prostor /2/. Orbite vesoljskih sond s človeško posadko so na višini 250 - 500 km.

Padanje tlaka z višino do približno 120 km dovolj dobro podaja barometrična enačba:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}z}$$

kjer je p_0 tlak na površju Zemlje (1013 mbar), M povprečna molekulska masa, g težni pospešek, T temperatura, R splošna plinska konstanta in z višina. V tem področju je stalno razmerje plinov, povprečna molekulska masa je konstantna (slika 2), zato to področje tudi imenujejo homosfera. V višjih plasteh (heterosfera) pa se povprečna molekulska masa močno spreminja.



Slika 2: Profil povprečne molekulske mase /8/

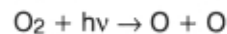
Med fizikalno najpomembnejšimi pojavi v atmosferi, in s stališča vakuumistike najbolj zanimivimi, kaže natančneje opisati kemijske reakcije v stratosferi in ionizacijske procese v ionosferi.

3 Ozonska plast

Tropopavza, področje prvega temperaturnega minimuma na višini 10 - 15 km, učinkovito ločuje stratosfero od troposfere. Zato je vremensko dogajanje v glavnem omejeno le na troposfero. Tudi Zemljino površje - oceani in kontinenti - na stratosfero nimajo bistvenega vpliva. Absorpcija ultravijolične svetlobe v stratosferi pote-

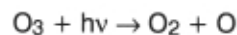
ka skoraj izključno v kisiku oziroma ozonu, čeprav je volumski delež ozona le okrog 10 ppm na višini 25 km, kjer ga je največ. Ta proces ščiti živa bitja na Zemlji pred UV-svetlobo iz vesolja.

Tvorba ozona poteka v dveh stopnjah /1/:

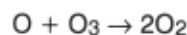


kjer je M neka tretja molekula, potrebna za ohranitev energije in gibalne količine.

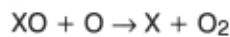
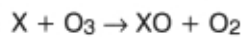
Ozon razpada na tri načine: z absorpcijo ultravijolične svetlobe:



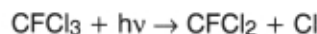
lahko reagira z atomarnim kisikom:



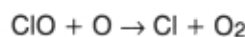
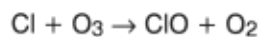
ali pa katalitsko preko $X=Cl, OH$ ali NO :



Naštete kemijske reakcije so le najpomembnejše, saj sodeluje še mnogo drugih molekul in ionov. V zadnjem času žal postaja vse pomembnejši zadnji proces, in sicer zaradi antropogenih emisij klorofluorogljikov (CFC-jev, freonov). Za primer si pogledjmo CFC_3 s komercialno oznako CFC-11:



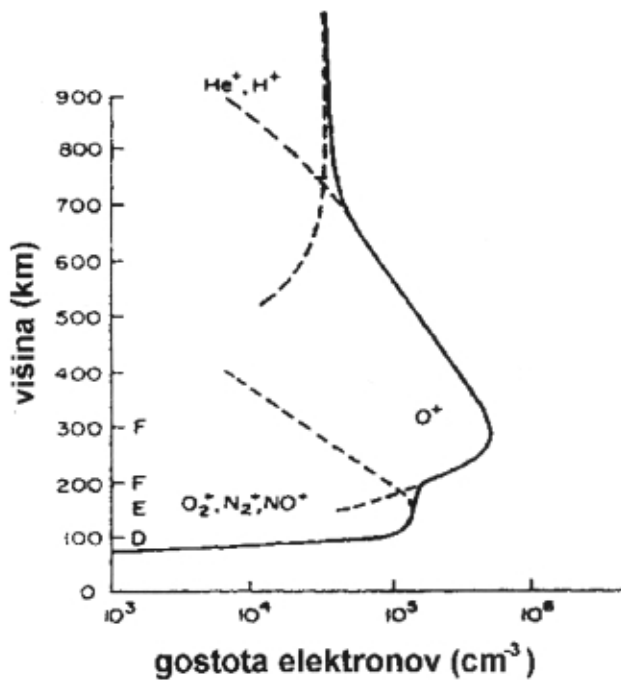
Sproščeni klor pa katalizira razpad ozona:



Na kratko si pogledjmo še toplotno bilanco atmosfere. Gostota svetlobnega toka s Sonca je 1340 W/m^2 . Od tega se 35 % svetlobnega toka odbije nazaj v vesolje, 47 % absorbira na površju in oceanih, v atmosferi pa le 18 %. Atmosfera je torej relativno dobro prepustna za vidno svetlobo, ne pa tudi za infrardečo, ki jo sekundarno emitira segreto površje Zemlje. Zaradi slabe prepustnosti atmosfere za infrardečo svetlobo je povprečna temperatura zemeljskega površja za 33°C višja od ravnovesne temperature črnega telesa, izpostavljenega takemu svetlobnemu toku. Govorimo o pojavu tople grede. Najpomembnejši toplogredni plin je vodna para, za velikostni red manj pa CO_2 in nekateri drugi plini (O_3, CH_4 in N_2O) /3/.

4 Ionosfera

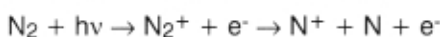
Glede obsega ionosfere ni enotnega mnenja v literaturi. Saj je tudi definicija bolj nejasna, da je ionosfera tisti del atmosfere, kjer je »precej« prostih elektronov in ionov. Spodnjo mejo se postavlja med 60 in 90 km, zgornjo pa od 250 do 1000 km. Opišemo jo lahko kot šibko ionizirano plazmo z naslednjimi značilnimi parametri (velja za višino 120 km): tlak 10^{-5} mbar, gostota ionov 10^5 cm^{-3} , gostota nevtralov 10^{11} cm^{-3} , stopnja ionizacije pa nikjer ne preseže 10^{-6} . V spodnjih slojih, tja do 200 km (imenujemo ju D- in E-sloji), prevladujejo molekularni ioni O_2^+, N_2^+ in NO^+ , medtem ko je višje (F-sloji) pretežno enoatomarni O^+ (slika 3) /1/.



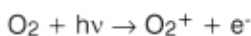
Slika 3: Profil številske gostote elektronov in pripadajočih ionov [1]

Tudi pri gostoti nevtralov so precejšnje razlike. Medtem ko se sestava troposfere in stratosfere praktično ne spreminja z višino, pa v ionosferi delež nevtralnih molekul hitro pada. V F-sloju je tako najpomembnejši nevtral atomarni kisik. Še višje pa postaneta pomembna helij in vodik. Zanju je zanimivo, da je koncentracija ob površju praktično zanemarljiva, z višino pa le neznatno pade.

Medtem ko potekajo reakcije v stratosferi z absorpcijo bližnje ultravijolične in delno vidne svetlobe, pa je v ionosferi v igri daljnja ultravijolična in mehka rentgenska svetloba. Ozon tukaj ne igra nobene vloge. Ključni reakciji sta fotodisociacija dušika:



in kisika:



K tem je treba prišteti še ustrezne rekombinacije in reakcije med posameznimi reaktanti, kamor spada tudi tvorba molekulskega iona NO^+ . Če upoštevamo še manj pogoste molekule, število teh reakcij močno naraste, tako da je dogajanje v ionosferi le delno raziskano. V tem gre tudi iskati dejstvo, da je vpliv antropogenih plinov na atmosfero še slabo poznan. Mnogo slednih plinov v zemeljski atmosferi nastaja pri fotodisociaciji (tabela 1). Ionosfera je zelo nestalna. Njene lastnosti se spreminjajo z geografsko širino, dnevom/nočjo, letnim časom in je povezana z dogajanjem v magnetosferi.

Poznanje razmer v zunanjih plasteh zemeljske atmosfere je zelo pomembno za vesoljske polete, še posebej za področje med 250 in 500 km, kjer navadno krožijo sonde s človeško posadko. Prva težava je razplinjanje sten sonde, ki nekajkrat poveča tlak v neposredni

Tabela 1: Sestava atmosfere pri površini Zemlje [1]

plin	delež (vol.)	izvir
glavne sestavine		
dušik	N ₂	78,08 % vulkanski, biogeni
kisik	O ₂	20,95 % biogeni
argon	Ar	0,93 % radiogeni
voda*	H ₂ O	0 - 4 % vulkanski, evaporacija
ogljikov dioksid	CO ₂	0,034 % vulkanski, biogeni, antropogeni
plini v sledovih		
neon	Ne	18 ppmv vulkanski
helij	He	5,2 ppmv radiogeni
metan	CH ₄	1,7 ppmv biogeni, antropogeni
kripton	Kr	1 ppmv radiogeni
vodik	H ₂	0,5 ppmv fotokemični, biogeni
didušikov oksid	N ₂ O	0,3 ppmv biogeni, antropogeni
kсенon	Xe	0,1 ppmv radiogeni
ogljikov monoksid	CO	<0,2 ppmv antropogeni, biogeni, fotokemični
ozon	O ₃	<0,1 ppmv fotokemični
nekateri drugi plini pod 0,1 ppmv		
dušikov dioksid	NO ₂	<0,3 ppbv fotokemični, antropogeni
žveplov dioksid	SO ₂	0,2 ppbv vulkanski, antropogeni, fotokemični
CFC-ji (skupaj)	C _x F _y Cl _z	0,8 ppbv antropogeni

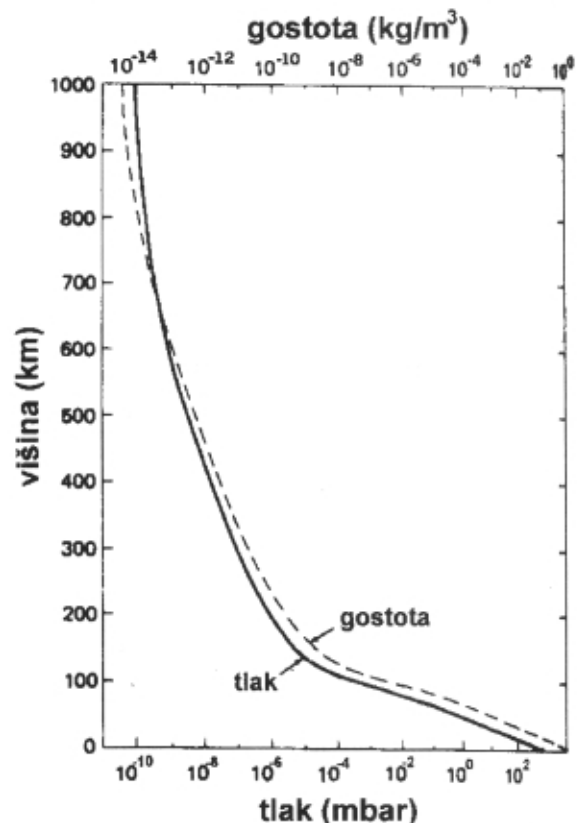
*Odstotki se razen pri vodi nanašajo na suh zrak.

ppmv = volumski delež proti milijon

ppbv = volumski delež proti milijardi

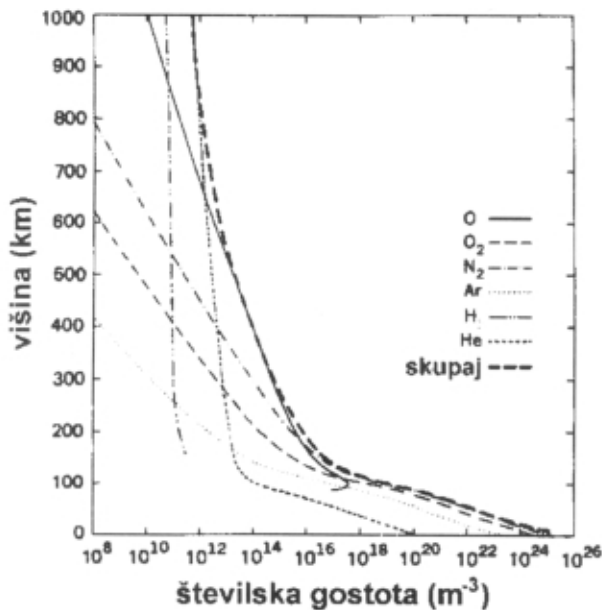
bližini. Hlapne komponente se utegnejo redeponirati na hladne dele sonde - senzorcje, objektivne ipd., zato je zelo pomembna izbira primernih materialov. Neprimeri so polimeri, pa tudi nekatere kovine, npr. cink [4].

Pogosto slišimo, da so v vesolju zelo primerne razmere (breztežnost, vakuum) za določene nove tehnologije. Pa je res tako? Na višini, kjer krožijo sonde s človeško posadko, je tlak 10⁻⁸ mbar (slika 4), kar v laboratoriju (na Zemlji) dosežemo brez večjih težav. Večji del preo-

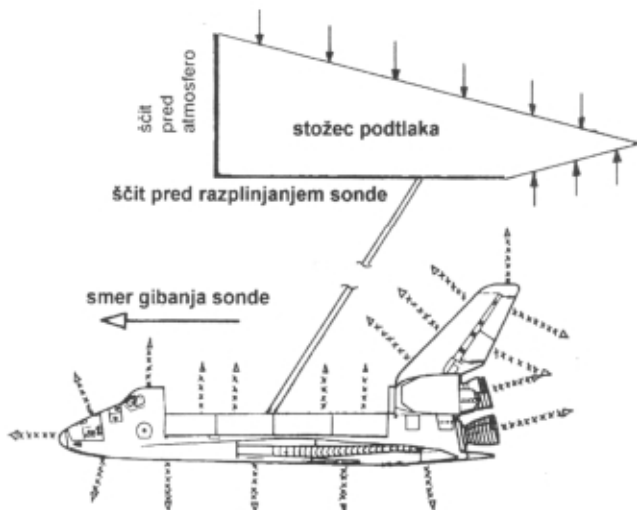


Slika 4: Profil tlaka in gostote [8]

stalih plinov je atomarni kisik (slika 5), ki je zelo reaktiven. Če želimo doseči vakuumsko okolje, kjer bo tlak precej nižji od laboratorijskega, moramo poskrbeti za dvoje (slika 6). Prvič, da preprečimo kontaminacijo zaradi razplinjanja sten, mora eksperiment potekati dovolj stran od sonde. In drugič, s primerno oviro v smeri gibanja sonde moramo zagotoviti senčenje. Ker je hitrost kroženja sonde okoli Zemlje nekajkrat večja od hitrosti gibanja molekul, nastane za oviro stožec izrazito znižanega tlaka. Šele v tem področju, torej za oviro in daleč od sonde, so primerne razmere ekstremno visokega vakuumu.



Slika 5: Profil številke gostote za najpomembnejše pline [8]

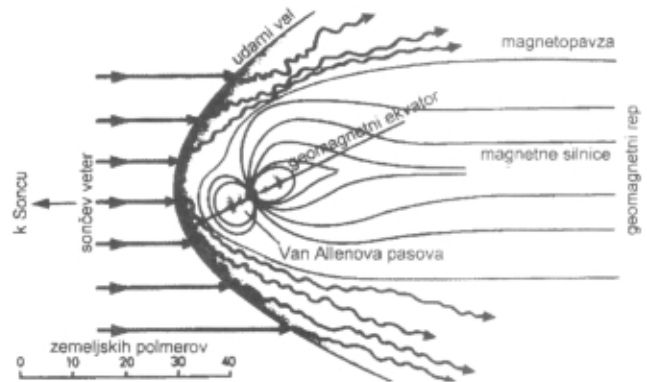


Slika 6: Priprava ekstremno visokega vakuumu v orbiti [4]

5 Magnetosfera

V prejšnji številki Vakuumista smo opisali sončev veter in omenili njegovo interakcijo z magnetnim poljem Zemlje. Zdaj si to pogledimo malo podrobneje. V gro-

bem lahko magnetno polje Zemlje opišemo kot dipol z magnetno poljsko gostoto na površini $50 \mu T$. Sončev veter, tok nabitih delcev s Sonca, se širi v medplanetarni prostor. Interakcija med sončevim vetrom in Zemljino magnetosfero je podobna preletu nadzvočnega izstrelka. Na prisiončni strani je udarni val (slika 7). Relativno nespremenjeno dipolno polje Zemlje obdaja kometu podobna magnetopavza, na prisiončni strani je debela deset Zemljinih polmerov, na odsončni strani pa odprta. Tokovnice sončevega vetra se na udarnem valu močno deformirajo in v vmesnem področju med magnetopavzo in udarnim valom obidejo Zemljo. Razmere v magnetosferi niso konstantne, predvsem so odvisne od Sončeve aktivnosti.



Slika 7: Zemljiska magnetosfera [9]

Nabit delci najlaže vstopijo v notranje plasti magnetosfere v bližini polov, kjer so silnice Zemljinega magnetnega polja najgostejše. Na višini 100 - 500 kilometrov reagirajo z atomi in molekulami v ionosferi ter jih vzbudijo oz. ionizirajo. Pride do emisije v vidnem, pa tudi UV- in IR-področju. To je polarni sij (aurora) [1/, /5/.

Območje blizu ekvatorialne ravnine deluje kot magnetna steklenica za nabite delce. To sta t. i. Van Allenova pasova, kjer je pretok nabitih delcev do $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Tako močno sevanje je lahko smrtno nevarno za astronaute, zato so morali pri načrtovanju poletov na Luno upoštevati velikost Van Allenovih pasov.

6 Dva primera plazme

Na koncu si pogledimo še, kje na Zemlji lahko v naravi najdemo plazmo. Omenili smo že ionosfero, dobro poznan primer je strela pri nevihti, manj pa je znano, da so tudi *meteorji* (utrinki) plazma. Že v prejšnji številki Vakuumista smo omenili *meteoroidne*, to so drobci, ki krožijo okrog Sonca; njihova hitrost je velikostnega reda nekaj deset km/s. Ko tako telo vstopi v zemeljsko atmosfero, se zrak pred njim močno segreje in ionizira, delno zaradi kompresije, delno pa zaradi tvorbe udarnega vala (hitrost meteoroida je seveda nadzvočna). Vsekakor pa ne drži razširjena trditev, da »se meteoroid segreje zaradi trenja z zrakom«. Meteoroid se segreje do te mere, da začne material izparevati s površine, tako da lahko v spektru meteorja poleg črt plinov zaznamo tudi črte nevtralnih in ioniziranih atomov silicija, kalcija itd. Velika večina meteoroidov izpari v atmosferi, le dovolj veliki padejo na površino Zemlje, imenujemo jih *meteoriti* [6/.

Navadni meteorji zasvetijo na višini okrog 100 km, pri čemer je njihova sled dolga nekaj kilometrov, široka pa le nekaj metrov. T.i. bolidi ali ognjene krogle razpadejo na višinah 20 - 50 km. Za močnejšimi meteorji ostane plazemska sled še nekaj minut, tako da uspejo radioamaterji preko nje vzpostaviti radijsko zvezo.

Še danes ni enotne razlage, kakšen je v detajlih proces ločitve naboja v oblakih, ki povzročata nastanek strele. Vsekakor pa se večji delci pretežno nabijejo negativno, manjši pa pozitivno. Delo, ki je potrebno za ločitev nabojev, opravi sila teže. Tako je v splošnem spodnji nivo oblakov nabit negativno, zgornji pa pozitivno. Pri tem pa oblaka ne smemo gledati izolirano, temveč kot del širšega, med seboj povezanega sistema: oblaki v troposferi - ionosfera - magnetosfera. Ionosfera je prevodna in tokovi, ki tečejo po njej, so močno odvisni od trenutnih razmer v magnetosferi. Zato tudi udarec strele ni zgolj razelektritev med spodnjim delom oblakov in zemljo, temveč ga včasih spremljajo pojavi precej višje, v grobem lahko govorimo o razelektritvah med oblaki in ionosfero. Zanimivo je, da so njihov obstoj potrdili šele leta 1990 /7/.

Na kratko si še pogledimo, kako nastane strela, čeprav si ta, edini pojav plazme v neposrednem človekovem naravnem okolju gotovo zasluži poseben članek v eni prihodnjih števil. S prej omenjenim ločevanjem nabojev v nevihtnem oblaku naraste napetost med spodnjim delom oblaka in zemljo na nekaj deset milijonov voltov. Ko je električno polje dovolj veliko, začnejo pospešeni elektroni ionizirati molekule zraka. Kanal plazme se začne kaskadno širiti proti tlom. Ko je »pot« med oblakom in zemljo sklenjena, pride do glavnega udarca, kjer v 200 μ s steče tok 10.000 A. Kanal plazme se močno segreje in še dodatno ionizira, zaradi udarnega vala vročega zraka pa nastane grom. Po glavnem udarcu ostane kanal še dovolj dolgo ioniziran, da lahko po isti poti sledi še več dodatnih, šibkejših udarcev.

7 Sklep

Zemeljska atmosfera nima jasno določene meje, temveč zvezno preide v medplanetarni prostor. Na višini, kjer krožijo sonde s človeško posadko, je tlak v področju ultravisokega vakuumu. Še posebej pomembno pa je, da je naša atmosfera zelo nehomogena, tako

po sestavi, kot po procesih, ki se odvijajo v posameznih plasteh. Velja si tudi zapomniti, da na Zemlji naletimo na plazmo v štirih primerih: v ionosferi, ki obkroža celo Zemljo, v polarnem siju, v meteorjih (utrinskih) in v strelah med nevihto.

8 Literatura

- /1/ Encyclopedia of Physical Science and Technology, Academic Press, Orlando, 1987
- /2/ V. Vujnovič, *Astronomija* 1/2, Školska knjiga, Zagreb, 1989/90
- /3/ P. Warneck, *Chemistry of the Natural Atmosphere*, vol. 41 of International Geophysics Series, Academic Press, London, 1988
- /4/ P. Kleber, Proc. IX Internat. Vac. Congress-V Internat. Conf. Solid Surf., Asociacion Española del Vacio y sus Aplicaciones, ur. J.L. de Segovia, Madrid, 1983, 264
- /5/ W. Winnenburger, *Humboldt-Astronomie-Lexikon*, Humboldt Taschenverlag Jacobi, München, 1990
- /6/ M. Triglav, *Meteorji*, DMFA, Ljubljana, 2000
- /7/ S. B. Mende, D. D. Sentman, E. M. Wescott, *Scientific American*, Avg. 1997, 36
- /8/ D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 72nd edition, CRC Press, Boston, 1991-92
- /9/ J. Hermann, *dtv-Atlas zur Astronomie*, Deutsche Taschenbuch Verlag, München, 1990

Pred tremi leti smo v Vakuumistu pisali o ionskih izviri za pogon vesoljskih plovil (Vakuumist 18/4 (1998)). Opisana je bila naprava, ki so jo vgradili v sondo Deep Space 1. Cilj misije je bil preskus 12 novih tehnologij, med njimi na prvem mestu ionskega pogona, in obisk asteroida 9969 Braille. Čeprav je bila misija prvotno omejena na leto dni (oktober 1998 - september 1999), so jo zaradi odličnega delovanja sonde podaljšali še za dve leti in vključili obisk kometa Borrelly. Dne 18. decembra 2001 so izklopili vse instrumente na sondi in s tem je bil projekt zaključen. Ionski motor je deloval 670 dni in v tem času porabil 90 % zalog goriva (ksenona). Ker se je ionski izvir izkazal kot zelo zanesljiv in ekonomičen, ga bodo vgradili v bodočo sondo »Dawn«, ki bo poletela k asteroidoma Ceres in Vesta leta 2006.

ZGODOVINA RAZISKOVANJA TEKOČIH KRISTALOV 2. DEL: UVELJAVITEV TEKOČIH KRISTALOV

Stanislav Južnič*

The History of Liquid Crystals Research Part 2: The Recognition of the Liquid Crystals

ABSTRACT

Liquid crystals as the intermediate or even new states of matter were discovered by biologists. In the second part of the article we describe the acceptance of the discovery among the group of researchers of scientific areas that were called physical chemists.

POVZETEK

Biologi so odkrili tekoče kristale kot vmesno ali celo novo stanje snovi. V drugem delu razprave opisujemo sprejem njihovega odkritja pri skupini raziskovalcev novih področij znanosti, ki so se imenovali fizikalni kemiki.

5.5 Uvod

Praški biolog Reinitzer je odkril (termotropne) tekoče kristale v sodelovanju z številnimi drugimi pomembnimi znanstveniki tedanje habsburške monarhije. Na njegovo odkritje je močno vplivala tudi tehnika mikroskopskega fizika Lehmana.

Lehmann je poznal Reinitzerjeva raziskovanja mešanic amorfnih snovi pri jedkanju stekla že pred začetkom njunega dopisovanja¹. Ko je leta 1888 od nekaj več kot dve leti mlajšega Reinitzerja sprejel poročilo o novi fazi s presenetljivimi lastnostmi, je bil ravno sredi priprav za ureditev svojega poklicnega statusa. Naslednje leto se je zopet lotil raziskav in začel desetletja boj za priznanje novega stanja snovi. Nekateri fizikalni kemiki in kristalografi, povezani s *Zeitschrift für physikalische Chemie*, so mu nasprotovali tudi zaradi Lehmannovih kritik koncepta kristalne mreže, ki je bil (skoraj) splošno uveljavljen že dolgo pred Münchenskim poskusom s sipanjem rentgenskih žarkov leta 1912. Vendar je bil Lehmannov opis novega agregatnega stanja splošno sprejet in je večinoma v veljavi še danes kljub veliki spremembi statusa tekočih kristalov iz laboratorijske posebnosti v vodilno tehnologijo. Lehmannova teorija molekul in kristalov pa danes ni le ovržena, temveč predvsem povsem pozabljena.

5.6 Reinitzerjevo odkritje termotropnih tekočih kristalov v Pragi

Heintz² je med letoma 1850 in 1855 raziskoval taljenje stearina. Poročal je o »dvojnem tališču«, torej o fazi, ki so jo štiri desetletja pozneje imenovali tekoči kristal: »Stearin postane moten med 51 in 52 °C. Pri višji temperaturi kaže prelivajoče se barve, pri 58 °C pa je popolnoma neprozoren. Nad 62,5 °C je staljen in povsem bister.«

Kemik Duffy je leta 1854 potrdil Heintzova opazovanja in pojav pripisal dvema tališčema pri 52 °C in 62,5 °C ter dvema modifikacijama stearina³. Pozneje je Frankenheim objavil, da do dvojnega tališča maščob pride zato, ker se ena od njihovih komponent stali pred drugimi⁴. Podoben opis je pol stoletja pozneje Tammann uporabil za kritiko homogenosti tekočih kristalov.

Tudi drugi biologi so opazili modro barvo pri ohlajanju spojin, pridobljenih iz holesterola, ki bi jih po dotedanjih izkušnjah lahko pričakovali le pri kristalih. Leta 1846 sta Nemca L. Schwendler in E. Meissner pridobila holesterilklorid. Nista mogla izmeriti tališča, saj sta ugotovila, da preide v amorfnost. Podobno je opazil Nemeč O. Lindenmeyer leta 1863. Tudi Berthelot⁵ je imel leta 1859 težave pri določevanju tališča spojin holesterola, ki so se med poskusi vedle podobno kot smole. Lehmann je pol stoletja pozneje trdil, da sta že Berthelot v Parizu in E. Schulze v Zürichu opazila motno raztopino spojin holesterola, kar je Reinitzer upravičeno branil kot svoje odkritje⁶.

Nemški profesor P. Planer je leta 1861 na univerzi v Lvovu v habsburški Galiciji opazil živo vijolično barvo upadajoče in rumeno-rdečo barvo prepuščene svetlobe pri ohlajanju raztopine holesterilklorida. Barva je ob strditvi izgubila. Podoben pojav je opazil tudi Nemeč W. Loebisch (Löbisch) pri holesterilaminu v laboratoriju profesorja Glasevetza na Dunaju leta 1872. Pri taljenju holesterilamina in holesterilklorida je opazil modro-vijolično barvo, podobno fluorescenci žlahtnega opala. Latschinoff je poročal o modri, jeklu podobni barvi srebrove soli holesterolske kisline⁷.

* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehniške fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.

1 Reinitzer, 1885b, 781; Lehmann, 1888, 781

2 Wilhelm Heinrich Heintz je bil rojen leta 1817 v Berlinu, kjer je po doktoratu postal privatni docent. Leta 1851 je postal izredni profesor in leta 1856 redni profesor kemije na univerzi v Halleju. V svojem času je bil najboljši poznavalec kemije maščob (Kelker, 1988, 5; Kelker, 1986, 244)

3 Collings, 1990, 27; Vill, 4; Lehmann, 1888, 196

4 Lehmann, 1888, 751

5 Reinitzer, 1888, 181; Reinitzer, 1908, 217. Parižan Pierre Eugène Marcelin Berthelot (1827-1907) je doktoriral z raziskovanjem naravnih maščob na Collège de France po študiju pri Jeanu Baptistu Andréju Dumasu (1800-1894), Henriju Victorju Regnaultu (1810-1878) in Antoinu Jéromu Balardu (1802-1876). Leta 1859 je Berthelot postal profesor organske kemije na *École Supérieure de Pharmacie*, leta 1865 pa je prešel na *Collège de France*. V 1860-ih letih je Berthelot začel raziskovati v elektrokemiji in je razvil kalorimeter za merjenje toplote kemijskih reakcij. Leta 1889 je nasledil Pasteurja kot stalni tajnik francoske Akademije znanosti, uspešno politično pot pa je kronal leta 1895 z enoletnim imenovanjem za zunanjega ministra. S svojimi sintezami je Berthelot povsem onemogočil teorijo Stahlove »vitalne sile«, ki jo je načela že leta 1828 sinteza sečnine Friedricha Wöhlerja (1800-1882) s trgovske šole v Berlinu.

6 Reinitzer, 1888, 172; Reinitzer, 1908, 217

7 Reinitzer, 1888, 172, 174, 176; Reinitzer, 1908, 216; Sonin, 1988, 7

Raziskovanje holesterola se je tudi na obeh univerzah v Pragi začelo že desetletje pred Reinitzerjevim odkritjem. Pri njem je sodelovalo več raziskovalcev. Leta 1878 sta Karl Preis in Raymann⁸ raziskovala spojine holesterola. Raymann je leta 1887 opazil »fluorescenčne« barve pri taljenju holesterilacetata in holesterilklorida. Vendar je napačno menil, da se obarva strjena snov in ne talina. Naslednje leto ga je popravil Reinitzer⁹, ki je raziskoval v isti stavbi, vendar kot član druge, nemške univerze v Pragi. S polarizacijskimi poskusi se je ukvarjal tudi Reinitzerjev sodelavec Mach¹⁰. Tako je odkrivanje (termotropnih) tekočih kristalov v poslopju obeh univerz v Pragi potekalo tudi ob odkritih nacionalnih nasprotjih.

Številni opisi so napovedovali tekoče kristale, pri katerih fazni prehod povzroči sprememba temperature. Vendar starejši dosežki niso bili dovolj za odkritje, ki se je posrečilo komaj Reinitzerju¹¹ pri raziskovanju biološke vloge holesterola v rastlinah. Reinitzer se je temeljito pripravil na objavo odkritja, saj se je zavedal njegove pomembnosti. Pregledal je vso literaturo o podobnih starejših raziskavah in o njih poročal Lehmannu, ki je tudi sam dobro poznal raziskovanja biologov¹². Povezava z Lehmannom je bila po eni strani logična glede na Lehmannove uspehe pri raziskovanju fizikalne izomerije. Imela pa je tudi politično ozadje, saj se je nemška univerza v Pragi raje povezovala z nemškimi univerzami kot z avstrijskimi ali celo slovanskimi.

Reinitzer je prve rezultate svojih raziskovanj spojin holesterola objavil leta 1886. Nadaljeval je poskuse Augusta Husemanna in Arnauda, ki sta preučevala spojini holesterola v korenju. Poleg temno rdečega karotena je Husemann raziskoval tudi slabo obarvano snov, ki jo je imenoval hidrokaroten¹³. Husemann, Arnaud, Frönde in drugi so predložili različne enačbe za sestavo teh snovi.



Slika 5: Friedrich Richardt Cornelius Reinitzer (1857-1927)

Poldrugo leto pozneje se je Reinitzer odločil, da bo poleg rdeče barve raziskal še druge lastnosti holesterolovih spojin. Za svoje poskuse in opazovanje pod polarizacijskim mikroskopom je potreboval večje količine materiala, zato draga predelava korenja v Husemannov hidrokaroten ni prišla v poštev. Ko je dokazal, da je hidrokaroten podoben (ali celo enak) veliko cenejšemu holesterolu, se je odločil za poskuse s holesterolom. Predstojnik G. A. Weiss je Reinitzerju priskrbel priprave za poskuse in literaturo, medtem ko so zelo čist holesterol, obdelan z alkoholom, zanj proizvedli v tovarni H. Trommsdorfa¹⁴. Na Reinitzerjevo prošnjo je von Zepharovich opravil kristalografske raziskave. Pri nekaterih spojinah holesterola je imel precej težav zaradi majhnih kristalov¹⁵.

- 8 Bohuslav Raymann je bil rojen leta 1852 v Sobotni na Češkem. Med letoma 1872-1874 je študiral na Politehniku v Pragi, med letoma 1874-1876 v Bonnu in nato do leta 1877 v *École d. Médecin* v Parizu. Po končanem študiju je postal profesor splošne kemije na češki univerzi v Pragi in član češke akademije. Svoja dela je objavjal tudi v Parizu. Neposredno je vplival na odkritje mlajšega Reinitzerja, ki je raziskoval v isti stavbi, čeprav na drugi univerzi. Rayman je umrl leta 1910 v Pragi
- 9 Reinitzer, 1888, 175; Reinitzer, 1908, 216
- 10 Ernst Mach (1838-1916) je bil češkega rodu, čeprav češko ni znal prav dobro. Njegovi starši so živeli v okolici Novega mesta. Med letoma 1867-1895 je poučeval na univerzi v Pragi. Februarja 1875 je Mach predstavil Dunanski akademiji polarizacijski aparat, ki so ga po njegovih navodilih sestavili v Frankfurtu. Ko se je leta 1879 univerza razdelila na nemški in češki del, je Mach postal prvi rektor nemške univerze v Pragi. Univerzi sta še naprej delovali v isti stavbi (Lindley, 2001, 130; Šubic, 1876, 132)
- 11 Odkritelj (termotropnih) tekočih kristalov Nемец Friedrich Richardt Cornelius Reinitzer (1857-1927) je bil rojen v Pragi. Leta 1877 je tam končal nemško Tehniško visoko šolo in postal asistent na katedri za zoologijo in botaniko Nemške univerze v Pragi in obenem docent nemške Tehniške visoke šole v Pragi. Njegovo raziskovanje je usmerjal Gustav Adolf Weiss (1837-1891), profesor obče botanike na nemški univerzi v Pragi od leta 1872, direktor Instituta za fiziologijo rastlin in vladni svetnik. Reinitzer je pri njem razvil postopek za meritev toplotne prevodnosti kristalov za preučevanje povezanosti toplotne prevodnosti drevesne skorje od njene strukture. Leta 1878 je prešel v laboratorij za analitično kemijo, ki ga je vodil Gintl. Štiri leta pozneje se je Reinitzer vrnil k Weissu kot asistent na Institutu za fiziologijo rastlin, kjer je tudi odkril (termotropne) tekoče kristale (Janko, Tešinská, 1989, 65-78). Obenem je predaval mikroskopsko tehniko in gradiva na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi. Med letoma 1895-1901 je bil profesor botanike, organskih surovin in mikroskopske tehnike na Tehniški visoki šoli v Gradcu, kjer je sodeloval tudi v botaničnem institutu. V začetku 20. stoletja je prenehal z raziskovanjem tekočih kristalov, čeprav je še leta 1908 sodeloval pri polemiki glede svojih in Lehmannovih zaslug pri odkritju. Reinitzerjevo raziskovanje tekočih kristalov je v Pragi nadaljeval profesor Rotmund, specialist za fizikalno kemijo emulzij, in za njim Zoher. Pred Reinitzerjem je v Pragi poučeval profesor mineralogije Franz Zippe, ki je bil leta 1791 rojen v Falkenau na Češkem in je pozneje poučeval na Dunajski univerzi (Sonin, 1988, 5-6, 108, 113, 161; Reinitzer, 1908, 216, 223). Raziskovalci z nemške Tehniške visoke šole v Pragi so veliko prispevali k raziskovanju razelektrov v vakuumu, predvsem Johann Puluj (1845-1918), ki je v 1880-ih postal profesor fizike in elektrotehnike na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi. Pozneje je v Pragi pod Machovim vplivom raziskoval predvsem nihanje. Albert Einstein (1879-1955) je bil profesor na nemški univerzi v Pragi v šolskem letu 1911/12. Pomembni kristalografi so bili tudi Čehi v Pragi, med njimi je Jan (Johann) Krejčí (1825-1887) poučeval naravoslovje na višji realki v Pragi kot kustos mineraloške zbirke v češkem muzeju, pozneje pa je postal profesor na češki politehniku v Pragi. Leta 1856 je objavil teorijo molekulske sestave kristalov, ki naj bi se bolj prilagajala amorfnim telesom od Haüyjeve (Krejčí, 1856, 10, 15.)
- 12 Reinitzer, 1888, 168-174; Lehmann, 1889b, 482-532; Kelker, 1988, 5. Torej Reinitzerjevemu uspehu ni botrovalo le »ostro oko«, kot je zapisal de Gennes ob sedemdesetletnici Saupeja (Saupe, 1998, XV)
- 13 *Hydrocarotin* (Reinitzer, 1886, 719; Reinitzer, 1888, 167)
- 14 Reinitzer, 1886, 730; Reinitzer, 1888, 168; Reinitzer, 1908, 215

Reinitzer je pri holesterilbenzoatu in drugih estrih holesterola opazil dve različni tališči, kar so za liotropne snovi objavili že pred njim. Za odkritelja je obveljal tudi zato, ker je z nenavadnim vedenjem bioloških spojin prvi seznanil fizike. 14. 3. 1888 je poslal dva preparata na vpogled Lehmannu, katerega raziskovanje fizikalne izomerije je poznal¹⁶. V spremnem pismu, dolgem 16 rokopisnih strani, se je skliceval na nasvet starejšega sodelavca von Zepharovicha, ki je že več let sodeloval z Lehmannom. Pošiljal mu je svoje preparate, da je Lehmann izmeril tališča¹⁷:

»Po predlogu dr. V. Zepharovicha si Vas drznem prositi, da podrobneje preučite fizikalno izomerijo dveh priloženih snovi. Obe snovi kažeta tako presenetljive in čudovite pojave, zato srčno upam, da bodo tudi Vas v veliki meri zanimala... Snov ima dva tališči, če se smem izraziti na ta način. Pri 145,5 °C se stopi v motno, vendar povsem tekočo talino, ki pri 178,5 °C nenadoma postane povsem bistra. Pri ohlajanju se pojavijo vijolični in modri pojavi, ki nato hitro izginejo in pustijo motno, toda še vedno tekočo snov. Pri nadaljnjem ohlajanju se vijolična in modra barva ponovno pojavita, takoj potem pa se snov strdi v belo kristalno maso. Motnost ob ohlajanju povzročajo zvezdasto oblikovani skupki. Motnosti pri taljenju trdnine ne povzročajo kristali, temveč kapljevina, ki tvori oljnate proge v talini¹⁸.«

Reinitzer je motno stanje, oljnate proge in polarizacijo v pismu 14. 3. izrecno pripisal tekočini in ne kristalu, kar je dve desetletji pozneje razglasil za svojo prvo omembo tekočega kristala¹⁹. Dva tedna po prejemu Reinitzerjevega pisma mu je Lehmann pojasnil, da njegov zvezdasti kristalni agregat ni kristal, temveč kapljevina, ki le pri visokih povečavah kaže ostro strukturo. Reinitzer mu je 2.4. odgovoril, da se pri temperaturah blizu tališča kristalni lističi med seboj zgnetejo in razpadejo na zelo majhne delce, ki se mešajo s tekočino. Reinitzer je skozi mikroskop opazil, da so holesterol in njegovi derivati blizu tališča v židkem smolastem stanju.

Lehmann je že 4.4.1888 poročal o snoveh, ki jih imel čas raziskati med letnim semestrom. Z Reinitzerjem sta imela različne poglede na polarizacijske lastnosti snovi, oba pa sta bila zelo blizu ideji tekočih kristalov. 10.4. je Reinitzer poslal skice svojih opazovanj oljnatih črt kristalnih agregatov. Menil je, da so se med ohlajevanjem ob obodu strdile in kot trdno telo plavale v izotropni tekočini. Kljub Reinitzerjevi opombi na koncu pisma Lehmann sprva ni imel Reinitzerjevih preparatov za kemijsko enotne snovi, čeprav je pozneje leta 1908 v sporu za prioriteto trdil nasprotno. Reinitzer je poslal Lehmannu na vpogled tudi svojo razpravo²⁰ o meritvah v Gintlovem laboratoriju.

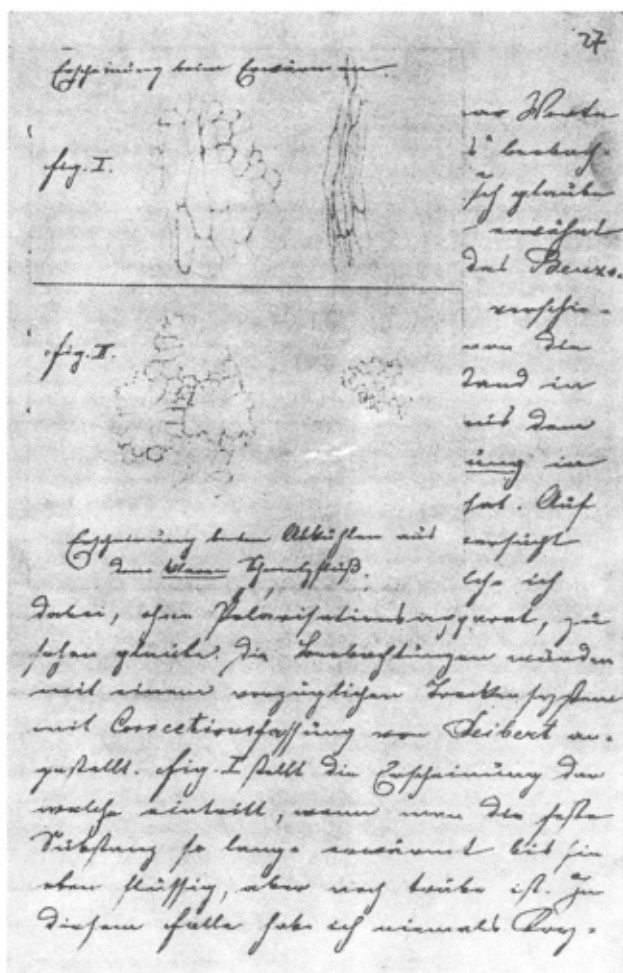
15 Reinitzer, 1888, 175, 177, 181

16 Reinitzer, 1888, 176; 184. Otto Lehmann (1855-1922) je bil rojen v mestu Konstanz v družini Franca Xaverja Lehmana, ki je bil rojen v istem kraju leta 1823. Franc Xaver je bil učitelj na licejih v mestih Konstanz, Kreisschulle in Offenburg. Leta 1876 je postal direktor šolsko-učiteljskega seminarja v Ettligen v deželi Baden. Pozneje je postal učitelj matematike in prirodoslovja v Freiburgu. Objavil je več del, tudi o zgodovini Arhimedove spirale. Sinu Ottu je že zelo zgodaj podaril mikroskop. Mikroskopiranja se je tako dobro naučil po starem Ledermüllerjevem priročniku, da ga ni dosegal nihče med fiziki njegove dobe. Otto je študiral v Strasbourgu med letoma 1872-1876. Mesto je bilo po pravkar končani vojni priključeno Nemčiji, zato so na tamkajšnje univerze nastavili najboljše profesorje. Lehmanna je eksperimentalne fizike učil Kundt, petrografije Rosenbuch, kemije pa med letoma 1872-1875 Jochann Friedrich Adolf Baeyer (1835-1917), sloviti organski kemik iz Berlina. Baeyer je leta 1875 odšel v München za naslednika Justusa Liebiga. Leta 1885 je bil povišan v plemiški stan. Leta 1905 je prejel Nobelovo nagrado iz kemije za raziskovanje sinteze barv in hidroaromatičnih spojin, predvsem za raziskovanje indiga. V Kundtovem laboratoriju, kjer sta leta 1874 asistrala Röntgen in tudi Puluj, je Lehmann gotovo delal poskuse z dvolomnimi snovmi, med njimi tudi s tekočinami in trdnimi snovmi pod visokim tlakom. Kot profesor fizike in elektrotehnike na nemški Tehniški visoki šoli v Pragi je Puluj pozneje pomagal sodelavcu Reinitzerju, da je začel sodelovati s Pulujevimi nekdanjim študentom Lehmannom. Kristalografijo je Lehmannu predaval urednik *Zeitschrift für Kristallographie* Paul Ritter von Groth (1843-1927), ki so ga pogosto imenovali »kralj evropske kristalografije.« Leta 1877 je Lehmann pri Grothu obrnil disertacijo o fizikalni izomeriji v kristalih. 16.9.1876 je postal suplent na Gimnaziji velikega vojvode v Freiburgu. 1.4.1877 je začel s šestletnim poučevanjem fizike, matematike in kemije na srednji šoli v mestu Mühlhausen v Alzaciji, kjer je moral skrbeti celo za šolsko prehrano. 1.10.1883 je bil izvoljen za docenta fizike na Tehniški šoli v Aachnu in asistenta Adolpha Wüllnerja, ki je bil pred tem med letoma 1865-1868 Plückerjev privatni docent v Bonnu. 21.7.1885 je Lehmann postal izredni profesor v Aachnu. Kmalu po prejemu Reinitzerjevega pisma je Lehmann spremenil delovno mesto in postal 1.10.1888 izredni profesor za elektrotehniko na Kraljevi politehniko v Dresdnu. 1.4.1889 je kot redni profesor prevzel fizikalni inštitut in katedro na Visoki tehniški šoli v Karlsruheu, ki jo je med letoma 1882-1885 zasedal Karl Ferdinand Braun (1850-1918) in za njim Heinrich Hertz. Tako je v Karlsruheu neposredno za Hertzovim odkritjem elektromagnetnih valov sledilo še odkritje tekočih kristalov. Lehmannu je tekoče kristale nabavil tudi sodelavec profesor Scholl iz Karlsruhea. Leta 1897/98 je Lehmann sodeloval pri utemeljitvi elektrotehniškega inštituta v Karlsruheu, generator za elektriko pa je dal postaviti tudi za svojo počitniško hišico v Hundsbachu. Leta 1900/1901 je postal rektor v Karlsruheu, leta 1902 pa je postal tajni svetnik. V Mühlhausnu in Aachnu je začel objavljati tudi razprave o razelektritvah, ki jih je med letoma 1891-1904 v Karlsruheju dopolnil z več kot desetimi predvsem eksperimentalnimi raziskavami o katodnih elektronkah. Kljub J. J. Thomsonovem odkritju leta 1897 Lehmann ni uporabljal naziva »korpuskula« ali »elektron«. S poskusi v elektronkah, dolgih 70 cm in širokih 30 cm, z različnimi plini je dokazal, da ne Faradayeva »disruptivna« teorija ne Hittorffova elektrolitična teorija »prstanu podobne« razelektritve ne napovedujeta pravilno prevajanja elektrike pri zelo nizkih tlakih (Lehmann, 1904b, 290, 297, 298), ko je treba upoštevati tudi vpliv elektromagnetnega polja. Lehmannu je bila bližje domneva, da katodni prostor v elektronki slabo prevaja zaradi pomanjkanja ionov, kot je trdil Johannes Stark (1874-1957) iz Göttingena leta 1902. Leta 1919 je Stark dobil Nobelovo nagrado. Lehmann je bil prav tako predlagan za Nobelovo nagrado leta 1913 in dvakrat med letoma 1916-1919, vendar je ni dobil. Leta 1909 je dobil nagrado Sorbonne za eksperimentalno delo in je imel ob tej priložnosti tam tudi govor. Leta 1919 je bil upokojen kot dvorni svetnik po tridesetih letih poučevanja, v katerih je pouk popestril predvsem s številnimi poskusi, ki so jih študentje hudomušno imenovali »Lehmannov cirkus«. Umril je v Karlsruheju. Njegov način dela je izključeval skupinsko delo. Zato ni imel študentov, ki bi sledili idejam njegove »šole«; morda z izjemo Gustava A. F. W. I. Mieja, ki je bil rojen v Rostocku leta 1868 in je doktoriral v Heidelbergu leta 1891. Med letoma 1905-1916 je bil Mie profesor fizike na univerzi v Greifswandu, med letoma 1917-1924 profesor eksperimentalne fizike na univerzi v Halleju, pozneje pa je predaval v Freiburgu. Lehmann je sodeloval tudi z naravoslovcem Haeckelom, katerega dela je našel že v očetovi knjižnici. Haeckel in Lehmann sta si pogosto dopisovala med letoma 1917-1919. Quincke je bil Haeckelov vrstnik in družinski mladostni prijatelj, kljub temu pa ga je Lehmann imel za enega svojih poglavitnih nasprotnikov (Lehmann, 1904a, 27; Lehmann, 1905b, 790; Lehmann 1906c, 11; Sonin, 1988, 10-12, 19-20, 30, 115; Kelker, 1973, 11; Knoll, Kelker, 1988, 2, 7, 10, 16, 19; Kelker, 1988, 5, 10, 15, 20-21, 35)

17 Kelker, 1988, 2, 21; Lehmann, 1888, 365. Victor Leopold von Zepharovich (Zepharowich, 1830-1890) je bil rojen na Dunaju. Med letoma 1852-1857 je bil področni državni geolog na Dunaju, med letoma 1857-1861 pa profesor mineralogije v Krakovu. Do leta 1864 je poučeval na univerzi v Gradcu, nato pa je postal profesor mineralogije na nemški univerzi v Pragi in dvorni svetnik. Leta 1865 je postal dopisni član Dunajske akademije. Raziskoval je tudi minerale iz idrijskega rudnika. V letih 1859, 1873 in (posmrtno) 1891 je izdal tri dele mineraloškega leksikona Avstrije

18 Kelker, 1973, 7; Lehmann, 1904a, 25-26

19 Reinitzer, 1908, 217



Slika 6: Reinitzerjeve skice tekočih kristalov v pismu Lehmannu 10.4.1888 (Knoll, Kelker, 1988, 59)

lavcev se je Reinitzer v razpravi skliceval tudi na Lehmannovo raziskovanje barv z mikroskopom, ki jih je medtem prejel po pošti²¹. Von Zepharovichova kristalografska in Lehmannova mikroskopska opazovanja so pri benzoatu in acetatu holesterola dokazovala obstoj treh modifikacij, ki so potrjevala fizikalno izomerijo²². Ob strani pisma je Reinitzer dodal: »Ta tekočina ni izotropna, temveč kristalna (pseudoizotropna) in enaka drugim kristalom, razen da je tekoča in ne trdna²³«.

Lehmann je tri dni pozneje odpisal, da ni še nikoli opazil tako lepih pravokotnih ostrih oblik kot na Reinitzerjevih skicah. Odkril je tudi krožno polarizacijo svetlobe, prepuščene skozi tekoči kristal ali odbite od njega. Največ pomislov je imel glede priprave kristala za razločno opazovanje meje med stanjema. »Trdna snov na steklu je bila kristal, vendar si ob njej moral pomisliti na tekočino,« je poročal, čeprav je ni še nikoli videl v značilni kroglasti obliki kapljice. Lehmann je Reinitzerjeve snovi pokazal tudi svojemu predstojniku, tajnemu svetniku Wüllnerju, ki problemov prav tako ni znal

Tabela 2: Pregled dopisovanja med Reinitzerjem in Lehmannom, ki je utemeljilo znanost o tekočih kristalih

Avtor pisma	Odposlano dne:	Mesec	Leto
Reinitzer	14	3	1888
Lehmann	27	3	1888
Reinitzer	2	4	1888
Lehmann	4	4	1888
Reinitzer	10	4	1888
Lehmann	13	4	1888
Reinitzer	20	4	1888
Lehmann	24	4	1888
Predstavitev Reinitzerjeve razprave	3	5	1888
Lehmann	20	8	1889

pojasniti²⁴. Lehmann se sprva še ni mogel znebiti tradicionalnega opisa kristala in sprejeti ideje o tekočih kristalih, čeprav naj bi naziv tekoči kristal že uporabljal v pogovorih z Wüllnerjem in Ambronnom. Lehmannova starejša študentska raziskovanja srebrovega jodida niso bila dovolj blizu idejam tekočih kristalov. Zato je bilo raziskovanje Reinitzerjevih spojin za Lehmannu povsem nekaj novega, čeprav je leta 1908 trdil nasprotno²⁵.

Reinitzer je 20.4. poročal Lehmannu o novih opazovanjih. Odkril je, da se holesterilbenzoat v zelo številnih raztopinah tako razkroji, da postane rahlo rumenkast. V talini postane židek in je ob strditvi nagnjen k steklasti obliki. Pri hitri ohladitvi se strdi v obliki zvezde s trajnimi modrimi črtami. Videti je kot kristal sredi raztopine. V drugi skici, priloženi pismu, je Reinitzer narisal mnogo lepih kotov in krajcev, ki so bili tako ostro razvidni, da v njihov obstoj ni bilo mogoče dvomiti. Da bi z Lehmannom zagotovo opazovala enak preparat, mu je Reinitzer poslal nosilec s snovjo in ga posebej opozoril na proge olja.

Lehmann mu je odgovoril štiri dni pozneje in zagotovil, da je gibljivost snovi tolikšna, da jo je treba imeti za tekočino. Posebno izrazite pojave je opazil v mešanici holesterilbenzoata in hidrokarotenbenzoata. Lahko je opazoval ves prehod med kristalnimi lističi in tekočimi progami, tako da je: »...nemogoče postalo mogoče. Wüllner je menil, da snov kaže povsem grozljiv vtis. In tudi meni se tako zdi.«

V pismih sta Reinitzer in Lehmann seveda veliko svobodneje pripovedovala o odkritju nove faze snovi kot v objavljenih delih. Oba sta se že močno približala poznejšemu pojmovanju tekočega kristala. V tisku si seveda nista upala novih snovi opisati kot »zdrob (Griess), sestavljen iz zelo mehkih kristalov, ki kažejo fizikalno izomerijo«. Dopisovanje med Reinitzerjem in

20 Knoll, Kelker, 1988, 58

21 Reinitzer, 1888, 187

22 Reinitzer, 1888, 177, 182

23 Knoll, Kelker, 1988, 61

24 Reinitzer, 1908, 217-220; Lehmann, 1910, 575

25 Reinitzer, 1908, 220; Knoll, Kelker, 1988, 63, 70

Lehmannom je pravzaprav utemeljilo znanost o tekočih kristalih, čeprav so še obstajale možnosti, da so nenavadne lastnosti Reinitzerjevih snovi povezane z biološkimi pojavi (tabela 2)²⁶.

Korespondenca je bila prekinjena zaradi Lemannovih menjav delovnega mesta. Dva tedna pozneje po Lehmannovem pismu je 3.5.1888 dvorni svetnik G. A. Weiss predstavil Reinitzerjevo razpravo Dunajski akademiji.

S citati iz pisem je Reinitzer dve desetletji pozneje prepričal znanstveno srenjo, da so bile njegove snovi za Lehmanna nekaj popolnoma novega. Do ideje tekočih kristalov se ni mogel dokopati s svojim starim opazovanjem srebrovega jodida, kot sta dvajset let po odkritju trdila tako Lehmann kot Vorländer²⁷.

Reinitzer je svoje poznanje kristalov in bioloških raztopin črpal iz izkušenj svojih predhodnikov, še posebno v habsburški monarhiji. Kljub številnim različnim poročilom o molekulski masi holesterola je bil prepričan, da gre v vseh raziskovanih živalskih tkivih za eno in isto snov, ki kaže izomerijo²⁸.

Molekulska masa holesterola še ni bila natančno določena. Prav tako niso bile znane sestavine njegove molekule in tudi ne osnovna struktura kristala. Gmelinovo²⁹ domnevo je Reinitzer nadomestil z bolj zapleteno enačbo in v Gintlovem³⁰ inštitutu po šestih mesecih raziskovanj prvi pravilno določil kemijsko sestavo holesterola³¹.

Reinitzer je postal pozoren na lastnosti holerilbenzoata, katerega kemijske sestave še ni poznal. Holesterol se je vedel podobno kot Heintzov stearin: pri 145,5°C se je stalil v motno kapljevino, ki je pri 178,5°C postala prozorna³². Kljub temu pa Reinitzer ni nikoli omenjal Heintzovega dela, čeprav je tako leta 1888 kot dve desetletji pozneje navajal dosežke vseh svojih pomembnejših predhodnikov. Heintzova in Duffujeva opazovanja stearina iz leta 1854 ter številna druga opazovanja večkratnih tališč je Lehmann povzel še preden ga je Reinitzer obvestil o svojem odkritju³³: »Pri ohlajanju staljenega holesterilacetata pred strditvijo (in ne po njej, kot je trdil Raymann) dobimo občudovanja vreden pojav zelo lepih barv. Ta pojav lahko dobimo

tudi v dolgih kapilarah, ki jih uporabljamo za določanje temperature tališča, vendar je lepše, če snov talimo med steklom. Pri opazovanju odbite svetlobe se ponekod pojavlja živa smaragdna barva, ki se hitro razširi čez ves vzorec in nato preide v modro-zeleno, rumeno, oranžno, rdečo in, končno, v temno rdečo³⁴«.

Reinitzer je opazil, da imata holesterilacetat in holesterilbenzoat po tri modifikacije (faze), pri drugih spojinah holesterola pa je opazil le po dve. Holesterilbenzoat je v drugi fazi tvoril »igle ali ozke romboidne lističe na površini³⁵«. To je bil prvi objavljeni opis termotropnega nematskega tekočega kristala.

Že štiri desetletja pred Reinitzerjem so raziskovalci poročali, da se pri ohlajanju prozorne kapljevine za kratek čas pojavi modra barva pri temperaturi faznega prehoda v motno kapljevino; tik pred temperaturo prehoda v trden kristal pa so opazili modro-vijolično barvo. Reinitzer je poročal o holesterilbenzoatu³⁶:

»Z ohlajanjem povsem raztopljene spojine dobimo vijoličasto-modro barvo po celotni masi snovi ..., ki ob nadaljnjem ohlajanju postane motna. Nadalje kažejo barvite snovi, kot je acetat, tudi kromatično polarizacijo, vendar ta ni tako močna in nima veliko barv.«

Barvni pojavi, ki jih je prebral v poročilih predhodnikov in jih je pri spojinah holesterola opazil tudi sam, so Reinitzerja prepričali, da ima opraviti z izomerijo, s katero se je tisti čas ukvarjal predvsem Lehmann³⁷.

Leta 1906 je Lehmann objavil svoj opis »modre faze«. Stoletje po Reinitzerju so »modro fazo« temeljito raziskali in ugotovili, da gre za tri različne realne faze v zelo ozkem temperaturnem področju med izotropno in holesterično fazo³⁸.

5.7. Lehmann v Aachnu, Dresdnu in Karlsruheju: raziskovanje tekočih kristalov znotraj nove veje znanosti, fizikalne kemije

Nekdanji Kundtov³⁹ učenec Lehmann je bil pravi naslov za Reinitzerjevo odkritje, saj je do tedaj objavil že okoli 20 del o fizikalni izomeriji in mikroskopiranju kris-

26 Lehmann, pismo Reintzerju 24.4.1888; Knoll, Kelker, 1988, 65; Kelker, 1988, 21; Donald, Windle, 1992, 1; Vill, 7.

27 Reinitzer, 1908, 220-222

28 Reinitzer, 1888, 173

29 L. Gmelin, 1848

30 Wilhelm Friederich Gintl (1843-1908) je bil asistent Ferdinanda Lippicha (1838-1913), profesorja mehanike na visoki šoli v Pragi med letoma 1874-1913. Lippich je 29.3.1870 objavil razpravo o spektralnih črtah plina v Geisslerjevi cevi. Gintl je bil med letoma 1867-1870 privatni docent na nemški univerzi v Pragi, nato pa od leta 1870 redni profesor kemije na Tehniški visoki šoli v Pragi. Leta 1880 je Gintl kritiziral Crookesovo idejo o katodnih žarkih kot četrtem agregatnem stanju snovi

31 Reinitzer je kemijsko enačbo »cholesterina« zapisal kot C₂₇H₄₆O namesto danes običajnega C₂₇H₄₆OH (Reinitzer, 1888, 168, 171; Demus, 1988, 46; Kelker, 1988, 2-3; Sonin, 1988, 7). Strukturno enačbo holesterola sta ugotovila šele Windaus in Z. Hoppe-Seylors po meritvah z rentgenskimi žarki 44 let pozneje, leta 1932. Adolf Windaus je leta 1928 prejel Nobelovo nagrado za tri desetletja raziskovanja sestave stearinov in njihove povezanosti z vitamini

32 Pravilni temperaturi sta 146,6°C in 180,6°C

33 Collings, 1990, 28; Lehmann, 1888, 196, 749-751; 687-695; Sonin, 1988, 8

34 Reinitzer, 1888, 175

35 Reinitzer, 1888, 183

36 Reinitzer, 1888, 183-184; Reinitzer, pismo Lehmannu 10.4.1888; Knoll, Kelker, 1988, 65

37 Reinitzer, 1888, 176

38 Dubois, 1988, 151

39 Leta 1884 je August Adolf Kundt (1839-1894) objavil meritve vrtenja polarizacijske ravnine svetlobe po prehodu skozi tanke feromagnetne plasti Fe in Ni (Grünberg, 2001, 31, Kelker, 1988, 10) v času, ko je tudi Lehmann raziskoval polarizacijo. Kundta je pozneje leta 1886 presenetilo odkritje dvojnega loma svetlobe odbite na meji med kovino in stekleno podlago zrcala. Problem je rešil tako, da je tanko plast opisal kot kristalno elastično membrano, ki je neenakomerno napeta zaradi naboja razpršenih delcev in zato povzroča dvojni lom (Bunshah, 1994, 939).

talov⁴⁰. Prav tedaj je v prvem delu svoje fizike molekul z difuzijo opisal tudi z domnevno neposrednim opazovanjem molekul, ki ga je leta 1827 opisal angleški zdravnik in botanik Robert Brown (1773-1858)⁴¹. Brownovo gibanje je bilo po Hookovih odkritjih naslednji resnejši prodor mikroskopskih opazovanj biologov v fiziko, pred Reinitzerjevim odkritjem tekočih kristalov.

Lehmann je s svojo tehniko mikroskopiranja, poznavanjem kristalografije in poročili skoraj brez enačb⁴² med vsemi tedanjimi fiziki vlival največ zaupanja biologom, ki seveda niso radi brali razprav, polnih višje matematike. Med prvimi si je pri mikroskopiranju pomagal tudi s fotografijo, ki je pozneje omogočila velikanski uspeh drugemu Kundtovemu učencu Röntgenu. Tudi pozneje je Lehmann sledil sodobnim tehnikam, tako da sta leta 1920 skupaj z Liesegangom prvič predvajala kinoprojekcijo prehoda kristala v fazo tekočega kristala⁴³. Že pred sodelovanjem z Reinitzerjem je Lehmann domneval, da ima tudi srebrov jodid fazo, značilno za snovi, pozneje imenovane tekoči kristali, kar se je izkazalo za napako. Leta 1867 je Fizeau v sodelovanju s Saint-Claire Devilleom⁴⁴ za opis amorfne modifikacije srebrovega jodida uporabil model, podoben Forbesovim ledenikom. Srebrov jodid je Lehmannov poznejši učitelj Kundt raziskoval že leta 1864, vendar ni bil pozoren na njegove polarizacijske lastnosti, podobno kot pozneje V. von Ebner na Dunajski akademiji. Amorfne oblike srebrovega jodida v bližini tališča je Lehmann že leta 1884 spodbujal z dodajanjem posebnih snovi, ki so jih tudi pozneje uporabljali za izdelavo tekočih kristalov⁴⁵.

Lehmann je prvi segreval in ohlajal tekoče kristale pod mikroskopom s pretokom zraka, pri višjih temperaturah z zbiralnikom vrelega olja. Kristale je preučeval v električnem polju. Izumil je tudi kontaktno pripravo za hkratno opazovanje različnih stadijev mešanja dveh čistih snovi, ki jo je pozneje dopolnil H. Sackmann v Halleju. Na številnih demonstracijskih predavanjih je sliko z mikroskopa preslikal tudi na zaslon. »Kristalizacijske mikroskope« z Lehmannovimi izboljšavami sta sestavljali podjetji Voigt U. Hochgesang v Göttingenu in Carl Zeiss v Jeni⁴⁶.

Lehmann je našel veliko nazivov za nove pojme. Poldrugo leto dni po prvem Reinitzerjevem pismu mu je Lehmann iz Karlsruheja pisal v Prago 20.8.1889, potem ko se mu je opravičil za prekinitev dopisovanja zaradi dela ob dvakratni spremembi delovnega mesta⁴⁷: »... moji novi rezultati potrjujejo vaše (prej)

zapisano stališče, da zdrob (Griess) sestavljajo zelo mehki kristali, ki jih je treba imeti za fizikalno izomerno modifikacijo snovi. Je absolutno homogena in v njej ni prisotna druga tekočina, kot ste sprva domnevali... Za fizike je zelo zanimivo, da obstajajo kristali, ki so tako mehki, da jih lahko skoraj imenujemo tekočino.«

Lehmann je uporabil naziv »fliessender Kristall« in »leicht flüssige kristallinische Substanz« v razpravi, ki jo je poslal v objavo 30.8.1889. V njej se je povsem zavedal težav, ki ga čakajo: »Kristali, ki tečejo! Ali ni to nasprotje samo po sebi - se bo spraševal bralec tega naslova⁴⁸...«

Nato je Lehmann dokazoval, da so amorfne trdne snovi pravzaprav tekoče, posebej pa je opisal tudi deformacijo mehkejših kristalov in mikroskopske kristale, ki se sami po sebi upognejo brez zunanje sile, tako kot kofein. Deformacije je povzročal tudi z velikimi tlaki v vijačni stiskalnici in jih opazoval z mikroskopom⁴⁹.

V nadaljevalju je Lehmann opisal Reinitzerjevo odkritje⁵⁰. Poročal je, da je Reinitzer sprva menil, da bo mejo med kristalom in tekočino lahko razločno določil z opazovanjem polarizirane svetlobe in tako določil točno temperaturo tališča. Vendar je ugotovil, da to ni mogoče, saj je bilo vmesno stanje videti, kot da bi kristali plaval v tekočini.

Leta 1889 je Lehmann že ugotovil psevdooizotropnost (dvolomnost) navidez izotropne tekočine⁵¹. Uporabljal je tudi izraz »pseudokristal«⁵². V istočasno objavljenem drugem delu svoje molekulske fizike je raziskal tudi sipanje svetlobe na Reinitzerjevem preparatu pod vplivom električnega polja. Meritve v polju je nadaljeval šele Frederiks pol stoletja pozneje. Lehmann je v drugem delu svoje molekulske fizike opisal tudi anizotropno obnašanje taline, ki so jo pozneje imenovali holesterična faza⁵³: »Čudovita tekočina z mrežastimi belimi trakovi, podobnimi enoosnim kristalnim iglam, ki potemni, ko jih postavimo vzporedno glavnim smerem Nicolove prizme. Vzroka za ta presenetljiv polarizacijski pojav ni mogoče pojasniti, toda bele proge očitno ponazarjajo tokovnice. Če se tekočina giblje, se med obstoječimi progami pojavljajo nove in nastaja širši trak.«

Leta 1890 je Lehmann pisal o »kristalnih kapljevinah (krystallinische Flüssigkeiten, tropfbarflüssige Kristalle)«. Končno je leta 1900 ponovno skoval že pozabljeni Forbesov naziv »tekoči« (flüssige) kristal, ki se je kljub kritikam obdržal do današnjih dni⁵⁴.

40 Knoll, Kelker, 1988, 48.

41 Rosenberger, 1890, 638.

42 Kelker, 1988, 20-21.

43 Film hranijo Lehmannovi potomci (Knoll, Kelker, 1988, 45). Po drugih podatkih sta že leta 1911 Vulf in H. Deisch snemala tekočo kristalno fazo za kinematograf (Tammann, 1925, 283).

44 Parižan Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) je zaslovel s svojimi natančnimi meritvami hitrosti svetlobe, raziskoval pa je tudi temperaturno raztezanje kristalov. Henri Étienne Sainte-Claire Deville (1818-1886) je bil profesor na Ecole Normale Supérieure od leta 1851 in po letu 1884 profesor kemije na Sorbonni. Raziskoval je difuzijo in prepustnost kovin za plin.

45 Kelker, 1973, 7; Lehmann, 1908c, 1099.

46 Kelker, 1986, 243; Kelker, 1973, 9-10; Sonin, 1988, 14-15; Kelker, 1988, 20; http://www.lci.kent.edu/lc_history.html

47 Vill, 9; Kelker, 1988, 24-25; Reinitzer, 1908, 222.

48 Lehmann, 1889, 462.

49 Lehmann, 1889, 463-464, 466-467.

50 Lehmann, 1889, 467-468.

51 Knoll, Kelker, 1988, 72; Kelker, 1988, 25.

52 Rinne, 1933, 1031.

53 Kelker, 1988, 22.

54 Lehmann, 1890, 401; Kelker, 1973, 9; Kelker, 1988, 25

Kmalu po objavi prve Lehmannove razprave o tekočih kristalih leta 1889 je Gattermann sestavil še druge podobne snovi, ki so se dvakrat »talile« pri točno določenih temperaturah. Naslednje leto sta Gatterman in A. Ritschke s tehniko separacije sestavila prvi termotropni tekoči kristal s povsem znano kemijsko strukturo, derivat azoksobenzena. Gattermanove snovi so bile sestavljene brez bioloških sestavin in so bile še bolj fluidne od Reinitzerjevih. Gatterman jih je poslal Lehmannu v podrobnejšo raziskavo. Odkritje je Lehmann napeljal 24.3.1890 k skovanki »Krystalline Flüssigkeiten«, ki je bila že zelo blizu nazivu tekoči kristal⁵⁵. Tako kot Wöhlerjeva šest desetletij starejša sinteza sečnine je Gattermanova odstranila še zadnje dvome o morebitnih življenjskih procesih v tekočih kristalih, o katerih je bil govor v zgodnjem dopisovanju med Reinitzerjem in Lehmannom.

Lehmann je tudi po koncu študija pri Grothu še leta 1877 zagovarjal Grothove ideje o povezanosti geometrije kristalov s fizikalnimi lastnostmi in z notranjo zgradbo. Groth je med prvimi sprejel temeljno vlogo osnovne celice pri opredelitvi kristala, vzporedno z Lehmannom pa je raziskoval tudi kristale organskih snovi. Osnovno celico je imel za fizikalno realnost. To učiteljevo idejo je Lehmann še posebej poudarjal in osnovno celico opisal kot poglavitno lastnost, ki loči kristale od kapljev. Pozneje je Lehmann ideje svojega učitelja razvil v smer, ki se je številnim sodobnikom zdela prevratna. Lehmannovi poskusi so bili zelo zapleteni in jih številni v mikroskopiranju manj izvedeni sodobniki niso znali ponoviti⁵⁶. Obstoj osnovne celice kot pogoj za obstoj kristala je nadomestil z manj zahtevno lastnostjo anizotropnosti. Leta 1890 kristal definiral kot »kemijsko enotno telo, ki pod notranjo ali zunanjo napetostjo zaradi tlaka postane anizotropno in lahko raste v prenasajenih raztopinah.« Deset let pozneje je zapisal »kristal je anizotropno, z molekulsko usmerjeno silo obdarjeno telo ... Značilno za trdno agregatno stanje je obstoj meje elastičnosti. V nasprotju s tem pa so tekočine tiste, katerih meja elastičnosti je enaka nič.« To je bila seveda pomembna sprememba teorije kristalne mreže, ki je številni sodobniki niso mogli sprejeti⁵⁷.

Te opredelitve so bile zelo različne od Grothovih, ki pa je leta 1890 vseeno strpno dovolil objavo Lehmannove razprave v *Zeitschrift für Krystallographie*, katerega glavni urednik je bil⁵⁸. Kljub temu pa Groth tudi v svoem učbeniku kristalografije iz leta 1895 ni niti z besedo omenil tekočih kristalov, kristal pa je definiral kot homogeno anizotropno trdno telo⁵⁹. 18.3.1890 je Lehmann menil, da so vsa trdna in tekoča telesa mešanica

kristalnih modifikacij. Molekule tvorijo večje strukture v trdninah, manjše pa v tekočinah. Trditve je podkrepil s 117 slikami⁶⁰.

Lehmann je nasprotoval teoriji kristalne mreže tudi po Lauejevih poskusih z rentgenskimi žarki leta 1912 in je zagovarjal teorijo, utemeljeno na sočasnem obstoju faz v različnih agregatnih stanjih. Za Lehmannovo bistvo kristalov ni bilo v (Boškovičevi) geometrični porazdelitvi molekul, določeni z elastičnimi silami, saj to lahko poruši zunanja sila. Za Lehmannovo je bila bistvena struktura fizikalne molekule, ki je v Boškovičevi teoriji točkastih središč sil ni bilo. Lehmann je s strukturo molekule pojasnjeval tudi lastnosti kristala, kot je dvojni lom. Vendar se je z napredkom kristalografije zapletal v vedno globlja nasprotja⁶¹, čeprav sta bila Vorländerjev model podolgovatih molekul in Bosejevi roji v veliki meri nadaljevanje Lehmannovih teorij. Lehmann je odkril več kot sto vrst tekočih kristalov in je med njimi raziskoval dva tipa: »tropfbar« (kapljaste), poznejše nematike s strukturo, urejeno v eni dimenziji, in »schleimig« (sluzaste), poznejše smektike z značilnimi dvojnimi kroglami ali palicami v stožčasti strukturi.

Leta 1900 je Lehmann odkril po njem imenovano lastnost kapelj holesteričnih tekočih kristalov. Pod vplivom temperaturnega gradienta, približno vzporednega lastnim heličnim osem, holesteriki kažejo enakomerno rotacijo okoli lokalne molekulske osi⁶². Lehmann je z dvojnimi lomom pri majhni elastičnosti tekočih kristalov pojasnjeval tudi elastičnost etra nekaj let, preden je ta začel postajati odvečen v Einsteinovi teoriji relativnosti. Z vplivom močnih magnetnih polj na anizotropne molekule pa je pojasnjeval delovanje živih organizmov⁶³. Leta 1904 je s polarizacijskim mikroskopom raziskoval kapljice nematskih tekočih kristalov v viskoznem izotropnem mediju. Ugotovil je posebnosti ob robu kaplje, ki so šest desetletij pozneje postale zelo pomembne v prikazovalnikih⁶⁴. Leta 1933 je pojav raziskal še Oseen⁶⁵.

Lehmann je lastnosti tekočih kristalov povezoval tudi z življenjem samim, kar ima v sodobni biofiziki še poseben pomen. Menil je, da raziskovanje tekočih kristalov vodi k razumevanju meja med fiziko in fiziologijo in omogoča raziskovanje delovanja možganov⁶⁶. Veliko svojih idej o tekočih kristalih in faznih prehodih je prevzel po Frankenheimu⁶⁷. Vendar pa so pred letom 1908 holesterične tekoče kristale le malo raziskovali in jim je Lehmann v svoji knjigi iz leta 1904 posvetil le dve od 264⁶⁸ strani prve monografije, v celoti posvečene tekočim kristalom. Pet let pozneje je Prins uspešno zagovarjala prvo doktorsko disertacijo o faznih diagramih nekaterih tekočih kristalov.

55 Vill, 9; Kelker, 1988, 26; Demus, 1988, 46. Nemški organski kemik Ludwig Gattermann (1860-1920) je bil leta 1890 izredni profesor na univerzi v Heidelbergu, leta 1900 pa je postal redni profesor v Freiburgu.

56 Knoll, Kelker, 1988, 77.

57 Lehmann, 1900, 696, 698; Tammann, 1902, 104; Reinitzer, 1908, 224.

58 Sonin, 1988, 12-13, 30-31.

59 Lehmann, 1900a, 649, 654.

60 Lehmann, 1889, 467-468.

61 Vill, 6; Kelker, 1988, 18; Jungnickel, McCormach, 1986, 2: 101-102.

62 Lehmann, 1900, 657, 664.

63 Lehmann, 1900, 705.

64 Crawford, Žumer, 1996, 1; Slavinec, 1999.

65 Blinc, Žekš, 1974, 258.

66 Kelker, 1973, 13.

67 2; Lehmann, 1904a, 188.

68 Kelker, 1973, 16.

NASVETI

Uporaba impedančne spektroskopije za študij električnih lastnosti tankih plasti

Darja Kek, Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

1 Uvod

Električne in kemijske transportne lastnosti materialov lahko merimo z različnimi metodami, ki nam omogočajo določitev ionske in elektronske prevodnosti ter študij osnovnih elementarnih procesov.

Impedančna spektroskopija je zelo razširjena metoda za preučevanje elektrokemijskih sistemov. Odlikujeta jo natančnost in možnost ločevanja posameznih elementarnih transportnih procesov, ki potekajo v materialih. Pri določevanju električnih lastnosti materialov v obliki tankih plasti navadno uporabljamo dvoelektrodne celice. V takih sistemih poteka več različnih transportnih procesov, npr. transport električnega naboja skozi različne faze v notranjosti materiala, prenos naboja na fazni meji. Proces se odzivajo v različnih frekvenčnih območjih, če potekajo »zaporedno« in z različnimi relaksacijskimi časi. V takih primerih lahko posamezne transportne procese ločimo med seboj.

Ker so transportne lastnosti polikristaliničnih trdnih snovi močno odvisne od mikrostrukture materiala, se to v splošnem izraža tudi na njihovih impedančnih odzivih. V literaturi navajajo, da je za električno karakterizacijo polikristaliničnih materialov nadvse pomembna kombinirana uporaba impedančne spektroskopije in mikroskopije. Tako lahko ugotovimo prevodne lastnosti posameznih mikrostrukturnih faz.

2 Osnove

Elektrokemijski sistem vzbujamo z nizko napetostjo sinusne oblike, impedančni odziv pa dobimo z merjenjem razmerja med vzbujevalno napetostjo U in tokovnim odzivom I kot funkcijo krožne frekvence ω :

$$\frac{U(\omega)}{I(\omega)} = Z(\omega) \quad (1)$$

$$U(\omega) = U_0 e^{j\omega t} = U_0 [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)] \quad (2)$$

$$I(\omega) = I_0 e^{j(\omega t + \phi)} = I_0 [\cos(\omega t + \phi) + j \sin(\omega t + \phi)] \quad (3)$$

U_0 pomeni amplitudo vzbujevalne napetosti, I_0 amplitudo tokovnega odziva, ϕ pa fazni kot med vzbujevalno napetostjo in tokovnim odzivom. Vrednost $Z(\omega)$ pri izbrani frekvenci ω_0 imenujemo impedanca, ki ima fazni kot $\phi(\omega_0)$, njena velikost pa je enaka razmerju U_0/I_0 . Impedanco Z ponavadi predstavimo v kompleksni ravnini v obliki Nyquistovega diagrama (Z_{Im} proti Z_{Re}) ali v obliki Bodejevega diagrama ($|Z|$ proti ω).

V kompleksni ravnini impedanco določata $Z' = \text{Re}(Z) = |Z| \cos \phi$ na abscisni osi in $Z'' = \text{Im}(Z) = |Z| \sin \phi$ na

ordinati. Teoretično je impedančni odziv, predstavljen v kompleksni ravnini, sestavljen iz enega ali več polkrogov s centri na abscisni osi, vendar pri realnih meritvah dobimo polkroge s centri pod realno osjo.

Izmerjene impedančne odzive primerjamo s spektri nadomestnih shem, ki so sestavljene iz komponent (elektrokemijski upor, elektrostatski kondenzator, kemijski kondenzator...), katerim pripišemo fizikalni pomen in tako izračunamo parametre spektra.

V primeru, da ima impedančni odziv notranjosti materiala obliko enega polkroga, ga navadno prilagajamo s spektrom nadomestne sheme, ki je sestavljen iz enega RQ-člena. Ta pomeni en relaksacijski proces, zanj velja Cole-Colejeva enačba:

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + (j\omega\tau_0)^n}, \quad (0 \leq n \leq 1) \quad (4)$$

R je upornost, τ_0 srednji relaksacijski čas in n parameter, povezan z disperzijo relaksacijskih časov. Simbol Q se uporablja za prikazovanje neidealne kapacitivnosti in je okrajšava za »constant phase element« - CPE. Kompleksno impedanco CPE zapišemo z enačbo:

$$Q = Z_{CPE} = Y^{-1} (j\omega)^{-n} \quad (5)$$

Y je konstanta, ki se s kotno frekvenco ne spreminja.

V primeru, da je vrednost $n = 1$, CPE pomeni kapacitivnost kondenzatorja Y ($Q=C$). Če pa je $n = 0$, pomeni admitanco upora Y ($Q=R$).

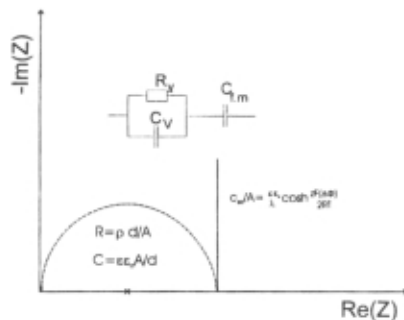
3 Impedančni odziv sistema ionskega prevodnika med dvema elektrodama

a) ionski prevodnik je monokristal

Vzemimo primer, ko imamo trden ionski monokristal, npr. NaCl, LiCl ali z Y dopiran ZrO_2 med dvema platinskima elektrodama. Kakšen odziv in katere lastnosti materiala lahko ugotovimo z uporabo impedančne spektroskopije?

Impedančni odziv ionskega prevodnika v kontaktu z elektronskim prevodnikom (elektrodo) je sestavljen iz visokofrekvenčnega polkroga z izhodiščem v koordinatnem izhodišču in nizkofrekvenčne premice (slika 1). Odziv visokofrekvenčnega polkroga pomeni uporovne (R) in kapacitivne (C) lastnosti materiala. Iz upornosti lahko izračunamo specifično prevodnost materiala, iz kapacitivnosti pa dielektrično konstanto (ϵ). Grafični pomen posameznih parametrov, ki nastopajo v enačbi, in nadomestna shema sta razvidna s slike 1. Nizkofrekvenčna premica pomeni odziv fazne meje ionski prevodnik/elektroda. Na fazni meji pride do drugačne

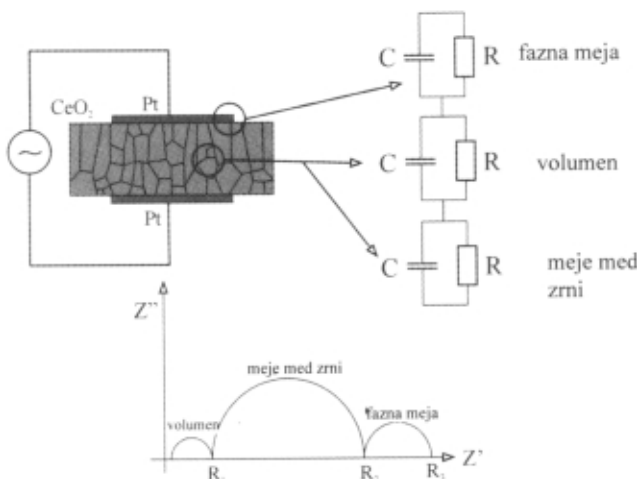
razporeditve nosilcev naboja na strani ionskega prevodnika zaradi druge faze. Kjer so nosilci naboja drugače razporejeni kot v nevtralnem delu elektrolita, pravimo področje prostorskega naboja. Z uporabo zunanje enosmerne napetosti, ki jo pritismo na elektrodo, lahko spreminjamo koncentracijo nosilcev naboja, impedančni odziv fazne meje pa se spremeni. Uporaba zunanje enosmerne napetosti nam omogoča ločiti med odzivom volumna materiala in fazne meje (Glej enačbe na sliki 1).



Slika 1: Teoretični impedančni odziv monokristala ionskega prevodnika med dvema elektrodama. Parameter R_v predstavlja upornost volumna elektrolita, C_v pa kapacitivnost, A je geometrijska površina, d razdalja med elektrodama. C_{fm} predstavlja kapacitivnost fazne meje.

b) ionski prevodnik s polikristalinično strukturo

V realnih sistemih navadno nimamo monokristalov. Večina tankih plasti je polikristalinična, kar pomeni, da imamo v volumnu elektrolita veliko število mej med zrnji. Vsaka meja pomeni drugačno razporeditev nosilcev naboja, kar se izraža pri izmerjenih električnih lastnostih materiala. Če je ob mejah koncentracija nosilcev naboja povečana, se prevodnost poveča in poteka pretežno po mejah. Če pa je koncentracija nosilcev zmanjšana, se prevodnost celotnega materiala zmanjša. V impedančnem odzivu je to razvidno v dodatnem pokrogu, ki pomeni upornost in kapacitivnost mej med zrnji. Shematsko je tak primer prikazan na sliki 2. Nadomestna shema, s katero opišemo tak odziv, pa je prikazana na desnem delu slike.



Slika 2: Teoretični impedančni odziv polikristaliničnega ionskega prevodnika med dvema elektrodama.

c) ionski prevodnik v stiku z dvema fazama, kjer poteka še elektrokemijska reakcija

V primeru, kjer je poleg ionskega prevodnika in elektrode še tretja faza, npr. plin, in poteka še elektrokemijska reakcija, je impedančni odziv in model za opis elektrokemijskih lastnosti takega sistema bolj zapleten. Naj na kratko omenimo le odziv, ki ga dobimo pri gorivnih celicah, kjer tanka plast ionskega prevodnika služi kot elektrolit (slika 3). Nadomestna shema, s katero lahko opišemo vsa ravnotežja v gorivnih celicah, ni enostavna in še vedno ni splošno privzetega modela, ki bi natančno opisal dogajanje.

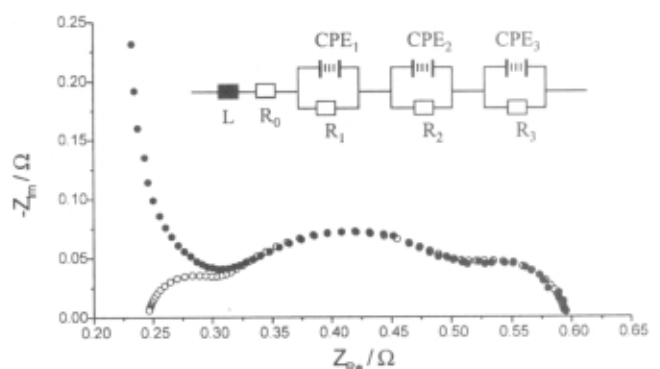
4 Problemi pri analizi impedančnih spektrov

Analiza impedančnih spektrov lahko poteka na več nivojih. Na elektrotehniškem nivoju so modeli nadomestna vezja, sestavljena iz uporov in kondenzatorjev. Elementom nadomestnega vezja pripišemo fizikalni pomen in izračunamo parametre modela. Omenimo naj le nekaj najpogostejših napak in težav, na katere moramo biti pozorni pri interpretaciji impedančnih spektrov:

- Okvirno moramo poznati sistem, ki ga želimo obravnavati. Torej, poleg impedančne spektroskopije potrebujemo dodatno neodvisno metodo za določevanje mikrostrukture ali kemijske sestave.
- Polkrogi in premice se navadno odmikajo od idealnega teoretičnega odziva. Pri tem si pomagamo s Cole-Colejevo enačbo (4) in definicijo neidealne kapacitivnosti (5). Prevelik odklik impedančnega odziva od idealnih polkrogov in premic lahko pomeni, da je nekaj narobe z eksperimentalnim instrumentarjem; preveriti moramo kontakte, dolžino žic ipd.
- Pri trdnih sistemih, kjer za kontakte uporabljamo prevodne paste, moramo paziti, da odstranimo vse organske snovi, ki so v takih pastah, sicer lahko dobimo dodatne »zanimive« odzive in postavljamo nove teorije, ki dejansko ne ustrezajo.

5 Literatura

/1/ D. Raistrick, J. R. Macdonald, D. R. Franceschetti v: Impedance Spectroscopy Emphasizing Solid Materials and Systems, Ed. J. R. Macdonald, John Wiley & Sons, New York (1987) Chap. 2



Slika 3: Realni impedančni odziv gorivne celice z ionskim prevodnikom v obliki tanke plasti kot elektrolitom.

DRUŠTVENE NOVICE

40 let magistrskega študija na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani

Pišem po spominu. Iz zgodovinskih vzrokov prosim cenjenega bralca za eventualno korekcijo in dopolnitve.

Zlasti na tehniki je bilo težko priti do doktorata. Februarja 1963 je bil na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, 44 let po ustanovitvi, podeljen 13. doktorat. Redni profesorji, celo Marij Osana, graditelj enkratnega oddajnika v Domžalah, prvega na Balkanu, je bil brez doktorata. Poleg doktorske teze je bilo treba položiti zahteven rigoroz. V tej zvezi je zanimiv izrek akademika prof. dr. Milana Vidmarja: »Če bi mi to znali, kar zahtevamo od novih doktorandov, bi se nivo FE zelo dvignil.«

Nekako konec petdesetih ali v začetku šestdesetih let se je spremenila tozadevna zakonodaja, ki je vpeljala magistrski študij. Magistrski študij je nadomestil rigoroz in omogočil direkten dostop k doktoratu. V to špranjo je vskočil po svojih rezultatih eden od najzaslužnejših znanstvenikov Slovenije, prof. dr. Aleš Strojnik¹, in razpisal leta 1961 prvi magistrski študij s področja **Elektronske optike in elektronskooptičnih naprav** v Ljubljani. Študij je bil tako nov, da ni bilo jasno, ali se okrajša z mgr. ali mag., in niti se ni vedelo, kakšen videz naj imajo diplome. V tej neodločenosti FE si je pisec teh vrstic dal sam izdelati formular za magistrsko diplomu v tiskarni državnih železnic, in sicer rumene barve, ker primernejšega papirja niso imeli. Po velikosti je bila večja od diplomske in manjša od doktorske listine. Iz te Strojnikove šole je izšlo lepo število pro-

fesorjev FE v Ljubljani in Mariboru in tudi nekaj rektorjev obeh slovenskih univerz.

Po odhodu prof. Strojnika na druge kontinente (Avstralijo, Afriko in Ameriko) je ta študijska smer na FE v Ljubljani zamrla. Leta 1983 sta jo prof. dr. Evgen Kansky in pisec teh vrstic z zelo aktivno pomočjo prof. dr. Donlagiča in prof. dr. Kumperščaka oživila na tehniški fakulteti, sedaj FERI v Mariboru pod imenom **Elektronska vakuumistika**. Šola je bila namenjena za celo Jugoslavijo, profesorji so bili poleg domačih tudi iz Beograda in Zürichu in študentov je bilo pri prvem vpisu preko 20. Žal ta smer danes le živožari, doživlja podobno usodo kot slovenska podjetja in banke, ki se pod t.i. privatizacijo ponujajo tujemu kapitalu.

Po mojem vedenju so bili v Strojnikovi šoli podeljeni magisteriji unikat v svetovnem merilu. Tedanji mag. sc. je bil upravičen na docentsko mesto, dr. sc. pa na položaj rednega profesorja. S tem je bil ta doktorat enakovreden nemškemu dr. habil. in ruskemu dr. nauke, mag. sc. pa nemškemu dr. in ruskemu kandidatu dr. znanosti. Naslov magister je bil kasneje vpeljan tudi v Avstriji in je enakovreden naši diplomu. Anglosaksonski master ni identičen z našim mag., kot je ves njihov šolski sistem drugačen od evropskega.

Imam pa občutek, da se enako kot politično Evropski zvezi približujemo s hitrimi koraki tudi v zahtevnosti magisterijev in doktoratov naši severni in verjetno tudi zapadni sosedi.

Prof. dr. Alojz Paulin

¹ Prof. dr. Aleš Strojnik se je rodil v Ljubljani leta 1921, umrl pa je 6.11.1995 v Arizoni, ZDA. Že v zibelko mu je bila dana tehnika, saj sta bila oče in stric profesorja na tehniki. Maturiral je leta 1939 na klasični gimnaziji, se še istega leta vpisal na Oddelek za strojništvo Tehniške fakultete Univerze kralja Aleksandra v Ljubljani. Leta 1941 se je prepisal na Oddelek za elektrotehniko, kjer je v vojnih časih 1944 diplomiral. Doktorat tehniških znanosti je leta 1953 zagovarjal pri prof. Kuhlju iz aerodinamike, postal leta 1955 docent, 1960 izredni in 1968 redni profesor na Elektrotehniški fakulteti.

V Ljubljani je prof. Strojnik naredil nekaj odločujočih premikov. Vpeljal je prvi magistrski podiplomski študij v Srednji Evropi. Iz njegove šole sta izšla dva rektorja Univerze v Ljubljani, nekaj univerzitetnih profesorjev, dekanov in znanstvenikov. Prof. Strojnik je z majhnimi finančnimi sredstvi zgradil prvi elektronski mikroskop v Srednji Evropi. Kljub temu pa je ostal pozabljen. V slovenski enciklopediji je omenjen vsak umetnik in pisec, mnogo tehnikov in gospodarstvenikov pa je zamolčan. To dejstvo je tista večna ločnica, ki nas je in bo ločila od Zahoda, kjer so na prvem mestu, celo pred cesarskimi dinastijami, izumitelji in gospodarstveniki: Krupp, Tiesen, Siemens, Fuggerji, Ford, Peugeot, Sikorsky, Newton, Zworikin, Tesla, Pulman itd.

Tehnološkemu centru za vakuumsko tehniko - ob novem letu na pot!

Leto in nekaj več je minilo, odkar smo pričeli uresničevati iniciativo (dr. Jože Gasperič, mag. Vladimir Murko, Karol Požun, univ. dipl. inž., in mag. Andrej Pregelj) za ustanovitev tehnološkega centra, katerega cilj je, da pomaga povezovati vakuumsko stroko v Sloveniji - od obrti in industrije do raziskovalnih ustanov in univerz.

Večina, s katerimi smo prišli v stik s to namero, se je do nje pozitivno opredelila, in pričeli smo skupaj vleči poteze za formalnopravno formiranje nove institucije. Glede na možnosti kandidiranja na razpis Ministrstva

za gospodarstvo, ki omogoča tehnološkim centrom pomoč pri nekaterih aktivnostih, smo se sredi leta odločili izpeljati registracijo zavoda. Z mnogimi smo bili šele v prvih stikih, z nekaterimi pa se sploh še nismo srečali. Zato je prvinskih ustanoviteljev le devet, z drugimi pa bomo priključitev načrtovali v naslednjem letu.

Zelo dobri podporniki zavoda so Iskrine tovarne: Zaščite, Elvelux, Varistor in Medical, ki skupaj dajejo prostor (sedaj še precej neurejen) v Stegnah za labo-

ratorij in glede na pogovore tudi nekaj opreme zanj ter zagotavljajo afirmiranje Centra. Zbrana sredstva (ustanovni vložki in subvencija ministrstva) so po odbitju registracijskih stroškov skupaj blizu 2 mio SIT. Z njimi bomo urejali laboratorij, dopolnjevali njegovo opremo, pokrili računovodska in druga manjša opravila ter plačali morebitno najemnino. V prihodnjem letu bomo čim prej izvedli občni zbor in sprejeli statut, potem pa poleg oblikovanja že omenjenega laboratorija ustanovili raziskovalno skupino, izpeljali prijave razisko-

valnih nalog na razpise ministrstev in uredili pisarno Centra.

Kot je razvidno, prihodnost še ni udejanjena, to bomo storili skupaj z dobro voljo in dobrimi idejami.

Ob koledarski prelomnici se veselimo novega sodelovanja in želimo, da bi bilo leto 2002 srečno in uspešno.

mag. Andrej Pregelj

Nagrado za najboljši poster na Evropski vakuumski konferenci je prejela slovenska vakuumistka Alenka Vesel

V Madridu v Španiji je bila od 17. do 20. septembra 2001 Evropska vakuumška konferenca, ki se je je udeležilo skoraj 200 vakuumistov iz Evrope, pa tudi ZDA in Japonske. Prispevki so bili predstavljeni v naslednjih sekcijah:

- Vakuumške tehnologije
- Uporabna znanost o površinah, elektronski materiali in njihova obdelava
- Tanke plasti
- Trde prevleke
- Nanostrukture, nanotehnologije in nanokemija.

Plenarna predavanja so predstavili S. J. Bull (University of Newcastle, Velika Britanija), A. R. Gonzales – Elipe (Instituto de Ciencia de Materiales, Španija), P. Manini (SAES Getters, Italija) in S. Watanabe (Institute of Physical and Chemical Research, Japonska).

Na konferenci je bilo nad 50 predavanj, ki so potekala v dveh vzporednih sekcijah. Poleg predavanj je bila tudi posterska sekcija. Lokacija za posterje – vhodna

dvorana Visoke tehniške šole v Madridu – je bila zelo posrečeno izbrana, saj je omogočala dobro preglednost in odziv tako udeležencev konference kot strokovnega osebja in študentov. Predstavljenih je bilo okoli sto posterjev.

Slovenska udeležba je bila skromna, posebej še v primerjavi s prejšnjimi evropskimi vakuumškimi konferencami. Slovenci smo imeli dve predavanji in dva posterja.

Na konferenci je bila razpisana nagrada za najboljši poster. Strokovna komisija je ocenjevala tako vsebino kot tudi obliko in predstavitev problematike. Nagrado za najboljši poster je prejela slovenska vakuumistka Alenka Vesel, univ. dipl. fiz., s soavtorjem in mentorjem dr. Miranom Mozetičem za prispevek z naslovom Discharge Characteristics of a Magnetron Cell in Ultrahigh Vacuum.

Iskreno čestitamo!



scan

in

PFEIFFER VACUUM

VSE ZA VAKUUM

tel.: 04-27 50 200 fax.: 04-27 50 240

www.scan.si

scan@siol.net



www.pfeiffer-vacuum.de

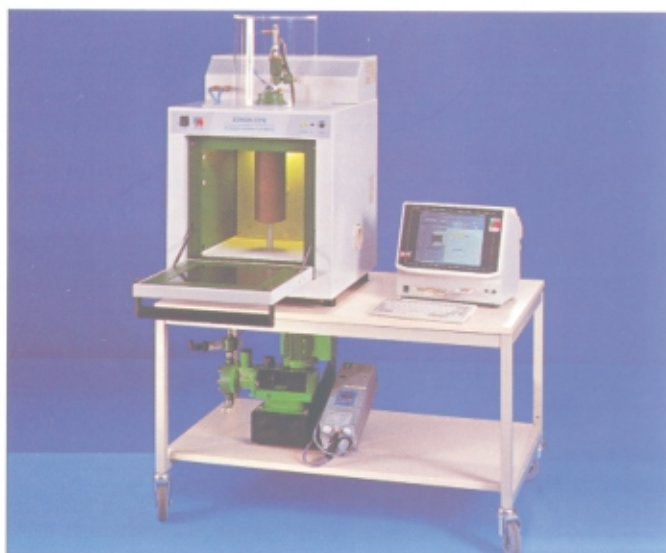
Podtlačni zgoščevalnik



Prvi ročni detektor
nevarnih kemijskih snovi
CHEMPRO 100



CHEMPRO
100



MILESTONE



M I C R O W A V E
L A B O R A T O R Y S Y S T E M S

Mikrovalovni reaktor serije ETHOS CFR za
uporabo v organski kemiji (The ETHOS CFR
Series of Microwave Reactor)



Podrobnejše informacije dobite v podjetju

DR. NEMO, d.o.o.

proizvodnja, zastopstvo, tehnična podpora
in svetovanje

Štrekljeva 3, 1000 Ljubljana

tel.: 01/241 03 00

fax: 01/241 03 10

elektronska pošta: dr-nemo@dr-nemo.si