

ICONISMUS XI



Fig. IV.

VAKUUMIST

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



42 let
DVTS

Fig. II.

LJUBLJANA, JUNIJ 2001

ISSN 0351-9716

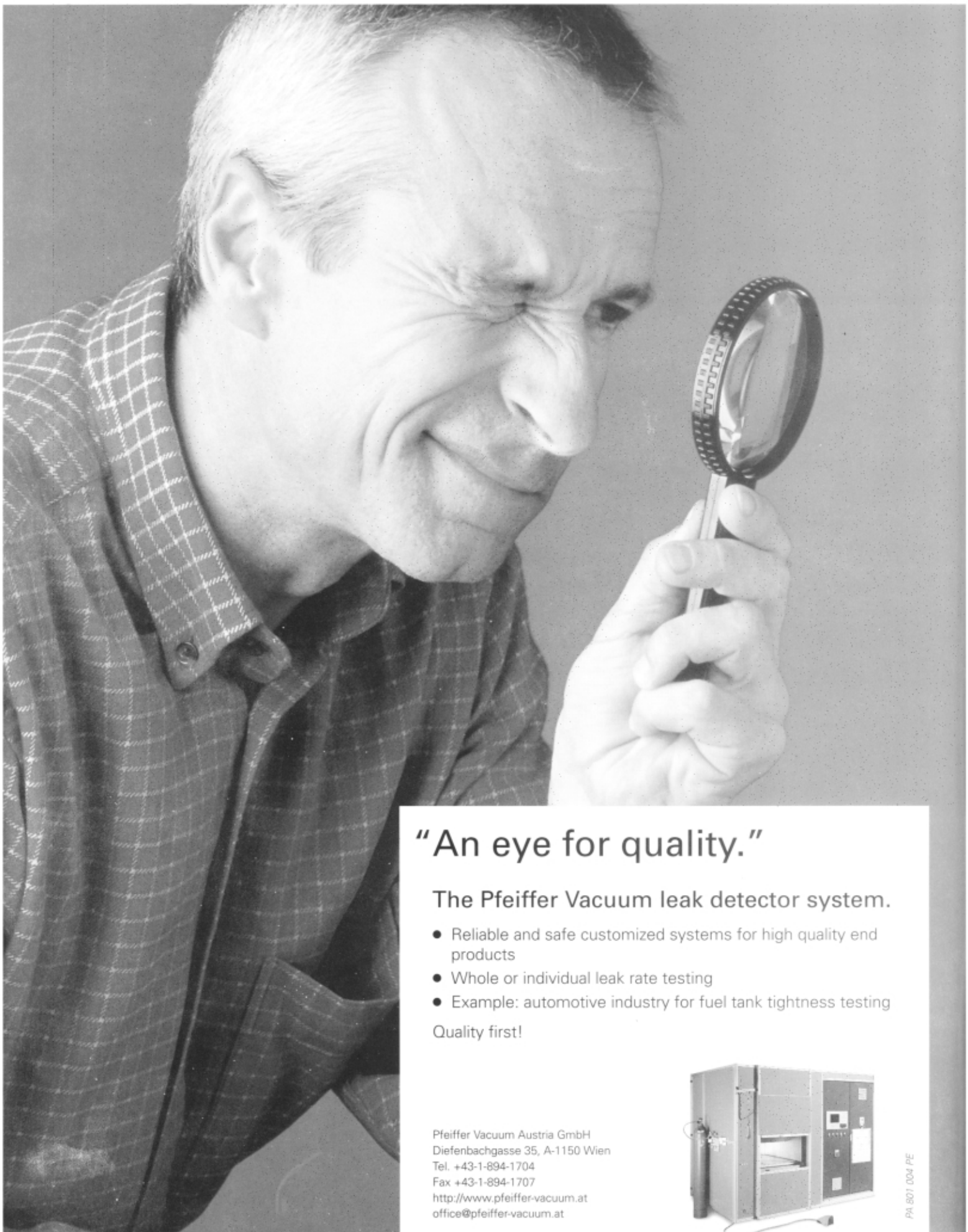
LETNIK 21, ŠT. 2 2001

UDK 533.5.62:539.2:669-982



SCAN d.o.o. zastopniško servisno podjetje
Breg ob Kokri 7, 4205 Preddvor, Slovenija
Tel.: 04 27 50 200, Fax: 04 27 50 540,

PFEIFFER  VACUUM



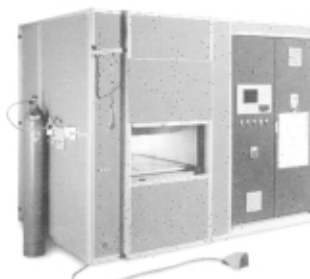
"An eye for quality."

The Pfeiffer Vacuum leak detector system.

- Reliable and safe customized systems for high quality end products
- Whole or individual leak rate testing
- Example: automotive industry for fuel tank tightness testing

Quality first!

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH
Diefenbachgasse 35, A-1150 Wien
Tel. +43-1-894-1704
Fax +43-1-894-1707
<http://www.pfeiffer-vacuum.at>
office@pfeiffer-vacuum.at



VSEBINA

- ☐ Nanašanje tankih plasti s pulznim laserjem (D. Kek, P. Panjan)

- ☐ Vakuumsko meroslovje v Laboratoriju za metrologijo tlaka (J. Šetina, B. Erjavec, L. Irmančnik-Belič)

- ☐ Plazemska krogla (M. Čekada)

- ☐ Sinteza nanocevk MoS₂ - odmevno odkritje znantvenikov z Instituta »Jožef Stefan« (P. Panjan)

- ☐ Vakuumski poskusi na Boškovičevem rimskem kolegiju (S. Južnič)

- ☐ J.J. Thomsonovo raziskovanje »negativnih in pozitivnih žarkov« –
2. del: Thomsonovo raziskovanje »pozitivnih žarkov« (S. Južnič)

- ☐ NASVETI - Vakuumsko prijemanje in transport predmetov (J. Gasperič)

- ☐ OBVESTILA

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 znanost in tehnologijo**
- **Ministrstvo za šolstvo in šport**
- **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 vakuumske tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumske 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

NANAŠANJE TANKIH PLASTI S PULZNIH LASERJEM

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

Pulsed laser deposition of thin films

ABSTRACT

High-power laser pulses can be used to vaporize a small area of the target. Generated cloud of the target material is then deposited onto the substrate. Laser radiation passing through the vapor cloud can also ionize a high percentage of the vapor. The most common laser type is the excimer laser with wavelength from 151-351 nm depending on the selected gas mixture (ArF - 193 nm, KrF - 248 nm, XeCl - 308 nm) or solid Nd:YAG lasers (266-1064 nm). Lasers operate in pulses of energy between 0,1 to 1 J per pulse, duration time is between 5 and 45 ns and commonly used repetition rates of 1 to 100 Hz. This technique is ideal for the deposition of complex, multicomponent materials like high-temperature superconductors, ferroelectric and ferromagnetic materials.

POVZETEK

Visokoenergijski pulz laserske svetlobe lahko uporabimo za uparitev majhnega volumna na površini tarče. Oblak delcev materiala tarče, ki pri tem nastane, kondenzira na podlagah. Laserska svetloba hkrati do visoke stopnje ionizira pare materiala. Za ta namen je najprimernejši ekscimerski plinski (ArF - 193 nm, KrF - 248 nm, XeCl - 308 nm) ali trdni Nd-YAG laser (266-1064 nm). Laserji delujejo v pulzih, ki trajajo med 5 in 45 ns, frekvenca ponavljanja je med 1 in 100 Hz, energija enega pulza pa je približno 0,1-1 J. Ta tehnika nanašanja je idealna za nanos tankih plasti kompleksnih, večkomponentnih materialov, kot so visokotemperaturni superprevodniki, feroelektrične in feromagnetne snovi.

1 Uvod

Nanašanje tankih plasti s pulznim laserjem je relativno nova tehnika priprave tankih plasti /1/, čeprav so bile prve teoretične in eksperimentalne raziskave, ki so obravnavale interakcije med lasersko svetlobo in trdno snovjo, uparitev trde snovi in nanos le-te v obliki tanke plasti na podlage /2,3/, objavljene kmalu po odkritju visokoenergijskega rubinovega laserja leta 1960 /4/. Po prvih odkritjih je razvoj nanašanja tankih plasti s pulznim laserjem nekako zastal, verjetno zaradi skromne laserske tehnologije in intenzivnega razvoja konkurenčnih metod priprave tankih plasti (npr. naprševanje, naparevanje, epitaksija z molekularnim curkom). Zanimanje za ta postopek se je močno povečalo leta 1987, ko so z njo uspešno pripravili prve tanke plasti visokotemperaturnih superprevodnikov na osnovi $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ /5/. Bistvo postopka je »uparitev« in delna ionizacija materiala tarče s pulzom laserske svetlobe. Stopnja ionizacije par je relativno velika. Lasersko »uparevanje« snovi imenujemo pogosto tudi lasersko odnašanje (laser ablation), lasersko naprševanje ali lasersko naparevanje. Slednja dva pojma pa glede na mehanizem »uparevanja« materiala tarče nista ustrezna.

Pri večini postopkov nanašanja tankih plasti je tlak preostalih plinov oz. tlak reaktivnih plinov v vakuumski posodi omejujoč dejavnik. Pri naparevanju z elektronskim curkom ta tlak ne sme biti višji od 10^{-4} mbar, medtem ko pri naprševanju delni tlak reaktivnega plina določa hitrost nanašanja. Pri nanašanju tankih plasti s pulznim laserjem pa tlak preostalih plinov ni ovira, zato lahko s to tehniko nanašamo tudi tanke plasti pri delnem tlaku reaktivnega plina (npr. kisika) več kot 1 mbar.

Lasersko nanašanje tankih plasti je zlasti primerno za pripravo večkomponentnih oksidov, kot npr. visokotemperaturnih superprevodnikov (Bi-Sr-Ca-Cu-O , YBCO) /6/, feroelektričnih ($\text{PZT-PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) /7/ ter feromagnetnih materialov (npr. $\text{Bi}_{1,5}\text{Y}_{1,5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) /8/. Prednost laserskega nanašanja tankih plasti visokotemperaturnih superprevodnikov je v tem, da stehiometrija plasti ustreza tisti, ki jo ima tarča. V primeru YBCO je bistveno, da je vsebnost kisika $x=7$, zato poteka nanašanje pri visokem delnem tlaku kisika v vakuumski posodi, ki pa ga je nemogoče zagotoviti pri klasičnih postopkih nanašanja (epitaksija z molekularnim curkom, naparevanje, naprševanje). Druga prednost je relativno velika hitrost nanašanja. Slaba stran pa je predvsem majhna površina podlage, na katero lahko pripravimo tanko plast z enakomerno debelino in sestavo. Vendar je bil v zadnjih letih tudi na tem področju dosežen določen napredek. V nekaterih sistemih lahko s skeniranjem laserskega žarka, vrtenjem tarče in podlag pripravimo tanke plasti na 8-palčne (20 cm) silicijeve rezine.

2 Fizikalne osnove

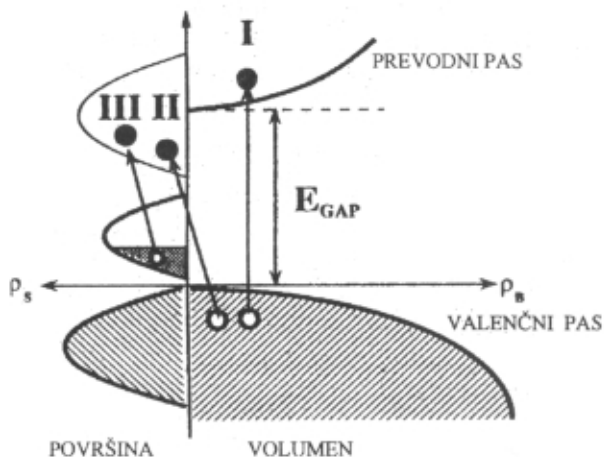
Bistvo postopka nanašanja tankih plasti z laserjem je odnašanje materiala tarče s pulzom kratkovalovne laserske svetlobe. Ko na tarčo fokusiramo pulz takšne kratkovalovne laserske svetlobe, se le-ta absorbira. Koeficient absorpcije materiala tarče in presek za vzbujanje atomov uparjenega materiala sta zelo odvisna od valovne dolžine svetlobe. Ultravijolično sevanje ekscimerskega laserja se absorbira v vrhnji plasti tarče (do približno 100 nm). Absorbirana energija povzroči hitro segrevanje (10^8 K/s) majhnega področja tarče do temperature več tisoč stopinj celzija, medtem ko področje pod njim ostane na sobni temperaturi. Takšno neravnotežno segrevanje povzroči izbruh uparjenega materiala. Na mestu, ki ga zadane laserska svetloba z gostoto energijskega toka 1 J/cm^2 , tlak v materialu naraste do 100 bar. Deyer in Srinivasan /9/ sta odkrila, da pride do izbitja materiala 4-6 ns po začetku laserskega pulza. Nad površino tarče se oblikuje svetleč oblak par. Z laserjem uparjen material potuje zelo usmerjeno skozi vakuum do podlag, kjer kondenzira. Ekspanzija oblaka izparejnih delcev materiala je odvisna od tlaka v vakuumski posodi. Hitrostna porazdelitev uparjenih delcev je podana z Maxwell-Boltzmannovo porazdelitvijo. Pare uparjenega materiala so delno ionizirane. Do ionizacije pride pri prehodu laserske svetlobe skozi oblak par.

Interakcije laserske svetlobe z materialom tarče je prvi obravnaval Ready /10/. Mehanizem interakcije med lasersko svetlobo in trdnim materialom temelji na vzbujanju elektronov s fotoni. Ta interakcija je zelo komplicirana in še vedno ni splošno privzetega fizikalnega modela. Raziskovalci se strinjajo, da poteka več mehanizmov hkrati. Upoštevati moramo vsaj tri vrste vzbujanja:

- vzbujanje elektronov in fononov v kristalni strukturi
- vzbujanje prostih elektronov
- vzbujanje oblaka plazme.

Kateri od teh procesov prevladuje, je odvisno od lastnosti materiala tarče in karakteristike laserske svetlobe. V primeru kovinskega materiala bo laserska svetloba interagirala v glavnem s prostimi elektroni. Tak proces lahko opišemo kot pretežno termičen proces /11/. Pri dielektričnih materialih, kjer prostih elektronov praktično ni, absorpcija svetlobe poteka z vezanimi elektroni v kristalni mreži. Pri polprevodnikih imamo kombiniran mehanizem interakcije laserske svetlobe s prostimi in vezanimi elektroni. Natančnejši mehanizem je odvisen od oblike energijskih pasov in od energije defektnih stanj v kristalni strukturi. Proces vzbujanja lahko zelo grobo opišemo, če primerjamo energijo fotona $h\nu$ s širino prepovedanega pasu E_g materiala tarče. V primeru, ko je $h\nu < E_g$, pride do vzbujanja in prenosa elektronov znotraj energijskih pasov, ki se kaže v vibracijah kristalne mreže. Efektivnih prenosov elektronov iz prevodnega pasu (površine materiala) je malo tudi pri večkratnem (zaporednem-pulznem) vzbujanju (slika 1). V primeru, ko je energija fotona večja od širine prepovedanega pasu ($h\nu - E_g > 0$), se presežna energija fotonov transformira v energijo fononov, kar povzroči segrevanje osvetljene površine materiala tarče /12/. Če imamo npr. tarčo iz feroelektričnega PLZT keramičnega materiala (širina prepovedanega pasu je $E_g = 3,6$ eV) in ekscimerski laser valovne dolžine 308 nm (s pripadajočo energijo fotona 4,03 eV), potem pride pri interakciji do hitrega segrevanja in celo taljenja materiala. Tak proces opišemo kot pretežno termičen proces odnašanja /13/. Zaradi majhne toplotne prevodnosti in sevalnih izgub v tarči se površina tarče segreje na temperaturo uparjanja (T_v) v času t_{th} od začetka interakcije z laserskim pulzom. Ko je dosežena kritična energija za začetek procesa, se sproži verižna reakcija, ki ustvari pogoje za »izparitev« velikega števila atomov, ionov in molekul s površine.

Pri nizkih tlakih »izparitev« povzroči nastanek plazme, ki se širi adiabatsko. Taka plazma je sestavljena iz nevtralnih in ioniziranih atomov, molekul, elektronov in večjih, nanometrskih delcev. Ker se plazma razširi v prostor, skozi katerega poteka laserski žarek, lahko interagira s fotoni laserskega žarka. Ta interakcija spremeni lastnosti primarno uparjenega materiala, npr. temperatura plazme se poveča, delci se gibljejo hitreje, poveča se ionizacija itd. Večja površinska difuzija pa lahko odločilno vpliva na rast tanke plasti materiala na podlagi.

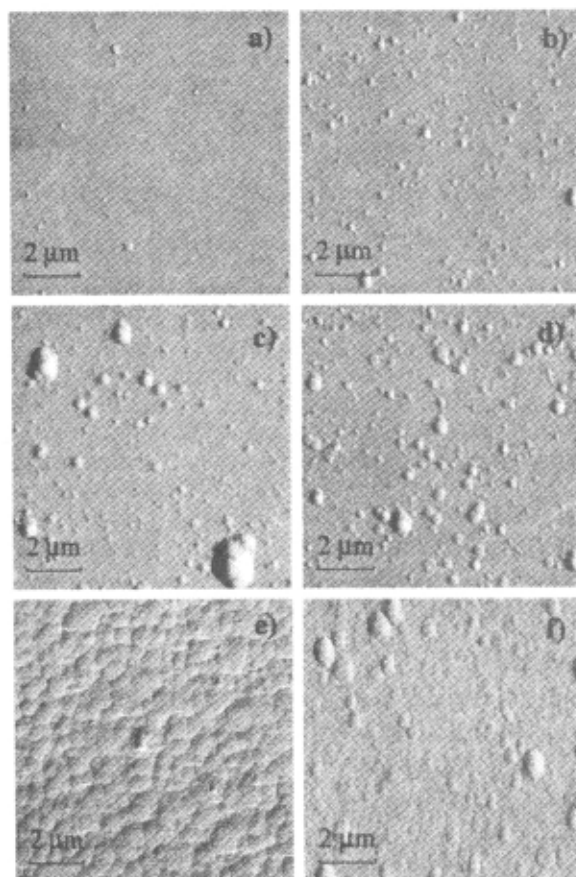


Slika 1: Shema možnih elektronskih vzbujanj na površini trdnih materialov.

Hitrost izparjenih delcev je odvisna od moči laserskega žarka in lastnosti tarče materiala, kakor tudi od tlaka v vakuumski posodi. Primer: pri interakciji med lasersko svetlobo valovne dolžine 248 nm in kovinsko tarčo aluminija se večina »izparjenih« delcev širi s hitrostjo med 5 in 34 km/s v vakuumu /14/. Delci dosežejo največjo hitrost pri gostoti energije žarka $7,2 \text{ J/cm}^2$.

Mehanizem rasti tanke plasti je odvisen od pogojev, ki jih imamo v vakuumski posodi, lastnosti materiala, ki ga nanašamo, lastnosti podlag, moči laserskega žarka in temperature podlage. Pri procesu laserskega odnašanja nastajajo poleg nevtralnih in ioniziranih atomov, molekul in elektronov tudi večji delci mikrometrskih dimenzij. Ti delci navadno nastanejo pri interakciji laserskega žarka s staljeno površino materiala tarče. Obstoj teh delcev (slika 2) poslabša strukturne lastnosti tankih plasti, zlasti tiste za optično uporabo.

Teoretične in eksperimentalne raziskave procesov laserskega odnašanja so pokazale, da obstaja neposredna povezava med eksperimentalnimi pogoji (gostota plazemskega fluksa, energija delcev, temperatura podlage) in nekaterimi lastnostmi plasti (debelina, adhezija, struktura in sestava). Temperatura podlage je pomemben parameter, s katerim lahko kontroliramo tako kristalno strukturo plasti, kot tudi ohranjamo stehiometrično sestavo večkomponentnih plasti. Parame-



Slika 2: AFM-slika amorfne feroelektrične plasti pri različnih gostotah laserskega žarka a) 0,4, b) 0,66, c) 1,0 in d) 2,0 J/cm^2 . Velikost največjih delcev je okoli $1 \mu\text{m}$. Slike e) in f) prikazujeta plasti na slikah a) in d) po segrevanju pri povišani temperaturi.

Tabela 1: Hitrosti nanašanja tankih plasti za različne kovinske materiale /19/

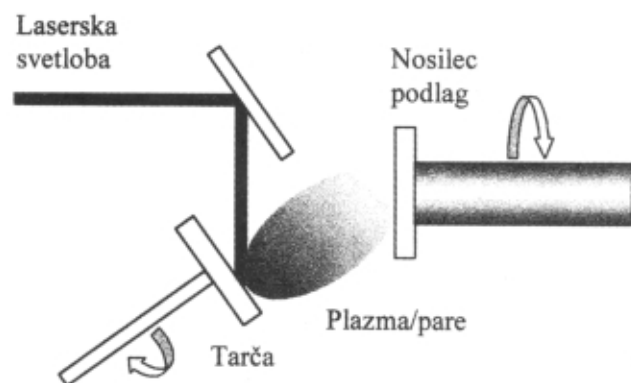
kovina	laserski žarek	hitrost rasti (pm/pulz)	razdalja tarča-podlaga (mm)
Au	1064 nm / 20 ns / 5 Jcm ⁻²	1	17
	308 nm / 20 ns / 5 Jcm ⁻²	23	25
Al	1064 nm / 20 ns / 5 Jcm ⁻²	3	17
Cu	308 nm / 27 ns / 4,5 Jcm ⁻²	1,2	40
Fe	308 nm / 27 ns / 4,5 Jcm ⁻²	3,2	40
Pt	248 nm / 30 ns / 4J cm ⁻²	8	20
Ti	308 nm / 27 ns / 5 Jcm ⁻²	2,5	34
Co	308 nm / 27 ns / 4,5 Jcm ⁻²	2,4	40

tre plazme (gostota plazemskega fluksa in energijo delcev) kontroliramo s spreminjanjem energijskih in spektralnih lastnosti laserskega žarka. Ugotovili so, da dovolj visoka gostota plazemskega fluksa omogoča pripravo zelo tankih plasti celo na nesorodne materiale /16/. Rezultat tega so periodične, večplastne strukture tankih plasti, ki so ena od prednosti (posebnosti) tehnike laserskega odnašanja.

Hitrost nanašanja tanke plasti je odvisna od vrste materiala tarče in moči laserskega žarka. Tabela 1 prikazuje hitrost nanašanja za različne kovinske materiale. Pri nekovinskih materialih pa naj omenimo le feroelektrične tankih plasti, katerih značilna hitrost nanašanja je med 0,25 in 0,4 nm/s /15/.

3 Opis naprave za nanašanje tankih plasti s pulznim laserjem

Shema in slika naprave za nanašanje tankih plasti z laserjem sta prikazani na slikah 3 in 4. Izvir laserske svetlobe je ekscimerski (ArF - 193 nm, KrF - 248 nm, XeCl - 308 nm) ali Nd-YAG laser (266-1064 nm), ki delujeta v pulzih (5-20 ns, 5 Hz) z energijo približno 300 nJ/pulz. Tarča in nosilec podlag se nahajata v vakuumskem sistemu, ki ima okno, prepustno za izbrano lasersko svetlobo. Za ArF ekscimerski laser je odgovarjajoče steklo kremenovo. Z notranje strani okna dovajamo kisik ali argon, da preprečimo nanos



Slika 3: Shema naprave za nanašanje tankih plasti z laserskim curkom

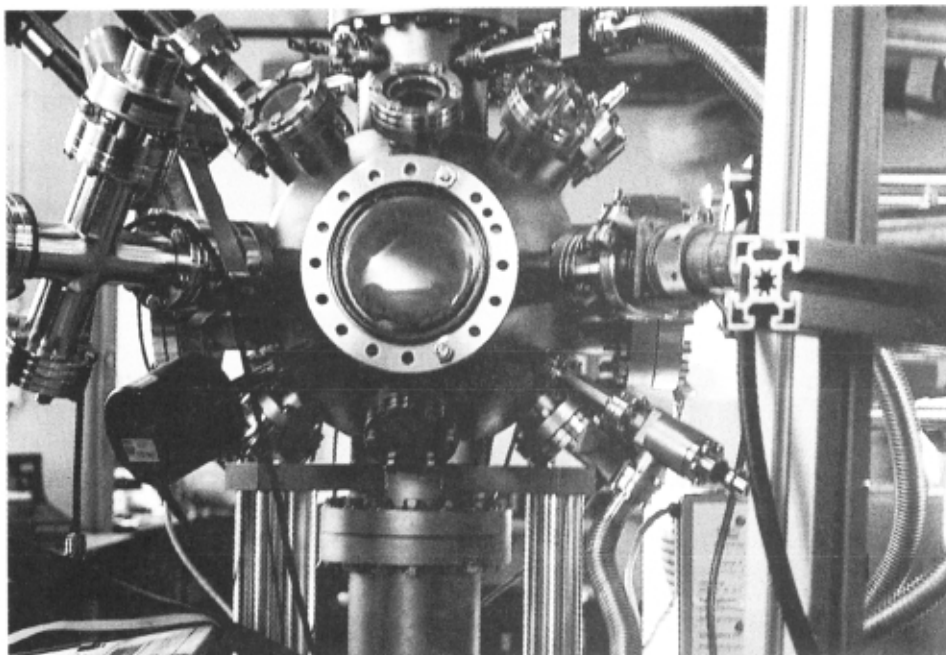
plasti na steklo. Med nanašanjem se tarča praviloma vrti, da izločimo možnost spremembe njene sestave zaradi lokalnega pregretja. S skeniranjem laserskega curka in vrtenjem tarče dosežemo, da se le-ta porablja enakomerno in da ima plast na podlagi čimbolj enakomerno debelino. Značilna razdalja med podlago in tarčo je 2-5 cm. Tarča in podlage so praviloma vzporedne, ker na tak način najlažje dosežemo simetrično porazdelitev debeline plasti na podlagi. Tarča za lasersko nanašanje tankih plasti je veliko manjša od tistih, ki jih potrebujemo npr. za naprševanje. Z merjenjem števila pulzov lahko dokaj natančno kontroliramo debelino plasti. V nekaterih primerih se laserski curek razcepi na dva dela; en del osvetli tarčo, drugi del pa površino podlage. Pri osvetlitvi podlage z laserskim curkom delno vzbudimo molekule kisika in atome kovinskih elementov, ki kondenzirajo na podlagah. Tako je možno vplivati na strukturo plasti in njene lastnosti.

Za nanos kvalitetnih plasti je zelo pomembna tudi priprava tarče. Visokokvalitetne plasti dobimo, če uporabimo tarčo z veliko gostoto. Plasti brez drobnih kapljic dobimo samo v primeru, če je tarča amorfna. Po daljšem obratovanju del tarče, ki smo ga uparili, izgubi začetno stehiometrično sestavo, zato moramo laserski curek usmeriti na tisti del površine tarče, ki še ni bil uparjen.

Ena glavnih prednosti naprave za lasersko nanašanje je njena cena (stane približno 10-krat manj kot konkurenčna metoda epitaksija z molekularnim curkom - MBE). Druga prednost naprave je ta, da je laser kot vir energije ločen od sistema depozicije. Kompleksne večplastne strukture lahko naredimo tako, da preprosto izmenjujemo tarče materialov, ki jih namestimo na vrtljiv nosilec. Dodatno lahko za spremembo poti laserskega žarka uporabimo ogledala. Tako lahko zgradimo nekaj depozicijskih sistemov okoli enega samega laserja.

4 Sklep

Postopek nanašanja tankih plasti s pulznim laserjem najpogosteje uporabljajo raziskovalci, ki poskušajo sintetizirati nove vrste tankih plasti na osnovi večkomponentnih materialov. Številni materiali te vrste, ki so jih tako pripravili, so zelo obetavni. Naštejmo le nekaj primerov: a) tankoplastni kondenzatorji za integrirana



Slika 4: Slika naprave za nanašanje tankih plasti z laserskim curkom

vezja z veliko gostoto na osnovi barij-stroncij-titan oksida; velikost kondenzatorjev se bo dramatično zmanjšala, b) železov oksid za magnetni zapis, c) litij-niobij oksid za uporabo v optoelektroniki.

V primerjavi s konvencionalnimi postopki nanašanja tankih plasti (naprejevanje, naprševanje, epitaksija z molekularnim curkom itd.) ima nanašanje z laserskim curkom naslednje prednosti:

- a) nanašamo lahko materiale z visoko temperaturo tališča, če absorbirajo lasersko svetlobo
- b) kontaminacije plasti, ki je pri naprejevanju iz ladij ali žarečih nitk velika težava, pri laserskem nanašanju praktično ni
- c) plasti lahko nanašamo pri relativno visokem tlaku kisika, saj v vakuumski posodi ni žarečih ladij ali nitk za naprejevanje
- d) enostavno je zagotoviti stehiometrijsko sestavo plasti (sestava plasti je identična sestavi tarče)
- e) hitro segrevanje majhnega področja tarče omogoča nanašanje plasti pri relativno nizki temperaturi podlag. Tako se lahko izognemo degradaciji občutljivih podlag (npr. integriranih vezij na polprevodniških podlagah)
- f) med nanašanjem tankih plasti s to metodo je treba kontrolirati le majhno število parametrov, zato je postopek enostaven.

Slabosti postopka pa sta predvsem naslednji:

- a) na površini plasti pogosto opazimo veliko število kapljic in izrastkov submikrometrskih dimenzij, ki nastanejo med kristalizacijo plasti. Na nastanek kapljic v veliki meri vplivamo z ustrezno izbiro valovne dolžine laserske svetlobe. Kolikšna je velikost gruč atomov v oblaku izparjenega materiala, še ne vemo natančno. V primeru laserskega

naprejevanja visokotemperaturnega superprevodnika na osnovi YBCO v literaturi nekateri avtorji navajajo, da so izbiti delci v glavnem majhne gručice (npr. BaO, Ba₂O₂, YBaO₂) /17/, drugi /18/ pa, da je povprečna velikost gruč 10⁴ atomskih enot mase.

- b) relativno ozka kotna porazdelitev »izparjenih« delcev.

5 Literatura

- /1/ A. Morimoto, T. Shimizu, Handbook of Thin Film Process Technology (Ured. D.A. Glocker in S.I. Shah), IOP Publishing, Bristol, 1995, A1.5:1
- /2/ H.M. Smith & A.F. Turner, Vacuum deposited thin films using a ruby laser, Applied Optics 4/1 (1965), 147.
- /3/ J.F. Ready, Appl. Phys. Lett. 3 (1963) 11.
- /4/ T.H. Maiman, Stimulated optical radiation in ruby, Nature, 4736 (1960) 493.
- /5/ D. Dijkkamp, T. Venkatesan, D.X. Wu, S. Shaheen, N. Jisrawi, Y.H. Min-Lee, W.L. McLean, M. Croft, Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 619
- /6/ T. Venkatesan, S.M. Green, The Industrial Physics, 1996, 22
- /7/ S. Otsubo, T. Maeda, T. Minamikawa, Y. Yonezawa, A. Morimoto, T. Shimizu, Jap. J. Appl. Phys. 29 (1990) L133
- /8/ H. Kidoh, A. Morimoto, T. Shimizu, Appl. Phys. Lett. 59 (1991) 237
- /9/ P.E. Deyer, R. Srinivasan, Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 445
- /10/ J.F. Ready, Appl. Phys. Lett. 3 (1963) 11
- /11/ J.M. Hicks, L.E. Urbach, E.W. Plummer, H.L. Dai, Phys. Rev. Lett. 61(1988) 2588.
- /12/ I. W. Boyd, v: Laser Processing of thin films and Microstructures, Springer-Verlag, Berlin (1987), str. 33.
- /13/ Jr. R.F. Hanglund & N. Itoh v: Laser Ablation, Editor J.C. Miller, Springer-Ferlag, Berlin (1994) str 11-52.
- /14/ R. M. Gilgenbach, P.L.G. Vanzek, Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 1597.
- /15/ J. Lappalainen, J. Frantti, V. Lantto, Appl. Surf. Sci. 142 (1999) 407.
- /16/ S. Metev, K. Meteva, Appl. Surf. Sci. 43 (1989) 402
- /17/ T. Venkatesan et al, Appl. Phys. Lett., 53 (1988), 1431
- /18/ C.H.Becker, J.B. Pallix, J. Appl. Phys., 64 (1988), 5152
- /19/ J.T. Cheng, v: Pulsed Laser Deposition of Thin Films, Editors D.B. Chrisey, G.K. Hubers, John Wiley&Sons, Inc., New York (1994) str 457.

VAKUUMSKO MEROSLOVJE V LABORATORIJU ZA METROLOGIJO TLAKA

Janez Šetina, Bojan Erjavec, Lidija Irmančnik-Belič, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

Vacuum metrology in the Laboratory of Pressure Metrology

ABSTRACT

The metrology system of the Republic of Slovenia is briefly described. Activities in the field of vacuum metrology in the Laboratory of Pressure Metrology at the Institute of Metals and Technology are presented.

POVZETEK

V prispevku je predstavljen meroslovni sistem Republike Slovenije in dejavnost na področju vakuumskega meroslovja v Laboratoriju za metrologijo tlaka na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani.

1 Meroslovni sistem v Republiki Sloveniji

Vsaka država mora imeti nacionalni meroslovni sistem, s katerim zagotovi, da so meritve in preskušanja, ki se izvajajo v državi, zanesljiva in verodostojna ter mednarodno primerljiva. Meroslovni sistemi v posameznih državah se lahko med seboj razlikujejo glede na velikost države, njeno ekonomsko razvitost, potrebe industrije in drugih panog gospodarstva ter seveda finančnih virov, ki jih je država pripravljena vlagati v meroslovno infrastrukturo. V osnovi imamo dva sistema. V centraliziranem sistemu imamo na najvišjem nivoju v državi eno samo nacionalno meroslovno institucijo, ki skrbi za vse nacionalne merilne etalone (navadno so to primarni etaloni). V porazdeljenem ali distribuiranem sistemu imamo več neodvisnih laboratorijev, ki so v okviru nacionalne organizacije odgovorni za izvedbo in vzdrževanje nacionalnih merilnih etalonov za posamezne merske veličine. V obeh sistemih imamo še mrežo usposobljenih kalibracijskih laboratorijev, ki so s svojo dejavnostjo diseminacije merskih enot vezni člen med nacionalnimi etaloni in končnimi uporabniki.

Primer centraliziranega sistema imamo v Nemčiji s PTB (Physikalisch - Technische Bundesanstalt) kot nacionalnim meroslovnim inštitutom in DKD (Deutscher Kalibrierdienst), ki je mreža akreditiranih kalibracijskih laboratorijev. Primer porazdeljenega meroslovnega sistema lahko najdemo na Finskem (FINMET) in Danskem (DANIAMET).

Ob osamosvojitvi Slovenije v letu 1991 se je pojavila potreba po čimprejšnji organizaciji in vzpostavitvi nacionalnega meroslovnega sistema, ki naj bi zadostil potrebam slovenskega gospodarstva, ki se je moralo v tem času preusmeriti na zahodne trge. Sistem naj bi tudi zadovoljivo opravljal naloge v okviru zakonskega meroslovja, ki je namenjeno predvsem varovanju zdravja ljudi in živali, varstvu okolja in splošne tehnične varnosti, prometa blaga in storitev ter postopkov pred upravnimi in pravosodnimi organi.

Po temeljiti analizi zmožnosti in potreb Slovenije je bilo ugotovljeno, da je pri gradnji nacionalnega meroslovnega sistema treba izkoristiti vse človeške in mate-

rialne vire v državi. Sprejeta je bila odločitev, da je za našo državo najprimernejši sistem porazdeljenih nacionalnih etalonov. Vlogo krovne in odgovorne institucije je prevzel Urad Republike Slovenije za standardizacijo in meroslovje (USM), ki je bil ustanovljen v okviru Ministrstva za znanost in tehnologijo takoj po osamosvojitvi Slovenije leta 1991. Uradu je bila zaupana naloga, da vzpostavi slovenski meroslovni sistem, nacionalno standardizacijo in akreditacijsko službo.

V letu 2001 je bil USM reorganiziran. Področje standardizacije je bilo preneseno v novo ustanovljeni Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST), področje akreditacije pa v javni zavod Slovenska akreditacija (SA). USM se je preimenoval v Urad RS za meroslovje. Ob reorganizaciji državne uprave pa je bil ta urad prestavljen pod okrilje Ministrstva za šolstvo, znanost in šport (MŠZŠ).

1.1 Sistem nacionalnih etalonov RS

Zaradi omejenih finančnih virov je morala biti Slovenija pri zasnovi in graditvi nacionalnega meroslovnega sistema skrajno racionalna, zato so bile v sistem integrane obstoječe merilne in kalibracijske zmogljivosti različnih laboratorijev na univerzah, raziskovalnih inštitutih in tudi v industriji. Sistem je bil zasnovan na referenčnih etaloni s primerno majhno merilno negotovostjo, za katere je vzpostavljena sledljivost do ustreznih primarnih etalonov v tujih nacionalnih laboratorijih. S tem da smo v prvi fazi graditve nacionalnega meroslovnega sistema zavestno opustili realizacijo enot SI-sistema z dragimi primarnimi etaloni, smo lahko del prihranjenih sredstev namenili za zagotovitev prenosa ali diseminacije vrednosti merskih enot od nacionalnih etalonov do uporabnikov v industriji in javnem sektorju.

Po Zakonu o meroslovju je Urad RS za meroslovje primarno odgovoren za sistem nacionalnih etalonov. Le-te lahko izvede, hrani in vzdržuje sam, lahko pa Urad prizna za nacionalni etalon ustrezen referenčni etalon, ki ga izvede in vzdržuje druga pravna oseba. Pogoji za priznanje nekega referenčnega etalona za nacionalni etalon so natančno navedeni v Uredbi o nacionalnih etaloni (Uradni list RS 49/96). Laboratorij lahko postane nosilec nacionalnega etalona merske veličine, če dokaže svojo usposobljenost z akreditacijo pri Slovenski akreditaciji ali drugi mednarodno priznani akreditacijski službi. To je ključna zahteva Uredbe o nacionalnih etaloni.

V prvi fazi graditve sistema nacionalnih etalonov je bila pozornost posvečena osnovnim enotam SI-sistema, ki so najpomembnejše v vsakdanjem življenju. Do sedaj je Urad priznal kot nosilce nacionalnih etalonov naslednje akreditirane laboratorije:

- Laboratorij za maso (LM) Urada RS za meroslovje za nosilca nacionalnega etalona za maso
- Laboratorij za metrologijo in kakovost (LMK) v okviru Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani kot

nosilca nacionalnega etalona za termodinamično temperaturo

- Laboratorij za tehnološke meritve (LTM) v okviru Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru kot nosilca nacionalnega etalona za dolžino
- Slovenski institut za kakovost in meroslovje (SIQ) kot nosilca nacionalnega etalona za električni tok ter čas in frekvenco

Za tlak v Sloveniji še nimamo priznanega nacionalnega etalona. V Laboratoriju za metrologijo tlaka si prizadevamo, da bi prav mi postali nosilec etalona te, v industriji pomembne merske veličine.

1.2 Merski sistem SI in izpeljana veličina tlak

Zakon o meroslovju določa, da se mora v Sloveniji uporabljati mednarodni sistem enot - SI (Système International d'unités). V sistemu SI imamo sedem osnovnih enot (meter, kilogram, sekundo, amper, kelvin, mol in kandelo).

Tlak je izpeljana veličina - pomeni ploskovno porazdeljeno silo - in je definiran kot sila na enoto površine. Enota za tlak v sistemu SI je N/m^2 in ima tudi svoj simbol: Pa (paskal). V osnovnih enotah SI-sistema jo izrazimo takole: $Pa = N/m^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$.

Poleg osnovnih in izpeljanih enot SI je sedaj dovoljena še uporaba nekaterih drugih enot, ki so se ob sprejetju sistema SI široko uporabljale oziroma so se zasidrale v posebnih področjih uporabe. Med enotami, ki se še lahko uporabljajo ob enotah SI, je tudi enota za tlak v tekočinah, bar. 1 bar je natanko enak 100000 Pa ali 10^5 Pa. Dovoljena je tudi uporaba enote milimeter živega srebra (mmHg), vendar samo za krvni tlak. 1 mmHg je enak 133,322 Pa.

Vakuumsko okolje spada v področje fizikalne veličine tlak, kajti vakuum ni nič drugega kot stanje v razredčenih plinih, kjer je tlak nižji od atmosferskega. Ločitev v področji vakuum in nadtlaka je bila uvedena umetno zaradi našega čutnega dožemanja okolice, kjer je tlak atmosfere referenčna vrednost, ki je stalna. Tudi pri visokem ali ultra visokem vakuumu imamo na površinah opravka s tlakom plina, čeprav je res, da

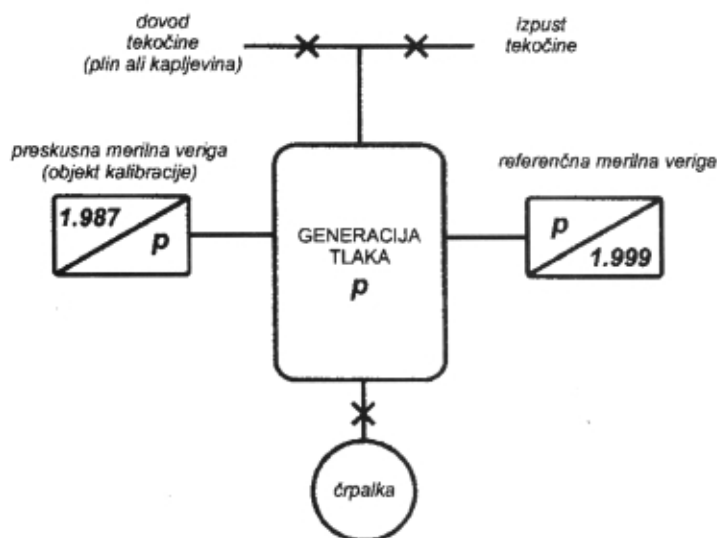
postane sila na površino pri zelo nizkih tlakih nemerljivo majhna, medtem ko je gostota plinskih molekul (ki je s tlakom enolično določena s plinsko enačbo) še mogoče meriti. Zaradi zgodovinskih razlogov vsi vakuummetri, tudi tisti za ekstremno visoki vakuum, prikazujejo fizikalno veličino tlak.

2 LMT - Laboratorij za metrologijo tlaka

Na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije (IMT) v Ljubljani je bil v letu 1999 ustanovljen Laboratorij za metrologijo tlaka (LMT). Vizija in naloga laboratorija je, da s svojim znanjem in vrhunsko merilno opremo v slovenskem meroslovnem sistemu postane nosilec nacionalnih etalonov fizikalne veličine tlak, tako za področje vakuum kot tudi za višje tlake do 200 MPa (2000 bar). V LMT ponujamo storitve kalibracij vakuummetrov in drugih merilnikov tlaka na najvišjem možnem nivoju kvalitete v Sloveniji.

2.1 Akreditacija LMT

Akreditacija laboratorija pomeni dokazilo njegove strokovne in organizacijske usposobljenosti. Zato smo se začeli takoj ob ustanovitvi laboratorija intenzivno pripravljati za pridobitev akreditacije za kalibracije merilnikov tlaka. Že v letu 1999 smo vpeljali sistem kakovosti, ki je v skladu z zahtevami standarda EN 45001, in pri Slovenski akreditaciji (SA) vložili zahtevek za akreditacijo. Sedaj vse delo v laboratoriju, ki je povezano s kalibracijami merilnikov, poteka po dokumentiranih postopkih. SA je sredi leta 2000 opravila predpresojno našega sistema kakovosti. Na osnovi ugotovljenih pomanjkljivosti smo sistem dopolnili ter se dobro pripravili na akreditacijsko presojno, ki je bila konec aprila letos. V to presojno je SA vključila tujega strokovnega presojevalca iz italijanske akreditacijske službe (SIT), ki je podrobno pregledal in ocenil vse delovne postopke za kalibracije merilnikov tlaka, postopke za izračun merilne negotovosti ter shemo sledljivosti. Podelitev akreditacije pričakujemo v začetku jeseni, ko bodo znani rezultati mednarodnih medlaboratorijskih primerjav, ki smo se jih udeležili konec lanskega leta. Te medlaboratorijske primerjave bodo formalno potrdile našo usposobljenost in kalibracijske zmogljivosti.



Slika 1: Kalibracije merilnikov tlaka z metodo neposredne primerjave z referenčnimi merilniki. Referenčna in preskusna merilna veriga sta senzorja tlaka z ustreznima prikazovalnima enotama.

3 Kalibracije merilnikov tlaka v LMT

V LMT izvajamo kalibracije merilnikov tlaka z metodo neposredne primerjave z referenčnimi merilniki ali etaloni. Osnovni princip dela pri tej metodi, ki je enak tako za področje nadtlakov kot tudi vakuumu, je shematsko prikazan na sliki 1. V primerno kalibracijsko posodo vpustimo delovno tekočino (plin, hidravlično olje, vodo ...) in s črpalko ustvarimo želeni tlak. Pri kalibracijah v plinih do 7 MPa kot izvir tlaka uporabljamo čiste pline iz jeklenk. Za kalibracije v vakuumskem področju z vakuumsko črpalko odčrpamo plin iz posode do želenega tlaka.

Na kalibracijsko posodo sta priključena referenčni merilnik tlaka in preskusni merilnik. Ko se nastali tlak v kalibracijski posodi uravnovesi, preberemo prikazani vrednosti tlaka referenčnega in preskusnega merilnika. Iz prebrane vrednosti referenčnega merilnika in korekcijskih faktorjev, ki so bili določeni ob predhodni kalibraciji referenčnega merilnika, izračunamo kalibracijski tlak. Ocenimo tudi merilno negotovost kalibracijskega tlaka. Razlika prebrane vrednosti tlaka preskusnega merilnika in kalibracijskega tlaka je pogrešek preskusnega merilnika.

3.1 Etalonski merilniki tlaka LMT

Etalonske merilnike tlaka v LMT delimo v dve skupini. Med referenčne etalone štejemo tiste z najboljšo merilno zmogljivostjo in jih uporabljamo pri najzahtevnejših kalibracijah. Delovni etaloni imajo nekoliko večjo merilno negotovost, ki pa zadošča za večino rutinskih kalibracij. Z delovnimi etaloni lahko opravimo tudi kalibracije pri strankah na terenu.

Pregled etalonskih merilnikov tlaka, ki jih imamo v LMT, je podan v tabeli 1. Z njimi lahko pokrijemo skoraj 12 velikostnih razredov tlaka med 10^{-5} Pa in $7 \cdot 10^6$ Pa, od tega ima vakuumsko področje kar 10 velikostnih razredov.

3.2. Sledljivost referenčnih in delovnih etalonov LMT

Sedaj zagotavljamo sledljivost referenčnih etalonov s kalibracijami neposredno v tujih nacionalnih ali akreditiranih laboratorijih (vertikalna sledljivost). Na delovne etalone prenašamo sledljivost z internimi kalibracijami v laboratoriju. Seveda morajo biti te ustrezno dokumentirane v sistemu kakovosti laboratorija in so pod periodičnim nadzorom akreditacijskega organa. Sledljivostna shema referenčnih in delovnih etalonov LMT je prikazana na sliki 2.

4 Raziskovalno delo v LMT

V LMT se intenzivno ukvarjamo z raziskavami. Naše delo je predvsem usmerjeno v znanstveno meroslovje tlaka v vakuumskem področju, kjer imamo tudi največ znanja in izkušenj. Aktivnosti bi lahko razdelili v več sklopov:

- aplikativne raziskave metode za ustvarjanje nizkih tlakov z izotermnim razpenjanjem plinov. To je ena od primarnih metod za ustvarjanje kalibracijskih tlakov v področju vakuumu med 10^{-6} Pa in 1 kPa. V prihodnosti v našem laboratoriju načrtujemo zgraditev takšnega sistema.
- temeljne raziskave interakcije plinov s površinami materialov, ki se uporabljajo za gradnjo ultra visoko-

Tabela 1: Merilna območja in najboljše merilne zmogljivosti referenčnih in delovnih merilnih etalonov v LMT

	Merilno območje	Najboljša merilna zmogljivost (razširjena merilna negotovost s faktorjem $k=2$)
REFERENČNI ETALONI		
TT-A Tlačna tehnica (plinski medij)	1,4 kPa - 7 MPa	0,009%
QBG Kremenov Bourdonov manometer	100 Pa - 110 kPa	0,014%
CDG-1K Kapacitivni membranski vakuummeter	1 Pa - 1.4 kPa	0,66%
SRG-A Viskoznostni vakuummeter z lebdečo kroglico	10^{-5} Pa - 1 Pa	1,6%
DELOVNI ETALONI		
TLPR-A Tlačni pretvornik	100 kPa - 7 MPa	0,2%
CDG-100K Kapacitivni membranski vakuummeter	100 Pa - 110 kPa	0,45%
CDG-100 Kapacitivni membranski vakuummeter	0,1 Pa - 110 Pa	1,2%
SRG-B Viskoznostni vakuummeter z lebdečo kroglico	10^{-5} Pa - 1 Pa	1,6%

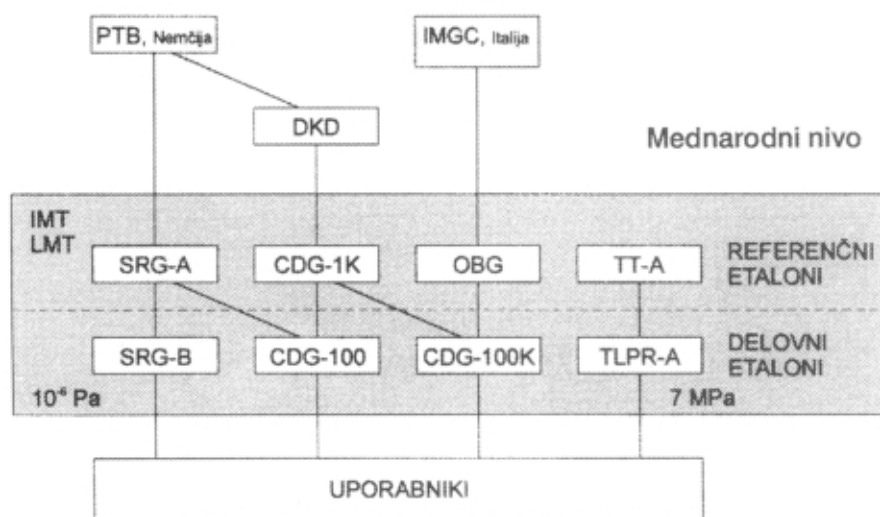
vakuumskih sistemov. Namen teh raziskav je pridobiti potrebno znanje za graditev kalibracijskega sistema za ustvarjanje nizkih tlakov po metodi izotermne ekspanzije. Rezultate raziskav bomo uporabili pri oceni merilne negotovosti sistema in kalibracijskih postopkov.

- meroslovne raziskave za vzpostavitev t.i. horizontalne sledljivosti tlačne tehnice TT-A na slovenske nacionalne etalone za osnovne enote SI-sistema: dolžino, maso in temperaturo. To sledljivost lahko s kalibracijo prenesemo na QBG. S primarno metodo za ustvarjanje nizkih tlakov z izotermno ekspanzijo lahko razširimo merilno območje QBG oziroma TT-A v vakuumskem področju navzdol do 0,01 Pa. To je dovolj nizko za kalibracijo SRG-merilnika, ki ga lahko nato uporabljamo kot referenčni etalon za tlake navzdol do $1 \cdot 10^{-5}$ Pa.
- raziskave meroslovnih lastnosti referenčnih vakuumskih etalonov, predvsem kapacitivnih membranskih vakuummetrov /1/ in viskoznostnih vakuumskih merilnikov z lebdečo kroglico /2/ (bilateralni projekt med LMT in National Institute of Standards and Technology iz ZDA). Rezultati teh raziskav bodo omogočili zmanjšanje merilne negotovosti pri diseminaciji merilne sledljivosti v področju vakuum na sekundarnem nivoju oziroma v industrijskih kalibracijskih laboratorijih. Raziskujemo tudi stabilnost in druge lastnosti hladnokatodnih ionizacijskih merilnikov (Penning, magnetron in invertni magnetron) v področju ultra visokega vakuum /3/.

- razvoj in raziskave novih metod za merjenje zelo majhnih pretokov plinov, merjenja vakuum v hermetično zaprtih sistemih, meritve difuzije plinov v različnih materialih ter raziskave helijevih permeacijskih normal za kalibracijo helijevih detektorjev netesnosti
- raziskave fotoemisijskih tankih plasti. S podjetjem Heimann Opto, Wiesbaden, Nemčija, svetovno znanem na področju vakuumске optoelektronike, sodelujemo pri razvoju in optimizaciji kritičnih faz vakuumске transferne tehnike za serijsko izdelavo kanalnih fotopomnoževalk /4,5/.

5 Literatura

- /1/ J. Šetina, New approach to corrections for thermal transpiration effects in capacitance diaphragm gauges. *Metrologia*, 36, 6 (1999) 623
- /2/ J. Šetina, Two point calibration scheme for the linearization of the spinning rotor gauge at transition regime pressures. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 17, 4 (1999) 2086
- /3/ B. Erjavec, J. Šetina, L. Irmančnik-Belič, Primerjava karakteristik ionizacijskih merilnikov s hladno katodo v ultra visokovakuumskega področja, *Mater. tehnol.*, 35, 3-4 (2001) 143
- /4/ B. Erjavec, Razvoj vakuumске transferne tehnike za serijsko procesiranje kanalnih fotopomnoževalk, *Mater. tehnol.*, 34, 6 (2000) 437
- /5/ B. Erjavec, Vacuum problems at miniaturization of vacuum electronic components: a new generation of compact photomultipliers, v tisku (*Vacuum* 2001)



Slika 2: Shema sledljivosti referenčnih in delovnih etalonov LMT do primarnih etalonov v tujih nacionalnih meroslovnih inštitutih

PLAZEMSKA KROGLA

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

Plasma ball

ABSTRACT

Plasma ball is an apparatus which maintains high-frequency discharges between the central electrode and the glass sphere. As a »fun physics« product it has no practical use, nevertheless it is appropriate for teaching the electricity conduction basics. The Tesla transformer which supplies high-frequency signal is also described.

POVZETEK

Plazemska krogla je naprava, ki vzdržuje visokofrekvenčne razelektritve med središčno elektrodo in stekleno bučo. Čeprav spada v področje »zabavne fizike« in nima praktične uporabe, pa je primerna za pouk osnov električnega toka. Opisan je tudi Teslov transformator, s katerim napajamo plazemsko kroglo.

Če obiščemo kakšno razstavo s fizikalno tematiko (npr. Hišo eksperimentov v Ljubljani), nam bodo gotovo pokazali t. i. plazemsko kroglo. V zadnjih letih jo tudi prodajajo po internetu že za manj kot 50 dolarjev. Osrednji del naprave je steklena buča z elektrodo v sredini, ki stoji na podstavku. Značilni premer steklene buče je 10 - 30 cm. Če jo priključimo na omrežno napetost, se začnejo med središčno elektrodo in stekleno bučo naključno pojavljati razelektritve (slika 1). Posebno zanimivo postane, če se dotaknemo steklene buče, saj se razelektritve usmerijo k mestu dotika. Plazemske kroglice ne smemo zamenjati s kroglasto strelo, za katero včasih tudi uporabljajo podobno ime, s plazemsko kroglo pa nima nobene povezave. Kroglasta strela je namreč redek naravni pojav, ki je bil večkrat opažen med nevihto, ni pa še zadovoljivo pojasnjen.



Slika 1: Razelektritve v plazemski krogli

Oglejmo si malo pobliže, kako deluje plazemska krogla. V stekleni buči je grobi vakuum, navadno med 1 in 10 mbar. Na središčno elektrodo damo visoko napetost: nekaj kV do nekaj deset kV. Napajanje mora biti izmenično ali pulzno enosmerno s frekvenco nekaj deset kHz. Med elektrodo in steklom prihaja do razelektritev, kjer prehajajo molekule plina v vzbujeno stanje, ob relaksaciji pa izsevajo svetlobo značilne valovne dolžine. Pri izbiri plina se oziramo predvsem na lepo barvo in obstojnost razelektritev, da torej dobimo izraze »strele« in ne medlega žarenja. Najprimernejša plina sta ksenon in kripton, lahko tudi v zmesi z drugimi plini, edina omejitev pa je nereaktivnost. Ker je zunanja stran steklene buče v stiku z zrakom, se na njej kondenzirajo zračna vlaga in razne nečistoče. Prevodnost te tanke plasti je relativno dobra, vsekakor pa bistveno večja od prevodnosti stekla. Naboj steče skozi steklo, nato pa po tanki plasti na površini stekla v podstavek, ki je ozemljen.

Če se kroglice dotaknemo s prstom, steče visokofrekvenčni tok skozi steklo do prsta in skozi telo v zemljo. Ker je prevodnost človeškega telesa bistveno večja od prevodnosti tanke plasti na površini stekla (le-ta pa bistveno večja od prevodnosti samega stekla), večina razelektritev ubere to pot. Tok, ki steče čez človeško telo, je visokofrekvenčen, zato zaradi kožnega pojava (*skin effect*) dejansko teče po površini telesa. Zaradi kožnega pojava in zelo nizkega toka dotikanje plazemske kroglice ni nevarno, čeprav ga - verjetno bolj iz pravnih nagibov - odsvetujejo srčnim bolnikom.

Plazemska krogla je zelo primerna za poučevanje osnov fizike. Pri tem »poenostavimo« razlago tako, da namesto teže razložljivega visokofrekvenčnega napajanja govorimo kar o enosmernem napajanju. Takšna »poenostavitev« je s fizikalnega stališča nedopustna - pri enosmernem napajanju bi bilo vedenje razelektritev precej drugačno in dotikanje smrtno nevarno - za pouk osnov pa je vseeno sprejemljiva.

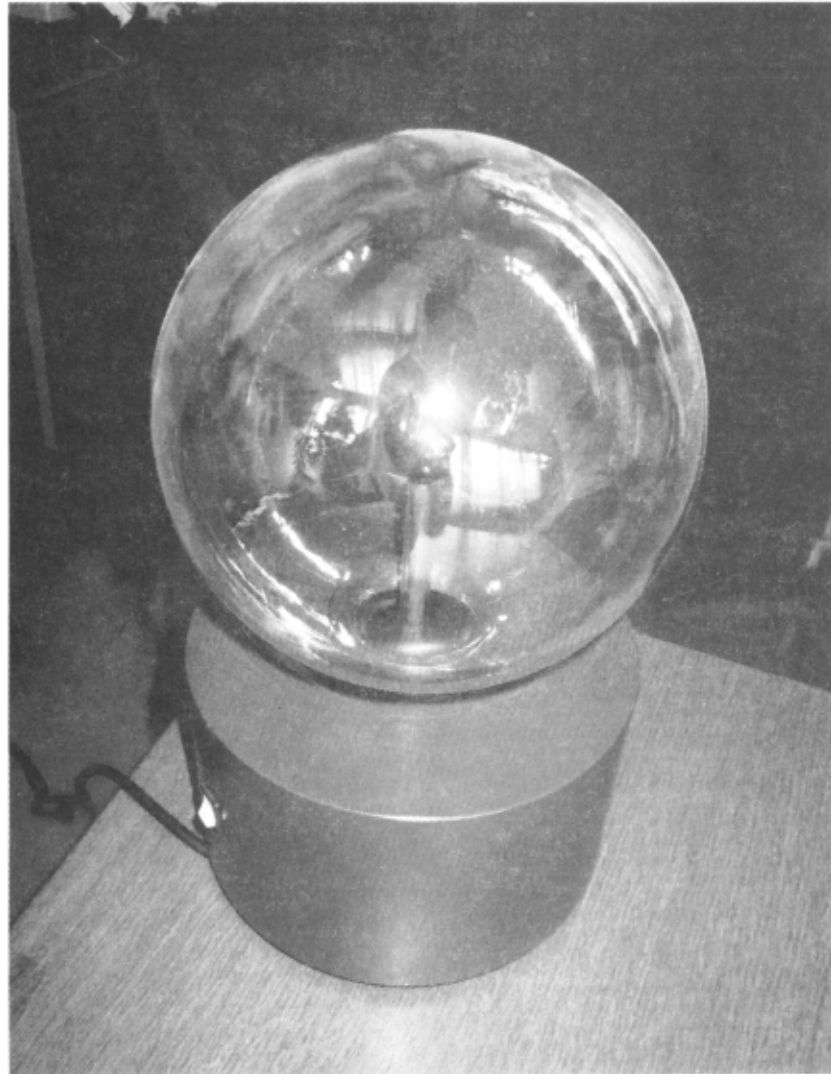
Torej razložimo, da se na elektrodi nabira negativni naboj. Ker se enaki naboji odbijajo, se elektroda prazni skozi plin do buče. Z dotikanjem buče zelo jasno pokažemo, da je človeško telo dober prevodnik, saj se vse razelektritve usmerijo k mestu dotika. Še bolj nazorno je, če se z eno roko dotaknemo buče, v drugi pa držimo žarnico. Žarnica zasveti, kar je preprosto »dokaz« za vsakogar o prevajanju električnega toka skozi človeško telo. (Tudi izolirana žarnica zasveti, če jo dovolj približamo buči; to je posledica indukcije, njena razlaga pa je za začetnike prezahtevna.) Poskus lahko spremenimo na različne načine, npr. da se več ljudi prime za roke, eden stopi na lesen stol (torej je izoliran od tal), drugi prime žarnico itd. Ob primerni razlagi lahko - namesto suhoparnega razlaganja pred tablo - tako rekoč med igro razložimo osnove električnega toka.

Za napajanje se uporablja Teslov transformator. Ker ga uporabljamo tudi v vakuumski tehniki, ga kaže podrobneje opisati. V osnovi je sestavljen iz šestih komponent

(slika 3): (1) navaden transformator z železnim jedrom, (2) visokonapetostni kondenzator, (3) iskrilnik (*spark gap*) - dve žici na zraku, katerih konca sta na majhni razdalji, (4) primarno navitje z 10 do 15 ovoji, (5) sekundarno navitje z nekaj sto ovoji in (6) breme (toroid).

Iz omrežne napetosti dobimo z navadnim transformatorjem napetost okrog 10 kV. V osrednjem delu Teslovega transformatorja imamo zaporedno vezano

sekundarno navitje navadnega transformatorja (deluje kot izvir visoke napetosti), primarno navitje drugega transformatorja (Teslov transformator v ožjem pomenu besede) in kondenzator. Preko tega kroga je kot most vezan iskrilnik. Po vklopu se začne polniti kondenzator in ko napetost dovolj naraste, pride na iskrilniku do preboja in kondenzator se izprazni skozi primarno navitje druge tuljave. Napetost pade, zato se preboj

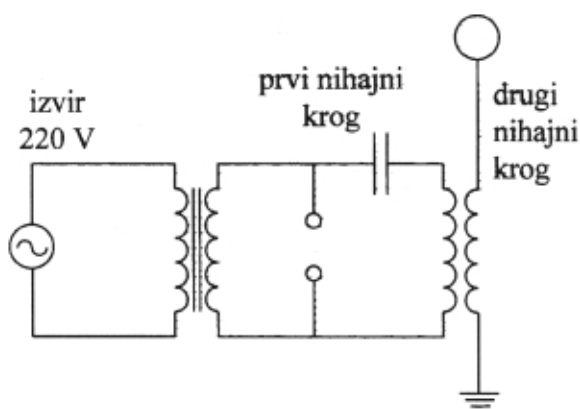


Slika 2: Plazemska krogla, ki jo je izdelal Peter Šolar z Bleda

Dober eksperimentator, poznavalec vakuumске, visokonapetostne in visokofrekvenčne tehnike **Peter Šolar** z Bleda je poleg drugih tehničnih zanimivosti (npr. Teslovi transformatorji različnih velikosti) izdelal tudi prvo domačo plazemsko kroglo. Zamisli in osnutki segajo v leto 1998. Steklена posoda premera okrog 25 cm ima v središču na steklenem nosilcu majhno kroglico (2-3 cm), ki je prevlečena s prevodno pasto. Spojeni sta tako, da je prostor med obema neprodušno zaprt in ga je možno izčrpati ter napolniti s poljubnim plinom. S pomočjo strokovnjakov z bivšega IEVT ter s svojimi izkušnjami in vero v uspeh si je izdelal svoj vakuumski sistem in generator visoke napetosti za vzbujanje razredčenih plinov v krogli. Nato so se pričeli poskusi izčrpavanja, izboljšave elektronskega napajalnika, študij polnilnih plinskih zmesi itd. Prva krogla, ki je omogočala omenjene eksperimente, je bila razstavljiva in zato tehnološko izredno zahtevna (spoji steklo-kovina, kovinske tesnilke). Prvi uspešni prikaz delovanja je bil na IEVT poletu 1999; svetlobni prameni so v zatemnjenem prostoru vzbudili občudovanje ter razvneli razlaganje in pravo strokovno razpravo o tem zanimivem pojavu. Opisani prvenec je sedaj razstavljen v Tehniškem muzeju Slovenije v gradu Bistra pri Vrhniki. Naslednji dve krogli je Peter Šolar izdelal za tovarno Iskra Zaščite (slika 2) in za Hišo eksperimentov v Ljubljani.

Andrej Pregelj

prekine in s tem tudi iskrilnik preneha prevajati. Kondenzator se začne ponovno polniti in cikel se ponovi. Na sekundo se zvrsti nekaj sto ciklov. Ob preboju se na sekundarnem navitju drugega transformatorja inducira sunek visoke napetosti nekaj sto kilovoltov.



Slika 3: Električna shema Teslovega transformatorja

Sekundarno navitje je na eni strani ozemljeno, na drugi pa dobimo visok potencial (od nekaj deset kV do preko MV). Pri plazemski krogli je ta potencial vir razelektritev.

Drugi transformator nima železnega jedra, sekundarno navitje je vstavljeno v primarno, vmes pa je zrak. Nasprotno od klasičnega transformatorja, kjer je razmerje napetosti enako razmerju števila ovojev, pa pri Teslovem transformatorju ni tako enostavne zveze. Dejansko imamo sklopljena dva nihajna kroga. Prvega sestavljata primarno navitje in kondenzator, drugega pa sekundarno navitje in breme, ki z zemljo tvori šibak kondenzator. Kapaciteta tega »kondenzatorja« je močno odvisna od velikosti in oblike bremena. Za učinkovito delovanje je potrebna pravilna sklopitev obeh nihajnih krogov, torej $L_1C_1 = L_2C_2$. To je pogoj za enakost lastnih frekvenc obeh nihajnih krogov.

Teslov transformator uporabljamo v vakuumski tehniki za iskanje netesnosti v steklenih posodah. Za ta namen se uporabljajo koničaste elektrode, iz katerih na zraku izhajajo razelektritve. Ko se približamo stekleni posodi, se zaradi prevelikega upora razelektritev ustavi na steni posode. Pač pa se širi skozi razpoke. Netesnost ugotavljamo tako, da elektrodo premikamo po površini posode in opazujemo, ali se kje pojavi razelektritev znotraj posode - znak za netesnost.

Teslov transformator je tudi priljubljena »igrača« amaterjev, saj lahko z njim brez večjih težav dosežejo nekaj sto kilovoltov v domači delavnici. Ni treba posebej poudariti, da je takšna »igrača« smrtno nevarna. Dodati je še treba, da Teslov transformator povzroča radiofrekvenčne motnje.

Sinteza nanocevk MoS₂ - odmevno odkritje znanstvenikov z Instituta "Jožef Stefan"

V članku z naslovom "Self-Assembly of Sub-Nanometer Diameter Single-Wall MoS₂ Nanotubes" (avtorji članka so: Maja Remškar, Aleš Mrzel, Zora Škraba, Jure Demšar, Adolf Jesih, Miran Čeh, Dragan Mihailović, Pierre Stadelmann in Francis Lévy, Science, vol. 292, št. 5516, (2001)), ki je izšel 20. aprila letos v ugledni angleški reviji Science, so raziskovalci z IJS objavili pomemben dosežek na področju nanotehnologije. Objavljeni članek je rezultat plodnega sodelovanja raziskovalcev z različnih odsekov na Institutu "Jožef Stefan": Odseka za fiziko trdne snovi (dr. Maja Remškar, dr. Aleš Mrzel, Zora Škraba, dr. Jure Demšar, dr. Dragan Mihailović), Odseka za anorgansko kemijo in tehnologijo (dr. Adolf Jesih) in Odseka za keramiko (dr. Miran Čeh) kot tudi sodelovanja s švicarskimi partnerji iz "Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne" (dr. Pierre Stadelmann in dr. Francis Lévy). To pomembno delo pomeni nadaljevanje uspešnih raziskav mikro- in nanocevk dihalogenidov prehodnih kovin, s katerimi se ukvarja dr. Maja Remškar, in raziskav fullerenov in ogljikovih nanocevk, ki potekajo v skupini prof. dr. Dragana Mihailovića. Plastni kristali dihalogenidov prehodnih kovin so sicer že več kot tridesetlet predmet intenzivnih raziskav Laboratorija za elektronsko mikroskopijo na Institutu "Jožef Stefan". Raziskave je vodil zdaj že pokojni prof. Veljko Marinković.

V omenjenem delu avtorji najprej opišejo sintezo makroskopskih količin nanocevk MoS₂ z novo kemijsko transportno reakcijo, katalizirano s fulerenom C₆₀, ki je uspela dr. Maji Remškar in dr. Alešu Mrzlu. Nanocevk so zrastle iz prahu MoS₂ v ampuli iz kremenovega stekla, ki je bila evakuirana na tlak približno 10⁻³ Pa in segreta na 1010 K. Temperaturni gradient v ampuli je bil 6K/cm. Prah MoS₂ so dodali majhno količino fulerena C₆₀ (5 mas. %), ki je spodbudil rast nanocevk. Jod, ki so ga dodali (približno 15 mas. %), je omogočil transport atomov molibdena iz prahu MoS₂ na visokotemperaturnem koncu ampule do nanocevk, ki so rasle na nizkotemperaturnem koncu ampule kremenovega stekla, pravokotno na njeno steno. Reakcija je potekala 22 dni. Atomi joda so se med sintezo ujeli v kanale med cevkami. Jod so odstranili s segrevanjem v vakuumu, C₆₀ pa so z nanocevk otopili s toluenom. Nanocevk so bile na površini kremenove stene v obliki snopov, ki vsebujejo nad 500.000 urejenih nanocevk. Snope nanocevk so razstavili na posamezne nanocevk z disperzijo v etanolu z ultrazvokom.

Mehanizem rasti z uporabo fulerena C₆₀ še ni pojasnjen. S spektroskopijo izgube energije elektronov (Energy Electron Loss Spectrometry, EELS) so ugotovili, da se fuleren C₆₀ ni vgradil v nanocevk. Dejstvo, da sinteza brez njega ne steče, pa kaže na to, da deluje pri rasti nanocevk MoS₂ kot katalizator. Ugotovili so tudi, da so nanocevk MoS₂ časovno in kemijsko obstojne pri normalnih zračnih pogojih.

V nadaljevanju članka avtorji opisujejo določanje strukture nanocevk. Z elektronsko mikroskopijo avtorji ugotavljajo, da so nanocevk samoorganizirane v igličaste snope z značilnimi premeri okoli 0,5 mikrometra in dolžinami nekaj deset mikrometrov (slika 2).

Visokoločljivostna presevna elektronska mikroskopija pokaže pravilno zložitve nanocevk v kristalu kot tudi

atomsko zgradbo posamezne cevke (slika 3). Razdalja med centri cevk je 0,96 nanometra.

V nadaljevanju avtorji opišejo razpršitev molekulskih kristalov z ultrazvokom in prikažejo slike tako dobljenih posameznih nanocevk. Stene nanocevk so zgrajene iz ene same molekulske plasti S-Mo-S, premer pa je primerljiv celo z najmanjšimi nanocevkami ogljika. Na osnovi vseh dobljenih eksperimentalnih podatkov predpostavijo model, ki pojasnjuje tako strukturo nanocevk kot tudi način njihovega samoorganiziranja v snope (slika 4).

MoS₂ je predstavnik skupine dihalogenidov prehodnih kovin TX₂, kjer je T prehodna kovina (npr. volfram, molibden, cirkonij, hafnij, titan, renij, niobij) in X halkogen (npr. selen, žveplo). Te spojine spadajo v družino plastnih kristalov, kjer se izmenjujejo plasti prehodne

Self-Assembly of Subnanometer-Diameter Single-Wall MoS₂ Nanotubes

Maja Remškar,^{1*} Aleš Mrzel,¹ Zora Škraba,¹ Adolf Jesih,¹ Miran Čeh,¹ Jure Demšar,¹ Pierre Stadelmann,² Francis Lévy,² Dragan Mihailović¹

We report on the synthesis, structure, and self-assembly of single-wall sub-nanometer-diameter molybdenum disulfide tubes. The nanotubes are up to hundreds of micrometers long and display diverse self-assembly properties on different length scales, ranging from twisted bundles to regularly shaped "furry" forms. The bundles, which contain interstitial iodine, can be readily disassembled into individual molybdenum disulfide nanotubes. The synthesis was performed using a novel type of catalyzed transport reaction including C₆₀ as a growth promoter.

The discovery of free-standing microscopic one-dimensional molecular structures, such as nanotubes of carbon, has attracted a great deal of attention in the last decade because of various interesting properties associated with their small dimensions, high anisotropy, and intriguing tube-like structures. These range from a variety of quantum effects (1, 2) to potentially useful properties such as efficient field emission (3) and exceptional mechanical strength (4). Finding that curled-up dichalcogenide sheets can also form tube-like objects and fullerene-like nanoparticles (5-8) suggested that synthesis of nanotubes made of atoms other than carbon may be possible, and relatively small, 15-nm-diameter tubes made of tungsten and molybdenum disulfide have since been reported (9-11). The ultralow friction and wear properties of MoS₂ fullerene-like particles (12, 13) make inorganic fullerenes important tribological materials. Other layered materials synthesized as nanotubes, tube-like forms, or onion-like structures have been reported, such as boron nitride nanotubes with diameters of a few nanometers (14, 15), W₁₈O₄₉ hollow micro-

fibers (16), and NiCl₂ multiwall nanotubes (17). Other layered compounds, such as NbS₂ (18) and GaSe (19), have been the subject of extensive theoretical calculations, which have predicted conditions for their stability in cylindrical form and some interesting electronic properties.

We report on the synthesis and basic structural properties of subnanometer-diameter monomolecular MoS₂ single-wall nanotubes (SWNTs) produced by a catalyzed transport reaction involving C₆₀ and show that the MoS₂ nanotubes grow in twisted chiral bundles of identically structured molecules stuck together with interstitial iodine. The tubes vary only in length, but not in diameter.

The single-wall MoS₂ nanotubes were grown by a catalyzed transport method using C₆₀ as a growth promoter in the reaction. The C₆₀ (5 weight %) was added to MoS₂ powder in the transport tube as catalyst, and the reaction was run typically for 22 days at 1010 K in an evacuated silica ampoule at a pressure of 10⁻³ Pa with a temperature gradient of 6 K/cm. Iodine was used as a transport agent. Approximately 15% (by weight) of the starting material was transported by the reaction to form SWNTs, with the rest remaining in the form of layered material. The transported material was subsequently thoroughly washed with toluene to remove the C₆₀.

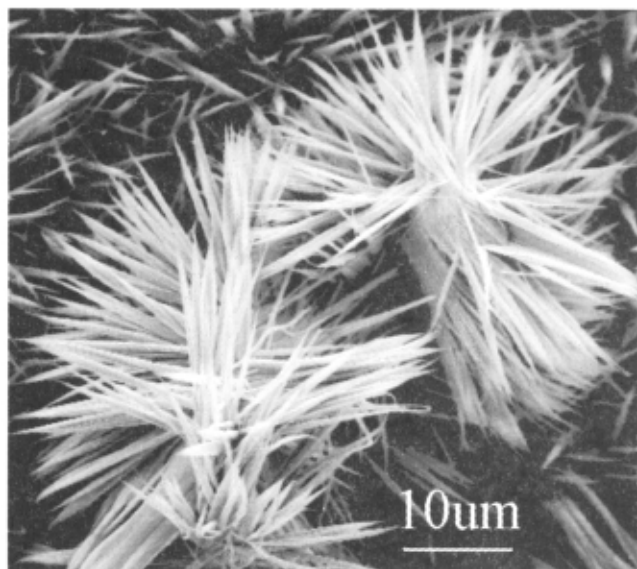
The transported material grows in the form of bundles oriented perpendicular to the sub-

¹Jožef Stefan Institute, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenia. ²Centre de Microscopie Electronique-CHL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland. ³Institute of Applied Physics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.

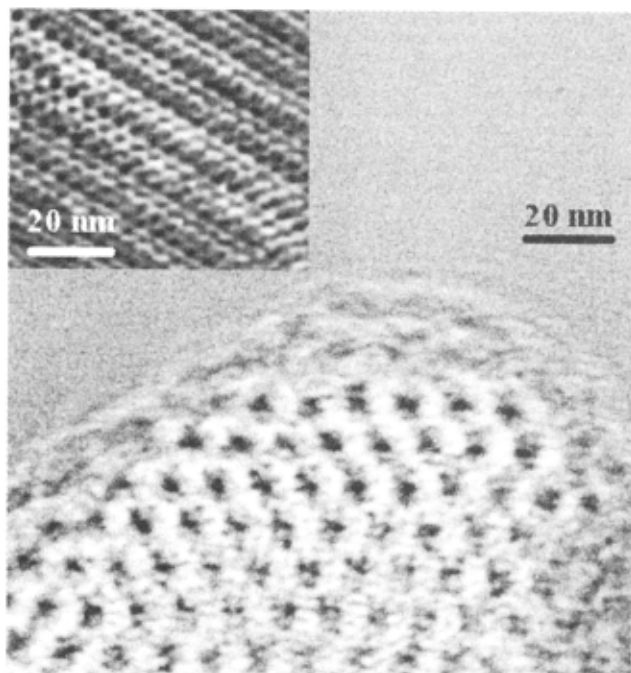
*To whom correspondence should be addressed. E-mail: maja.remškar@ijs.si

Slika 1: Naslovna stran članka "Self-Assembly of Subnanometer-Diameter Single-Wall MoS₂ Nanotubes", avtorjev: Maja Remškar, Aleš Mrzel, Zora Škraba, Jure Demšar, Adolf Jesih, Miran Čeh, Dragan Mihailović, Pierre Stadelmann in Francis Lévy, objavljenem v aprilski številki revije Science (vol. 292, št. 5516, (2001))

kovine in halkogena v zaporedju XTX XTX. MoS_2 je tehnološko izredno uporabna spojina, saj se uporablja v več tisoč tonah pri razžvepljevanju nafte in v mazivih, v zadnjem času pa potekajo zelo intenzivne raziskave njegove uporabe tudi v sončnih celicah, fotokopirnih napravah in baterijah. Nova oblika MoS_2 bi lahko imela zaradi popolnoma drugačne strukture in majhnosti prečnih dimenzij na nekaterih od teh tehnološko pomembnih področjih bistveno boljše lastnosti od doslej uporabljenih plastnih kristalov MoS_2 .



Slika 2: Vrščni elektronskomikroskopski posnetek snopov nanocevk MoS_2 . Posamezni snopi so sestavljeni iz pol milijona in več pravilno zloženih nanocevk in so tako prvi primer molekulskih kristalov, pri katerih so gradniki nanocevke.

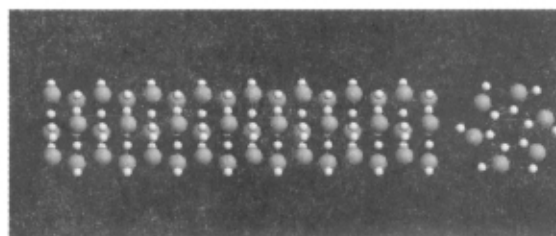
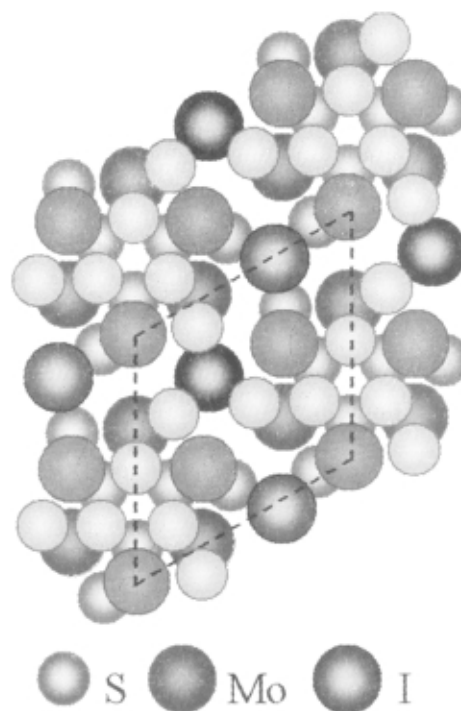


Slika 3: Visokoločljivostni elektronskomikroskopski posnetek snopa nanocevk MoS_2 , pri čemer je smer elektronskega curka vzporedna z osmi cevk oziroma pravokotna nanje (vstavljena slika).

Novo odkritje je torej pomembno ne le kot znanstvena zanimivost, ampak predvsem s stališča tehnološke uporabnosti na zelo različnih področjih. Raziskave in sinteze različnih nanostruktur so danes izredno intenzivne, saj se optične, magnetne in elektronske lastnosti razlikujejo od tistih v monokristalih in so zelo odvisne od njihovih velikosti in geometrije. Posebej zanimive so enodimenzionalne molekularne strukture zaradi različnih kvantnih efektov in možne uporabe v ploščatih zaslonih, v nanolitografiji, v gorivnih celicah ipd.

Prof. Reshef Tenne z Weizman Institute of Science, Rehovot, Izrael, je dosežek slovenskih in švicarskih znanstvenikov označil kot enega najbolj vznemirljivih v tem letu. Opozoril je na dejstvo, da so avtorji članka naredili prve enoplastne nanocevke neke anorganske spojine. Pomembno se mu zdi, da jih lahko pripravijo v večjih količinah in da lahko kontrolirajo njihov premer. Domneva, da bi lahko nanocevke MoS_2 uporabili za separacijo plinske mešanice H_2/O_2 . Vodikove molekule bi lahko šle skozi nanocevke s premerom 0,96 nm, kisikove molekule pa ne. To lastnost nanocevk MoS_2 bi lahko izkoristili v gorivnih celicah.

P.P.



Slika 4: Model strukture nanocevk MoS_2 . V kanale med cevkami se med sintezo ujamejo atomi joda, ki jih je kasneje mogoče odstraniti s segrevanjem v vakuumu. Večje kroglice predstavljajo atome molibdena, manjše pa atome žvepla. Notranji premer cevk je desetinka nanometra.

VAKUUMSKI POSKUSI NA BOŠKOVIČEVEM RIMSKEM KOLEGIJU

Stanislav Južnič*

Vacuum Machines at Bošković's Collegio Romano

ABSTRACT

According to «Ratio Studiorum», physics was taught as a part of the three years study of philosophy, devoted successively to logic, physics and metaphysics. That system was abolished in Austrian province during the early 50s, but was in use in Collegio Romano until its very end in 1773. Most of the professors in Collegio Romano taught physics just for one year. Just some of them returned to physics later, after they lectured in other two parts of philosophy or in some other area. But anyway they had to make a plan for their physics lessons. Some of those lessons were published and widely used in minor colleges as textbooks, like Semery's in Ljubljana. But it was not possible to publish all physics textbooks produced in Collegio Romano, because it would mean nearly to publish a new one every year. Therefore most of them were preserved just as manuscripts written by professors themselves or by their most distinguished students.

About two dozens manuscripts about physics of the professors from the Collegio Romano and much more from other Italian schools are preserved in APUG and were filmed between the years 1963 and 1965 for SLU. They filmed altogether nearly a hundred manuscript textbooks of physics, which was then taught as a part of philosophy. The professors and their students of physics produced most of them during their lessons. But some books about physics were written by professors of scholastic theology and in one case by prefect of scholars, who did never teach physics in Collegio Romano. In some dozen cases manuscripts about physics written by professors in Collegio Romano were not preserved and copied, but they copied just manuscripts containing other parts of philosophy: metaphysics, logic, or both. More than half of manuscripts copied for SLU were written in other Jesuit and in some cases also Benedictine schools. We compared the content of those manuscripts, especially in their relation to interpretation of vacuum experiments of the mid 17th century and in their relation to Bošković's physics. The instruments for vacuum research were drawn in about ten manuscripts filmed for SLU. We proved that although they had some elements of instruments build in the centers of that type of research in Paris, Holland, London and Oxford, they were also different enough to show some peculiarities of Jesuit type of vacuum research. The Jesuit drawings showing vacuum instruments were compared to show that Boyle's and not Guericke's type of the air pump was predominately used in Jesuit universities of Italy. Time development of the Jesuit manuscript pictures showing vacuum instruments were used to illustrate development of concept of vacuum in Italian Jesuit schools from the philosophic rejection of peripatetic and even Cartesian in the mid 17th century to the experimental acceptance with the modern Bošković's views half a century later. This is supposed to be one of the first studies of history of physics based on the pictures of scientific instruments drawn in the manuscripts.

POVZETEK

Raziskali smo razvoj vakuumске tehnike s primerjanjem skic vakuumskih naprav v neobjavljenih učbenikih z začetka 18. stoletja. Napisani so bili med predavanji fizike na Rimskem kolegiju, kjer je pozneje matematiko poučeval tudi Rudjer Bošković. Ker so profesorje fizike tam menjavali vsako leto, je bilo napisanih veliko učbenikov oziroma letnih priprav za pouk, ki jih večinoma niso natisnili. Nekatere med njimi so sestavili prizadevni dijaki med poukom. Rokopise hrani Arhiv Gregorijanske univerze v Rimu. Sredi šestdesetih let so jih posneli za Univerzo Saint Louis, kjer smo jih preučili. Primerjava med vakuumskimi črpalkami je pokazala, da so na Rim-

skem kolegiju in na drugih italijanskih kolegijih uporabljali črpalke, bolj podobne Boylovi kot Guernickovi s posebnostmi, ki do sedaj niso bile raziskane. Na Rimskem kolegiju so študentom kazali tudi naprave za demonstracijo Robervalovega poskusa z »vakuumom v vakuumu«. Prav tako smo našli doslej neobjavljeno skico meritve višine hriba z barometrom v Italiji po vzoru znamenitega poskusa, ki so ga po Pascalovem naročilu opravili na hribu Puy-de-Dôme. Tudi umetniško zanimiva risba nam daje nekaj vpogleda v izvedbo poskusa in v način, kako so si skupine na različnih delih hriba sporočale čas meritve pred uporabo prenosnih ur. Guernickov poskus z magdeburškima polkrogla so skupaj s sprejemanjem marmornih plošč uvrščali v poglavje o adheziji in ne v poglavje o vakuumu.

Raziskava ni potrdila domneve, da so pod vplivom zgodnjih florentinskih poskusov z barometri v Italiji zaostajali pri uporabi vakuumskih črpalk. Dokazali smo, da so se na jezuitskih višjih študijah zanimali za vakuumске poskuse, vzporedno z drugimi evropskimi središči. Zanje so bili pripravljeni plačati tudi visoke cene tedanjih vakuumskih črpalk. Ugotovili smo, katere vakuumске poskuse je v času svojega šolanja na Rimskem kolegiju videl mladi Bošković in kako so ti vplivali na njegovo spremenjeno pojmovanje vakuum v primerjavi s predhodno peripatetično in kartezijansko fiziko, ki sta odklanjali obstoj vakuum v naravi.

Naprav za vakuumске poskuse na jezuitskih višjih študijah v Italiji ne moremo primerjati z napravami na podobnih kolegijih v Ljubljani in Zagrebu, o katerih imamo premalo podatkov. Prikazujemo tudi najstarejšo skico vakuumске črpalke in magdeburškega poskusa, objavljeno s komentarjem v slovenskem jeziku, ki ga je sestavil Slovenec Tušek, profesor na višji realni v Zagrebu.

1 Uvod in opis uporabljenih virov /1/

Galilejevo fiziko in z njo vakuumске poskuse florentinskih akademikov ter njihovih nadaljevalcev so veliko počasneje sprejeli na jezuitskih šolah kot Boškovičevo fiziko sto let pozneje. Jezuitje so vsaj sprva odločno odklanjali obstoj vakuum, ki so ga imeli za logično nemogočega in enakega nič. Sprejemali so model Kircherjevega učenca, angleškega jezuita Linusa, ki je zagovarjal Aristotla in odklanjal tlak zraka. Linus je trdil, da nevidne membrane »Funiculus« iz razredčenega Hg drže Hg v barometru do 0,76 m visoko. Niti membrane naj bi otipali s prstom, ko zatesnimo izpraznjeni prostor. Boyle je Linusa zavrnil tako, da je s sesanjem dvignil stolp Hg na odprtem koncu barometra nad raven na zaprtem koncu. Linus je ponovil tudi Pascalov poskus, vendar z nasprotnim rezultatom. Trdil je, da sta višini Hg-stolpa enaki na vrhu in ob vznožju hriba /2/.

Vakuumске črpalke, sestavljene v Londonu, Oxfordu, Parizu in na Nizozemskem, so bile različne od skic italijanskih profesorjev, ki prikazujejo nekatere posebnosti jezuitskega raziskovanja vakuum. Rokopisi z jezuitskih šol v Italiji kažejo najbolj nazorne skice vakuumskih naprav (tabela 1).

Drugi rokopisi vsebujejo manj uporabne slike. Panici in Guarini sta še verjela v Linusovo teorijo /5/, vendar nista odklanjala vakuum. Panici je sicer opisal Boyleve poskuse, vendar mu je bila ljubša razlaga sobratov Linusa in Honoratia Fabrija (1606/7-1688) /6/, katerega učbenik so uporabljali tudi v Ljubljani. Priznaval je tlak zraka in je navajal Torricellijevo znamenito pismo kardinalu Michelangelu Ricciju. Poleg Boyla je citiral tudi Johna Alfonsa Borellija in jezuite Joannesa Baptistae de Benedictisa /7/, in Daniela Bartolija (1608-1685) iz

* 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.

Tabela 1: Seznam avtorjev skic vakuumskih naprav na jezuitskih šolah v Italiji. Navedeni so tudi viri slik.

SLU-film	APUG	Kraj in čas	Avtor	Vsebina slik
7168.2, 7169.1	2144a	okoli 1720	Manuel Esteran	Magdeburški polkrogli, črpalka, meritve višin
3564.2	1093	Rimski kolegij, 1700	Giovanni Jacobo Panici (1657-1716)/3/	Dve vrsti črpalk, barometri, Robervalov poskus »vakuum v vakuumu«
7172-7173	Adiuncta 2	Rimski kolegij, 1706	Ignazio Guarini (1676-1748) /4/	Poskus z vakuumom v vakuumu
7135.1	1532	okoli 1700	Anonimno	Magdeburški polkrogli, črpalka

SLU - Saint Louis University, ZDA

APUG - Arhiv Pontificia Università Gregoriana, Rim

Ferrare. Bartoli je bil rektor Rimskega kolegija med letoma 1670 in 1674 in je objavil biografijo Zucchija leta 1682 /8/. Zucchi in Kircher sta v Rimu sodelovala pri prvih Bertijevih poskusih s predhodnikom barometra /9/.

Panici je popisal tudi meritve mase zraka Galileja, Mersenna in Fabrija /10/. Poskuse florentinske akademije /11/ s Hg in Galileja z vodo je navajal v podporo svojega mnenja o vakuumu /12/. Tako je bil opis vakuuma osnovni del Panicijeve fizike, ki mu je posvetil zadnja poglavja 1226-1254 na straneh 980-998 svojega rokopisa.

Guarini je 6 let po Paniciju kritiziral Descartesovo teorijo vrtnicev /13/ tudi zaradi Descartesovega nasprotovanja vakuumu /14/. Poročal je tudi o Torricellijevem poskusu, o Valerianu Magniju (1586-1679) in o Linusu /15/. Opisal je Boylovo pnevmatsko napravo /16/ in vakuumske poskuse pri florentinski akademiji /17/. Posebno visoko je cenil Robervalovo teorijo vakuuma.

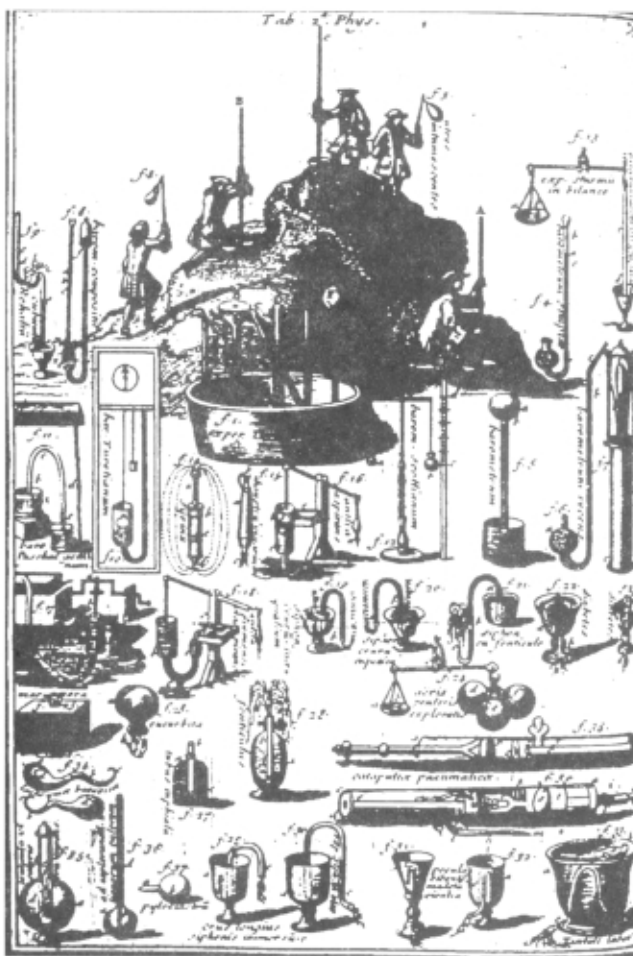
Pol stoletja po Paniciju in Guariniju je Boškovičeva fizika privzela vakuum za enega svojih temeljev. Vprašanje vakuuma je bilo odslej postavljeno na povsem drugačen način kot v starejšem sporu med peripatetiki in atomisti /18/. Boškovič se je izognil tudi kartezianskemu jezikovnemu problemu vakuuma ali nič. Zato je bil opis vakuuma na Boškovičev način za večino jezuitov edina uporabna pot iz zagate, ki jo je sprožil tedaj že očiten uspeh vakuumskih poskusov.

Panici in Guarini sta poučevala na Rimskem kolegiju. Njune skice kažejo naprave, ki so jih pozneje kazali mlademu študentu Rudjeru Boškoviću (1711-1787) iz Dubrovnika. Bošković se je začel učiti fizike leta 1730/31 pri profesorju matematike Oraziju Borgondiju (1679-1741) med letoma 1712 in 1740, ko je začel prebirati tudi Newtonove knjige /19/. Med letoma 1730 in 1732 je obiskoval triletni pouk filozofije. Fiziko ga je v drugem letniku učil profesor Noceti /20/.

2 Meritve višin z barometri

Prve meritve višin z barometri so po navodilih Blaisa Pascala opravili 19.9.1648 na hribu Puy-de-Dôme pri Clermont-Ferrandu v Auvergne, 150 km zahodno od Lyona. 6.5.1653 je zdravnik iz Halifaxa in poznejši FRS Henry Power (1623-1668) opravil podobne meritve na hribu v Halifaxu v smeri Beacons /21/. Podobne poskuse so pozneje ponovili tudi William Ball (1561-1626), Richard Towneley (1629-1707) in Boyle na vrhu cerkve v Westminsteru /22/. Manj je znanega o meritvah višin v Italiji in v habsburški monarhiji. Esteranova risba

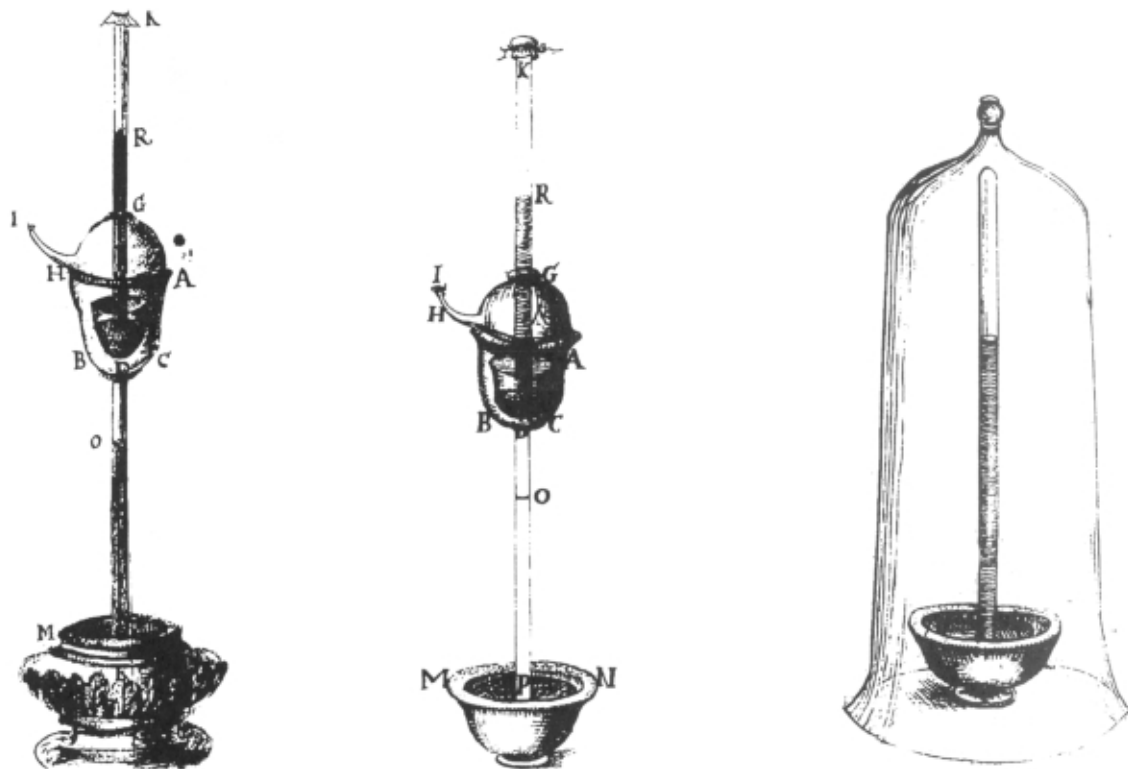
kaže meritve v Italiji ali v Španiji. S slike lahko ugotovimo, kako so si na posameznih višinah hriba sporočali čas v dobi, ko še niso imeli prenosnih ur /23/.



Slika 1: Esteranova risba iz leta okoli 1720 /23/

3 Vakuum v vakuumu

Pascalov prijatelj matematik Giles Person de Roberval (1602-1675) in Adrien Auzout (1622-1691) sta leta 1648 prva opazovala barometer v vakuumu. Kmalu za njima je poskus ponovil tudi Pascal. Podoben Boylov poskus je med vsemi njegovimi dosežki Schott najbolj cenil /24/. Poskus so posrečeno imenovali »vakuum v vakuumu« in je pozneje posebno zaslovel v Huygensovi izvedbi.



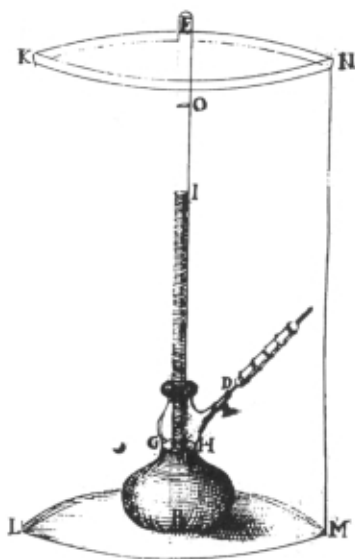
Slika 2: Skice Guarinijevih vakuumskih črpalk /26/

Guarini je kar dvakrat skiciral znameniti Robervalov poskus /25/. Stolp Hg se je znižal, ko so barometer postavili v vakuumsko posodo. Ko so v posodo spustili zrak, se je stolp dvignil na raven, ki je uravnovešala zunanji tlak zraka /26/.

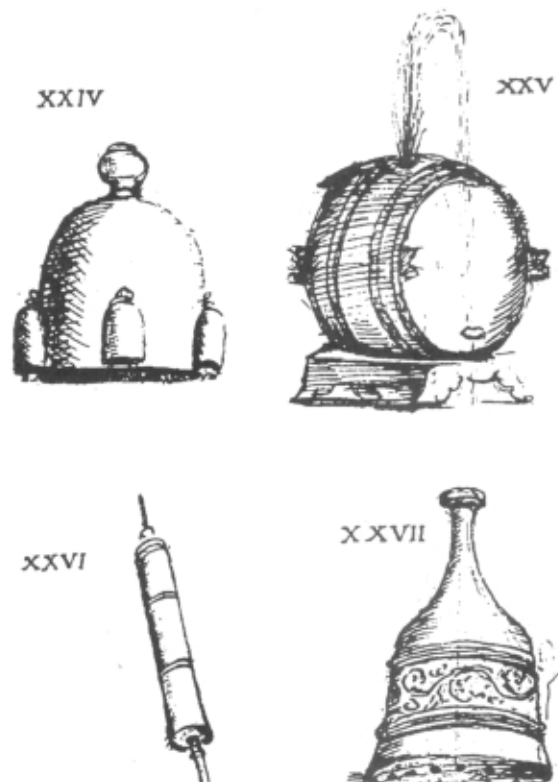
Poskuse z Guerickovimi magdeburškimi polkrogli so po jezuitskih učnih načrtih obravnavali v poglavju o adheziji in ne v poglavju o vakuumu. Zato so bile na skicah upodobljene ob poskusi s sprijemanjem dveh marmornih plošč /28/.

4 Guerickovi poskusi

Tako Guarini kot njegov anonimni sodobnik sta v svojih rokopisih narisala tudi enostavni vakuumski črpalki, podobni zgodnjim Guerickovim. Na skicah ni mogoče razločiti podrobnosti, razen da prikazujejo razmeroma majhne enostavne naprave /27/.



Slika 3: Skica Guarinijeve enostavne vakuumске črpalke /27/

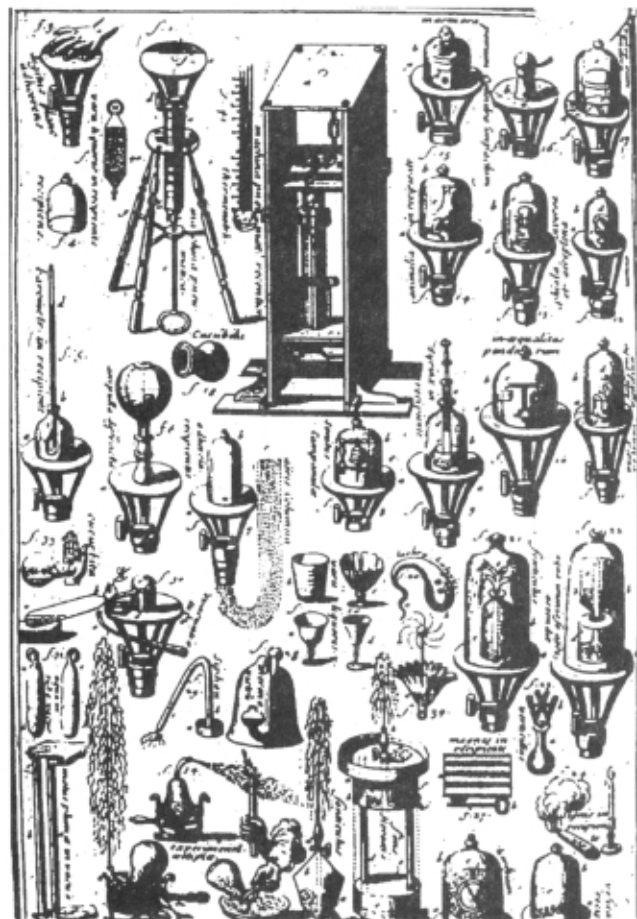


Slika 4: Skice neimenovanega avtorja, okoli leta 1700 /27/

Magdeburški polkrogli so ljubljanski jezuitje nabavili leta 1755. Stoletje pozneje so leta 1867/68 na gimnaziji v Ljubljani ponovno nabavili napravo z enakim imenom. To je bila že doba Geisslerjevih elektronk, ko je vakuum zopet postal zanimivo področje fizikalnega raziskovanja. Leto dni pozneje so si naši predniki lahko prebirali opis Guerickovega poskusa tudi v slovenskem jeziku: »...Te polkrogli, ki sta poprej same od sebe narazen padli, tiščal je zdaj tlak tako drugo ob drugej, da jih šest parov konj, zapreženih z vsake strani v obroča, ni moglo narazen raztrgati« /29/.

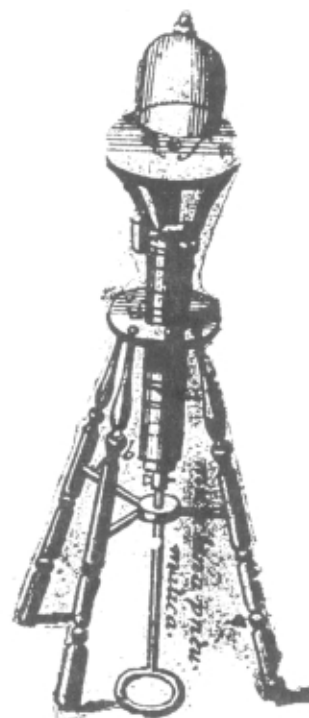
5 Boylovi poskusi

Črpalka /30/ po Esteranovem rokopisu ni bila povsem enaka črpalkam, ki jih je za Roberta Boyla v Oxfordu in Londonu sestavil Robert Hooke konec petdesetih in šestdesetih 17. stoletja, niti ne tisti, ki jo je sestavil Denis Papin v drugi polovici sedemdesetih let. Še bolj se razlikuje od starejših Guerickovih črpalk. Med vsemi je bila najbolj podobna prvi Boylovi črpalki /31/.

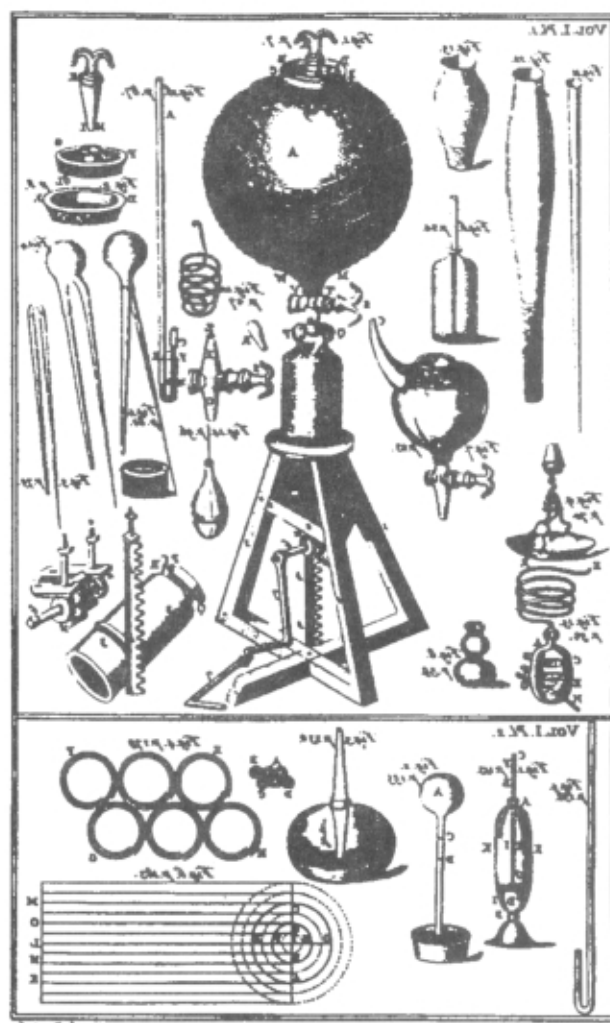


Slika 5: Esteranova risba, okoli leta 1720 /31/

Esteran je svojo napravo po Boyleu imenoval »pnevmatsko« in je posamič skiciral njene sestavne dele. Podobno kot Boyle leta 1669 je tudi Esteran narisal več deset poskusov v svoji vakuumski posodi in jih popisal z latinskimi imeni. Tako je v vakuumu opazoval delovanje tehtnice, vodometa, dušitev živali, zvonjenje /32/, adhezijo, barometer, magnete itd. /33/.



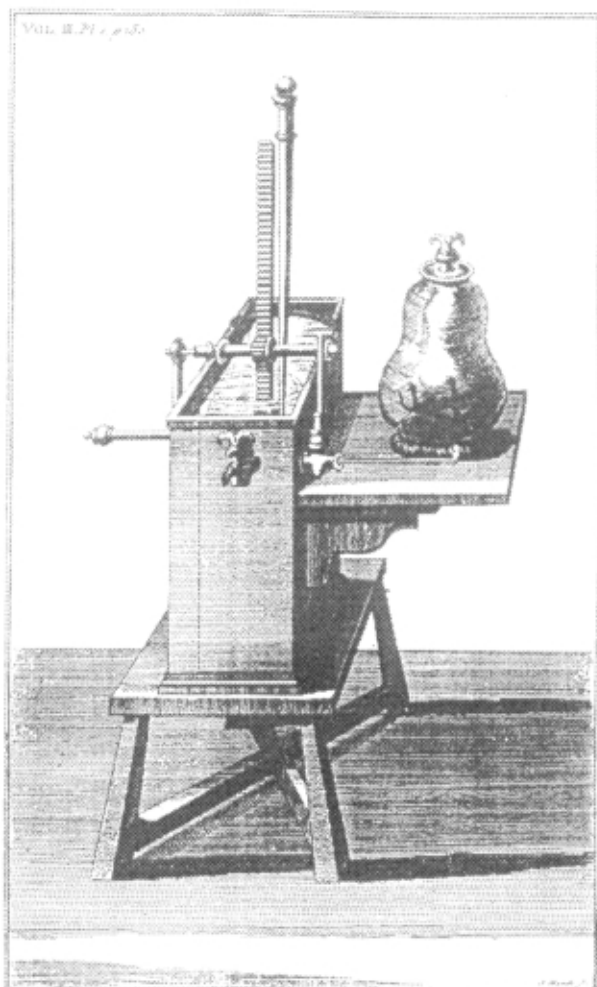
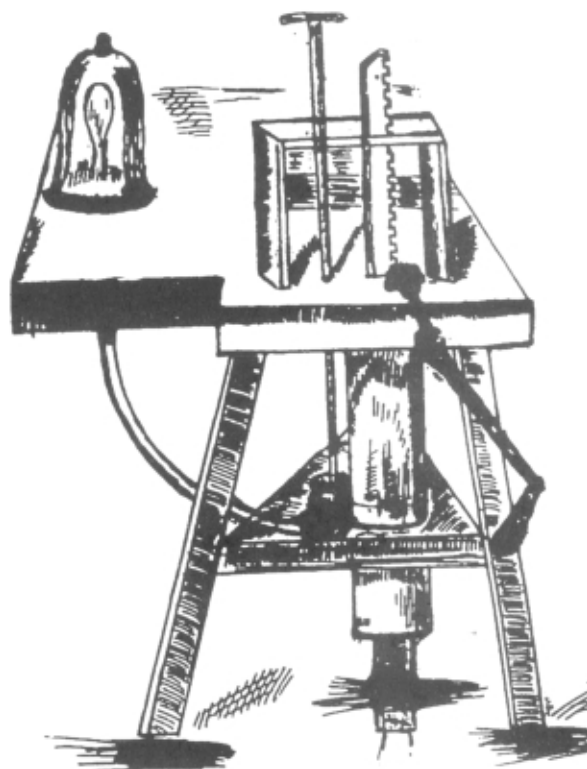
Slika 6: Esteranova vakuumska črpalka okoli leta 1720 /33/



Slika 7: Boylova vakuumska črpalka iz leta 1660 /34/



Slika 8: Panicijevi vakuumski črpalki iz okoli leta 1700 [34/



Slika 9: Boylova vakuumška črpalka [34/

Panicijevi črpalki na Rimskem kolegiju sta bili zelo podobni prvi in drugi Boylovi napravi. Prva se je razlikovala predvsem po obliki ogrodja in po zapornem ventilu pod vakuumsko posodo. Nekaj razlik je bilo tudi pri pokrovu posode, ki na Panicijevi skici ni dobro viden. Druga Panicijeva skica se močno razlikuje od druge Boylove črpalke glede na obliko ogrodja, vakuumske posode in premičnih delov [34/.

Pred odkritjem opisanih skic jezuitskih profesorjev v italijanski provinci je prevladovalo mnenje, da so v Italiji uporabljali predvsem Torricellijev vakuum pod vplivom Galilejevih učencev z Akademije v Firencah. Ker je bil vakuum v barometru boljši od Boylovega, se niso posebno zanimali za Boylovo črpalko, ki je omogočala boljšo postavitev poskusov in veliko večji prostor za njihovo izvedbo.

Pri Akademiji v Firencah in v Guerickovem krogu niso izdelali Boylove črpalke, čeprav so njeno sestavo poznali. Zaradi počasnega širjenja informacij, predvsem z osebnim obiskovanjem in s knjigami, je imel vsak svoje vakuumske naprave za boljše od drugih. Guericke in Florentinci so si ustvarili mnenje na osnovi prvih poročil o zgodnjem Boylovem delu, podobno kot je Boyle prenizko ocenil Guerickovo črpalko [35/.

Tajnik florentinske Akademije Lorenzo Magalotti (1637-1712) se je leta 1678 ob obisku v Londonu osebno prepričal o prednostih Boylove naprave pri odpravi mehurčkov v vakuumu. Nasprotno od Torricellija ali Guericka Boyle ni poskušal izčrpati do »popolnega vakuuma«, temveč je predvsem raziskoval lastnosti razredčenega zraka.

Boylove črpalke so bile »big science« svoje dobe glede na ceno in število izdelanih primerkov. Dragi so bili tudi velikanski barometri z vodo ali vinom. Za izdelavo

takšnih naprav je bilo treba veliko znanja pri pihanju stekla. Tako Mersenne ni mogel opraviti Torricelli-jevega poskusa v Parizu, kjer ni imel na voljo sposobnih obrtnikov. Pascal je bil bolj uspešen, saj so mu pomagali sloviti pihalci stekla iz Rouena. Ker je bila večina črpalk iz stekla, se niso ohranile. Najstarejša danes ohranjena črpalka je bila sestavljena na Nizozemskem v začetku 18. stoletja. Tako so skice v rokopisih edini podatki o napravah za vakuumske poskuse, ki so jih uporabljali v Italiji konec 17. in v začetku 18. stoletja.

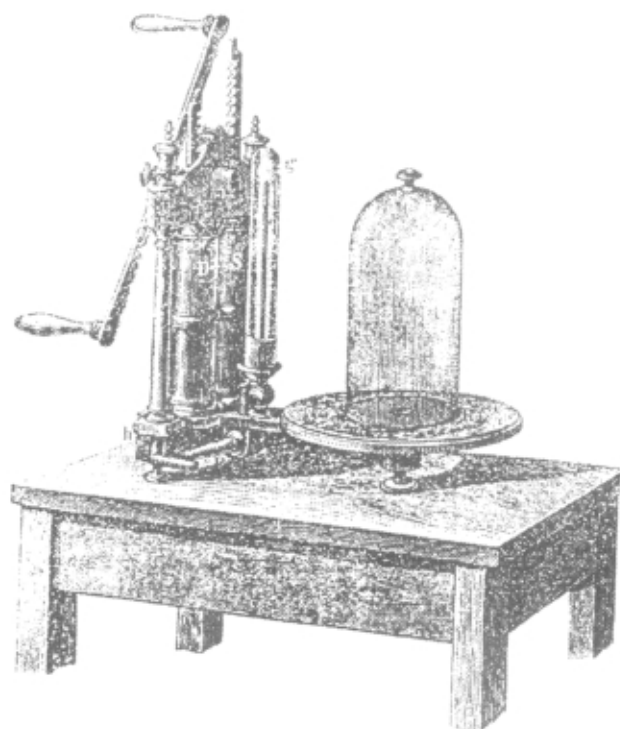
Na objavljenih Boylovih skicah so njegove črpalke visoke okoli 0,5 m, precej manj od Guerickove, ki je bila nameščena v dveh nadstropjih hiše. Čeprav danes ni ohranjena nobena od prvih črpalk, lahko opišemo njihov razvoj /36/:

- Prva Guerickova črpalka v Magdeburgu leta 1648. Dve leti pozneje je sestavil črpalko, s katero je leta 1655 izpraznil polkrogli za znameniti magdeburški poskus v Regensburgu. Napravo je prodal Schönbornu, ki jo je dal jezuitski univerzi v Würzburgu /37/. Tam jo je leta 1655/56 našel in opisal Schott, ki je bil naslednjih 10 let profesor matematike na univerzi v Würzburgu.
- Že Greateorex je skušal izboljšati Guerickovo črpalko /38/. Vendar je bila njegova naprava po Hookovem mnenju prevelika in neuporabna. Konec leta 1658 je Boyle za razvoj vakuumske črpalke najel Greateorexa in Hooka, ki je bil že od prejšnjega leta njegov asistent. Hooke je sestavil model, imenovan »pnevmatski stroj ali zračna črpalka« /39/. Boyle je leta 1660 opisal poskuse, opravljene v letu 1658 in 1659 s prvo Hookovo batno črpalko z živosrebrnim manometrom v zvonu. Eno ali več črpalk je imel v svoji hiši v Oxfordu. Prva med njimi je bila izdelana v začetku leta 1659 v Londonu in marca prenesena v Oxford. Decembra 1661 so v Oxfordu načrtovali povsem novo črpalko.
- Eno ali več črpalk so imeli v kolidžu Gresham v Londonu, kamor jo je dal Boyle prenesti iz Oxforda poleti 1660. Z njo je med letoma 1661 in 1663 znal upravljati le Hooke. Operater John Mayow (1640-1679) je jeseni 1667 kazal delovanje črpalke obiskovalcem.
- Črpalka v Halifaxu leta 1661
- Christian Huygens (1629-1695) je jeseni 1661 odnesel črpalko na Nizozemsko.
- Črpalka, ki jo je do marca 1663 sestavil in pozneje upravljal Huygens za skupino Henrija Louisa Haberta de Montmora (okoli 1600-1679). Skupina s Pascalovima prijateljskoma Pierrom Petitom de Montluçonom (1598-1671), Robervalom (do 1658) in drugimi je delovala med decembrom 1657 in majem 1664 v Parizu.
- Sredi šestdesetih let so imeli črpalko v Cambridgu.
- Huygens je črpalko, izdelano pozimi 1667/68, prinesel v prostore AR med marcem in majem 1668.
- Drugo Hookovo črpalko s Hg-manometrom, izdelano leta 1667, je Boyle opisal leta 1669 v razpravi: »Poskus, ki preiskuje gibanje in občutljivost kartezianske materia subtilis, imenovane tudi eter.«
- Tretjo črpalko je za Boyla sestavil Papin, ki mu je pomagal med letoma 1675 in 1680. Izboljšal jo je tako, da je vakuum napolnil z »umetnim zrakom«, ogljikovim dioksidom, pridobljenim z namakanjem

koral v kislini. Takšno črpalko z dvema cilindroma, ki je dosegala 1/100 bara, je Boyle opisal leta 1682 v »Novih fizikalno-mehanskih poskusih, drugo nadaljevanje« /40/.

- Črpalke Samuela van Musschenbroeka (1639-1681) v Leydenu z ohranjenimi primerki z začetka 18. stoletja. Po načrtu Senguerolusa iz leta 1681 je sestavljal črpalke s po enim skoraj vodoravnim cilindrom. Priročna naprava se je razširila po Evropi, njeni primerki z začetka 18. stoletja pa so še ohranjeni /41/.
- Črpalka Francisa Hauksbeeja (okoli 1666-1713) z dvojnimi cilindromi, izdelana po Boylovih in Huygensovih načrtih iz leta 1675. Prodajali so jo med letoma 1703 in 1709. Primerki so ohranjeni še danes.

Vakuumska črpalka je bila sestavni del vsakega boljšega laboratorija v stoletju po izumu, podobno kot pozneje leydenska steklenica. O vakuumskih črpalkah na jezuitskem kolegiju v Zagrebu vemo zelo malo /42/. V Ljubljani so jo skupaj s številnimi drugimi vakuumskimi napravami nabavili leta 1755, zato ni verjetno, da bi tako drago napravo imeli tudi prej. Po katalogu izdelovalca znanstvenih naprav G. F. Branderja (1713-1783) iz Augsburga je bila leta 1753 najcenejša vakuumska črpalka vredna 150-175 fl, skupaj s pripadajočimi steklenimi deli. Druga je stala 250 fl, najdražja pa 350 fl. Najdražja črpalka je bila izdelana po načrtu Willema Jacoba Gravesanda (1688-1742), sodelavca Pietra van Musschenbroeka (1692-1761) v Leydenu. Mikroskopi so bili veliko cenejši, saj je bilo treba zanje odšteti le 30-40 fl /43/. Leta 1755 so v Ljubljani nabavili 51 eksperimentalnih naprav za skupno ceno 500 fl. Za njihovo vzdrževanje so vsako leto namenili 25 fl. Tako si v Ljubljani gotovo niso mogli privoščiti večjega števila vakuumskih črpalk.



Slika 10: Risba vakuumske črpalke iz Tuškove knjige, objavljene leta 1869 /44/

Profesor na višji realki v Zagrebu je leta 1869 objavil tudi skico črpalke z dvojnimi cilindrom po Hauksbeejevem vzoru, ki je bila sredi 19. stoletja pred Geisslerjevim izumom še vedno najbolj učinkovita:

»Vidimo steklen zvon, ki se poveznik (recipient) imenuje; rob se mu z lojem namaže, in povezne se na ploščo R, na tako imenovani sesaljin taljer, tako, da ne propuša zraku. Plošča ima v sredi luknjo, tako da je zvon s pomočjo cevi v zvezi z obema valjema D in S, katerih bat se vrstoma gori in doli premika s pomočjo dveh zobatih drogov, koleša in dvoramnega vóda, s tem je tedaj mogoče razredčiti zrak v zvonu«. Za to so pa potrebne tudi še pipe, na posebni način prevrtane, in zaklopnice (ventil). Zaklopnice so priprave, ki se same od sebe odpró, če zrak od ene strani nanje tlači; ki se pa spet same od sebe zapró, če tlači zrak od nasprotni strani. Zatorej se imenuje zračna sesalka po tem, kako je narejena, ali sesalka s pipo ali pa sesalka z zaklopnicami« /44/.

Več kot stoletje po izumu se je vakuumaska črpalka Tušku še vedno zdela zelo pomembna. Zato jo je, poleg teleskopa, Voltove baterije, naprave za naelektritev s trenjem, elektroskopa in drugih naprav, postavil tudi v naslovnico svojega prevoda.



Slika 11: Naslovnica Tuškove knjige o fiziki /44/

6 Sklep

V razvoju zgodnjih vakuumskih naprav je še veliko belih lis. Ker naprave iz 17. stoletja niso ohranjene, je marsikatera podrobnost utonila v pozabo. Rokopisi italijanskih jezuitskih profesorjev nam tako pomagajo zapolniti vrzel v poznavanju poskusov, s katerimi so naši predniki dokazovali obstoj vakuuma oziroma prostora z znižanim tlakom.

Literatura in uporabljene okrajšave

- Anonimno. Okoli 1700. De Physica. 400 strani. APUG 1532, SLU-film 7135.1. De Physico auditu considerat Physica compositus naturale. APUG 1532, SLU-film 3600.5.
- APUG - Arhiv Pontificia Università Gregoriana, Rim. Zapisane številke označujejo folijo in stran.
- AR - Académie Royale des Sciences, Paris.
- The philosophy of science of Ruđer Bošković. Proceedings of the symposium of the Institute of philosophy and Theology, S.J. 1987. Zagreb: Jumena.
- Boyle, Robert. 1660. New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air, and its effects; Made, for the Most Part in a New Pneumatical Engine. Written by Way of letter to the Right Honourable Charles Lord Viscount of Dungarvan eldest Son to the Earl of Corke. Oxford. (Ponatis: Boyle, 1965, I: 1-117).
- Boyle, Robert. 1662. A defence of the doctrine Touching the Spring and Weight of the Air. Poroposed by Mr. R. Boyle, in his New Physico-Mechanical Experiments; Against the Objections of Franciscus Linus. Wherewith the Objector's Funicular Hypothesis is also examined. London. (Citirano tudi kot: New Experiments Physico-mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effect. Prevod: Defensio contra Franciscum Linum. Ponatis: Boyle, 1965, I: 118-178).
- Boyle, Robert. 1669. A continuation of New Experiments Physico-mechanical, touching the Spring and Weight of the Air, and their effects. The first part. Written by Way of letter to the Right Honourable the Lord Clifford and Dungarvan. Whereto is annexed A Short Discourse of the Atmospheres of Consistent Bodies. London. (Citirano tudi kot: New Experiments Physico-mechanical, Touching the Spring and Weight of the Air. Second continuation. Latinski prevod: Experimentorum novorum physico-mechanicorum continuatio secunda. 1682. Geneve: Tournes. Ponatis: Boyle, 1966, III: 175-276).
- Boyle, Robert. 1965-1966. The works. Knjige I-VI. Ponatis 1772. Uredil Thomas Birch. Hildesheim: Georg Olms Verlagbuchhandlung.
- Rimski kolegij - Višji študij v Rimu, ki so ga vodili jezuiti med letoma 1551 in 1773. Obiskovali so ga dijaki po končani gimnaziji. Absolventi višjih študijev so se lahko vpisali na univerzo.
- FRS - Fellow of the Royal Society
- Kircher, Athanasius (1602-1680). 1650. Musurgia universalis sive Ars magna consoni et dissoni in X libros digesta, etc. Romae.
- Linus, Franciscus alias Hall (1595-1675). 1661. Tractatus de Corporum Inseparabilitate; in quo Experimenta de Vacuo, tam Torricelliana, quam Magdeburgica, et Boyleana, examinatur, veraque eorum causa detecta, ostenditur, vacuum naturaliter dari non posse: unde et Aristotelica de Rarefactione sententia tam contra Assertores Vacuitatum, quam Corpusculorum demonstratur. London.
- Middleton, W.E. Knowles. 1964. The history of the barometer. Baltimore: The Johns Hopkins Press.
- Nichols, Richard. 1999. Robert Hooke and the Royal Society. Sussex: The Book Guild Ltd.
- NUK - Signature v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani.
- Panici, Joannes (Giovanni Jacobo). 1700. Panici P. In Libros Aristotelis De Physico Auditio Disputationes. APUG 1093, SLU-film 3564.2.
- Reilly, Conor S.J. 1969. Francis Line S.J. An Exyled English Scientist 1595-1675. Roma: Institutum Historicum S.I.
- RS - Royal Society of London.
- Schoedler, Friedrich Karl Ludwig. 1860. Das Buch der Natur. 11. Auflage. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.
- Shapin, Steven in Simon Schaffer. 1993. Leviathan and the Air Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life. 1985. New Jersey: Princeton University Press. Francoski prevod. Paris: Editions de Découverte.
- SLU - Saint Louis University, ZDA.
- Tolomeo, Rita. 1991. Ruggerio Giuseppe Boscovich Letteri per una storia della scienza (1763-1786). Roma: Accademia nazionale delle scienze detta dei XV.

- Tušek, Ivan. 1869. Schoedler. Fizika. Poslovenil Ivan Tušek (1835-1877), profesor na véliki realki v Zagrebu. Ljubljana: Slovenska matica.
- Villoslada, Riccardo G. S.J. 1954. Storia del Collegio Romano dal suo inizio (1551) alla soppressione della Compagnia di Gesu (1773). Romae: Apud Aedes Universitatis Gregorianae.
- Ziggelaar August. S.J. 1987. Ruder Bošković's Experimental Approach to Optical Questions. In The philosophy of science of Ruder Bošković. Proceedings of the symposium of the Institute of philosophy and Theology, S.J. 139-162.
- Zucchi, Nicola (1586-1670). 1648. Experimenta vulgata non vacuum probare, sed plenum et antiperistasis instabilire. Romae.
- Zucchi, Nicola. 1649. Nova de machinis philosophiae, etc. Romae.
- /1/ Zahvaljujem se univerzi Saint Louis za NEH fellowship, ki je omogočil to raziskavo.
- /2/ Linus je bil jezuit angleškega rodu, v pregnanstvu profesor matematike na angleškem kolidžu v belgijskem mestu Liège. Po letu 1658 se je za kratek čas vrnil v London. Posebno znan je bil po polemiki z Newtonom glede teorije barv, ki jo je vodil tik pred smrtjo v Phil. Trans. RS v Londonu (Linus, 1661; Boyle, 1662; Reilly, 1969; Shapin, 1993, 76, 161-165).
- /3/ Leta 1699/1700 je poučeval fiziko na Rimskem kolegiju. Poučeval je tudi logiko (1698/99), metafiziko (1700/1701) in retoriko (1701/1702). Napisal je tudi neobjavljeno delo o metafiziki na 600 neoštevilčenih straneh (APUG 880, SLU film 3555.4).
- /4/ Guarini je bil rojen v mestu Lecce na peti italijanskega škornja in je postal jezuit leta 1693. Bil je profesor fizike na kolegiju v Sieni leta 1703 in profesor matematike na Rimskem kolegiju med letoma 1710 in 1712. Leta 1739 je odšel v Nemčijo in umrl v Dresdenu (Villoslada, 1958, 290, 325, 328, 330, 334, 335).
- /5/ Fistulae (Guarini, 1706, 339).
- /6/ Panici, 1700, 990-992, 996, poglavja 1242-1245, 1251.
- /7/ Giovanni Batista de Benedictis (1622-1706), profesor fizike v Rimu leta 1666.
- /8/ Panici, 1700, 992, poglavje 1246.
- /9/ Gaspar Berti je bil rojen v Mantovi okoli leta 1600, umrl pa je v Rimu v drugi polovici leta 1643 (Zucchi, 1648; Zucchi, 1649; Kircher, 1650; Middleton, 1964, 15; Hellyer, 1998, 187).
- /10/ Panici, 1700, 992, poglavje 1246.
- /11/ Accademia del Cimento.
- /12/ Panici, 1700, 994-995, poglavja 1249-1250.
- /13/ Guarini, Ignazio, Philosophiae Pars Secunda seu Disputationes de Physico Auditui quas Ab Adm. Rev. P'dre Ignatio Guarino e Soc. Jesu. Philosophicus Trienius in Collegio Sienense prelegat Audit ac scripsit Joannes Phillipus Buoninsegni Anno Dni 1706. APUG 2 Adjuncta, SLU-filma 7172.5, 7173.1, 1706, 77.
- /14/ Guarini, 1706, 295.
- /15/ Guarini, 1706, 304-305.
- /16/ Guarini, 1706, 309-314.
- /17/ Guarini, 1706, 319.
- /18/ Hellyer, 1998, 389.
- /19/ Ziggelaar, 1987, 139. Borgondi je poučeval tudi papeža Benedikta XIV in je bil član Accademia degli Arcadi v Rimu. Objavil je delo o sistemu Descartesa na povabilo Pariške akademije. Boškoviću je prepustil svojo katedro za matematiko, ko je leta 1740 je postal rektor Rimskega kolegija. Začel je z reformami in posodabljanjem pouka, vendar je naslednje leto umrl.
- /20/ Carlo Noceti (1694-1759) iz Bagnone je bil tudi profesor logike leta 1729/30, metafizike leta 1731/32, in sholastične teologije med letoma 1733-1742 na Rimskem kolegiju (Tolomeo, 1991, 9).
- /21/ Middleton, 1964, 59-60.
- /22/ Shapin, 1993, 167, 235, 275.
- /23/ Esteran, Manuel, S. J., Liber 4ur Physica. (Philosophia pars 2da Physica Proemium... Pertencia ad P. Manuel Esteran). APUG 2144a, b. SLU-filma 7168.3, 7169.1, okoli 1720, 311 levo.
- /24/ Jezuit Kaspar Schott (Gaspar, 1608-1666) je bil nekaj časa Kircherjev pomočnik v Rimu (Boyle, 1965, I: 33-39, 168-169 (17. poskus in njegova obramba pred kritiki); Hellyer, 1998, 288).
- /25/ Guarini, 1706, 333, 342; Middleton, 1964, 48-49, 54.
- /26/ Guarini, 1706, 341/342 desno; Guarini, 1706, slika 7; Guarini, 1706, slika 8.
- /27/ Guarini, 1706, 341/342 b; slika 9; Anonimno, okoli 1700, 181, slika XXVI.
- /28/ Esteran, okoli 1720, 406 levo; Anonimno, okoli 1700, 181; Anonimno, okoli 1700, 181, slika XXII.
- /29/ Tušek, 1869, 93-94.
- /30/ Esteran, okoli 1720, 32 levo.
- /31/ Esteran, okoli 1720, 32 levo.
- /32/ Kircher je prvi predlagal poskus z magnetnim odklonom za zvonjenje zvona v vakuumu. Kircher je poučeval matematiko na Rimskem kolegiju leta 1639/40 in med letoma 1644-1646. Pozneje je imel tam muzej in v njem verjetno tudi vakuumsko črpalko.
- /33/ Esteran, okoli 1720, slike 10, 21, 14, 8, 7, 5, 27; 320 levo.
- /34/ Panici, 1700, 4, slika e; Boyle, 1660 Boyle, 1965, 86/87; Panici, 1700, 4, slika d; Boyle, 1966, III: prva slika v prilogi na koncu knjige.
- /35/ Shapin, 1993, 62, 232-237, 264-268, 273-277.
- /36/ V Magdeburgu, Oxfordu, Londonu, Parizu in Nizozemskem naj bi med letoma 1647 in 1670 sestavili skupno 15 črpalk (Hellyer, 1998, 295).
- /37/ Johann Philip von Schönborn (1605-1673) je bil škof v Würzburgu ter nadškof in elektor v Mainzu (Hellyer, 1998, 265-268).
- /38/ Londonski mojster Ralph Greatorex, ki je umrl okoli leta 1712.
- /39/ Nichols, 1999, 22, slika za stranjo 86.
- /40/ Boyle, 1682. Franz Xaver Wilde (1753-1828) je knjigo popisal v knjižnici Liceja v Ljubljani do leta 1803, danes pa jo hranijo v Ljubljani (NUK-8340), vezano s šestimi deli drugih avtorjev.
- /41/ Hellyer, 1998, 295, 335.
- /42/ Dadić, Žarko. 1982. Povijest egzaktnih znanosti u Hrvata. Zagreb: SNL, 1982, 240.
- /43/ Hellyer, Marcus, The last of the Aristotelians: The transformation of Jesuit Physics in Germany 1690-1773. Dissertation. University of California, San Diego. Hellyer, 1998, 309.
- /44/ Tušek, 1869, 91-92; Tušek, 1869, naslovnica.

J.J. THOMSONOVO RAZISKOVANJE »NEGATIVNIH IN POZITIVNIH ŽARKOV«

2. DEL: Thomsonovo raziskovanje »pozitivnih žarkov« (1906-1914)

Stanislav Južnič*

J.J. THOMSON'S RESEARCH OF THE
»NEGATIVE AND POSITIVE RAYS«
Part 2: J.J. Thomson's Research of the
»Positive Rays«

ABSTRACT

The second part of the article analyses Thomson's research of »positive rays«. The echo of his successes among Slovene contemporaries is also mentioned.

POVZETEK

V drugem delu razprave opisujemo J.J. Thomsonova raziskovanja »pozitivnih žarkov«. Omenjamo tudi odmeve njegovih odkritij med slovenskimi sodobniki.

1 Uvod

Po odkritju »korpuskule« z negativnim nabojem si je J.J. Thomson želel odkriti še »atom« pozitivne elektrike. Zato je v začetku 20. stoletja začel raziskovati »pozitivne« žarke. Kljub nekaterim uspehom pa projekt ni prinesel tako odmevnih uspehov kot pred tem raziskovanje »katodnih žarkov«.

2 Prva raziskovanja »pozitivnih žarkov«

Leta 1886 je Goldstein odkril »kanalske žarke«, ki so se pozneje izkazali za curek pozitivnih ionov. Leta 1902 jih je v izpraznjeni cevi spustil skozi luknjo v katodi na pozlačen stekleni zaslon. Zlata prevleka je »izginila« zaradi obstreljevanja s kanalskimi žarki /61/. To je bil prvi objavljeni poskus razprševanja kovin s curkom ionov.

V prvih letih 20. stoletja so pobudo pri raziskovanju žarkov prevzeli Francozi, vendar se je njihov prispevek dokaj neslavno končal. Sprva so močno podprli N-žarke, ki naj bi jih odkril René Blondlot (1849-1930) z univerze v Nancyju leta 1903. Vendar se je do leta 1906 izkazalo, da gre za napako. Marca 1906 pa je Jean Becquerel (1878-1953), sin Nobelovca Henrija, objavil presenetljivo odkritje pozitivnih elektronov, ki pa se je v naslednjih letih prav tako izkazalo za eksperimentalno napako /62/.

V naslednjih letih pred 1. svetovno vojno je Thomson raziskoval »kanalske žarke«, o katerih še dve desetletji po Goldsteinovem odkritju ni bilo znanega veliko več, kot da so pozitivno nabiti in da imajo razmerje e/m primerljivo z vodikovim ionom.

3 Raziskovanje sestave atoma

V prvih raziskavah razelektritev je J.J. Thomson leta 1882 in 1884 podpiral W. Thomsonov vrtnični model atoma. Nekaj mesecev pred Hantarom Nagaoko (1865-1950) je J.J. Thomson v sillimanovskih predavanjih na univerzi Yale v ZDA objavil model atoma z enakomerno porazdeljenima nabojema obeh vrst /63/. Naslednje leto je opisal skupine elektronov v atomu, ki povzročajo periodičnost kemijskih elementov. Atom si je zamislil sestavljen iz tisočev vrtečih se delcev, ki sevajo in destabilizirajo atom. Pozitivni elektriki leta 1905 ni pripisal mase. Držala naj bi skupaj delce v atomu po analogiji s hidrodinamiko fluidnega etra v »Faradayevih cevah«. Tako je sestavil model iz krogle enakomerne pozitivne elektrike, po kateri se gibljejo majhni ločeni delci. Čeprav je moral leta 1906 opustiti takšen model, je še vedno razmišljal o Faradayevih silnicah. Pri sestavi atoma je dajal prednost »korpuskulam« kot gradnikom, bržkone tudi zato, ker jih je sam »odkril«.

Leta 1906 sta meritvi sipanja svetlobe in rentgenskih žarkov ter absorpcije β -žarkov v plinih pokazali, da je število »korpuskul« v atomu reda velikosti njegove mase. Pozitivne elektrike ni bilo več mogoče opisovati brez mase, ki je morala biti celo veliko večja od mase elektronov. Zato je Thomson opustil uporabo Faradayevih silnic in domnevo o povsem elektromagnetni masi pozitivnih žarkov, ki jo je sprejel na začetku stoletja /64/.

4 Meritve razmerja e/m pri »pozitivnih žarkih«

Leta 1904 je Thomas Cecil Fitzpatrick (1866-1931), nekdanji demonstrator v Cavendishu in nato predsednik tamkajšnjega kraljičinega kolidža, daroval Cavendishu napravo za utekočinjanje zraka. Tisti čas so uporabljali Sprengelovo ali Töplerjevo črpalko. Vakuum so izboljševali z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, ki so ga dodali v katodno elektronko. Postopek je prvi vpeljal Dewar in je bil za kratek čas po črpanju celo boljši od Gaedove rotacijske črpalke. Pozneje, ko ogljik absorbira ves plin, ki ga zmore, ne pomaga več pri vzdrževanju vakuuma. J.J. Thomson in Aston sta imela le zelo majhno luknjo v opazovalni vakuumski posodi za ozko kapilaro, povezano z razelektritveno posodo. Zato sta lahko uporabljala ogljik za absorpcijo tudi celo uro in še dlje.

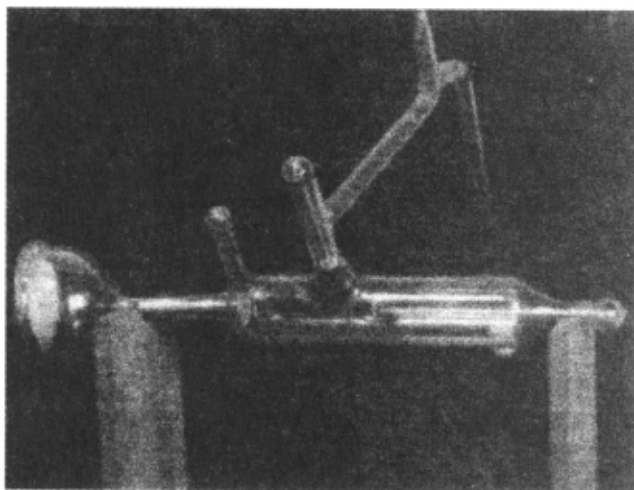
Leta 1905 izumljena Gaedejeva črpalka je bila tudi zelo draga, tako da so jih še leta 1913 v Cavendishu imeli samo 3 ali 4 /65/.

Glede na uspeh pri meritvah razmerja e/m »korpuskul«, se je Thomson leta 1905 odločil za podobne meritve tudi pri pozitivnih »kanalskih« žarkih. Z električnim in magnetnim poljem jih je odklanjal v parabolo. Rezultati so bili močno odvisni od tlaka. Pri tlaku 0,026 mbar je

* 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.

opazil skoraj ravne luminescenčne črte na zaslonu iz willemita. Črte negativnih delcev so bile simetrične, vendar bolj blede. Zaradi ravnih črt je Thomson domneval, da imajo »kanalski« žarki stalne hitrosti, vendar spremenljivo razmerje e/m z maksimalno vrednostjo enako kot pri vodikovem ionu. Tako kot je 10 let prej domneval, da atome sestavljajo »korpuskule«, je tokrat trdil, da so H vodikoviioni osnovni gradniki vseh atomov. Vendar se je pozneje izkazalo, da je bil vakuum onesnažen z vodikom, čeprav ga sprva spektroskopsko ni mogel zaznati.

Pri nižjih tlakih do 0,0039 mbar so negativne črte izginile, pozitivne pa so se cepile v krivulje. Zaradi različnih vrednosti razmerja e/m je Thomson menil, da se spreminja naboj delcev in ne njihova masa. Podobno domnevo je objavil nekdanji Helmholtzov študent Wilhelm Wien (1864-1928) leta 1898 in 1902. Thomson je pri meritvah spreminjal tlak in vrsto plina, vendar je vedno dobil enaki črti z razmerjema e/m 10000 in 5000.



Slika 4: Thomsonova elektronka iz leta 1907 za opazovanje pozitivnih žarkov na luminescenčnem zaslonu iz willemita. Vakuum je izboljšal z izrastkom, polnim ogljika, hlajenem v tekočem zraku (Falconer, n.d., 1988, str. 277).

Leta 1908 je Thomson objavil, da so vsaj del merjenega časa pozitivni žarki nevtralizirani, kar je poskusil pojasniti z dvojicami raznorodnih nabojev. Marca 1909 je kupil Wehrstenov induktor »Mercedes«, ki je dajal do 20 kV pospeševalne napetosti, veliko več kot do tedaj uporabljani Wimshurstov induktor, ki so ga v pozni viktorijanski dobi veliko uporabljali za napajanje večbarvnih Geisslerjevih cevi /66/. Vendar se rezultati niso spremenili, saj je bila hitrost pozitivnih žarkov enaka v vseh plinih, ne glede na pospeševalno napetost.

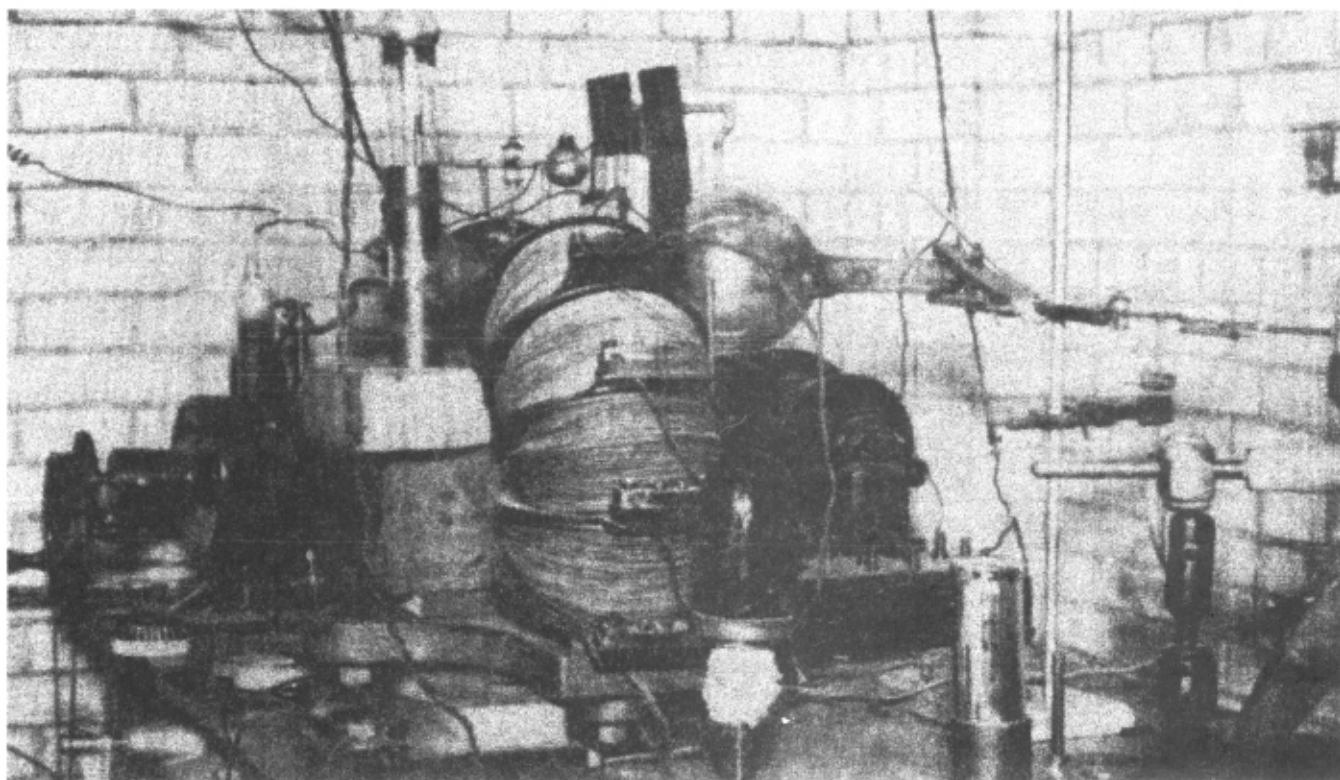
Po Astonovem prihodu se je natančnost meritev v Cavendishu zelo izboljšala. Septembra 1910 so povečali prostornino osrednjega dela katodne elektronke na 2 l, kar je skupaj z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, omogočilo meritve pri nižjih tlakih. Osnovni eksperimentalni problem je bil leta 1910 dovolj visok tlak za razelektritev in obenem dovolj visok vakuum v posodi za odklon nabitih delcev. Zato so ločili prostor za razelektritev od posode za elektromagnetni odklon po Lenardu, ki je že leta 1895 predložil ločitev obeh posod in s tem botroval tudi odkritju rentgenskih žarkov. Lenardovo »okno« so začeli uporabljati v Angliji leta 1897, v Nemčiji pa šele leto pozneje, morda tudi zaradi prekinitve Lenardovih meritev med letoma 1896 in 1897 zaradi posmrtno izdaje Hertzovih del. Čeprav so v Angliji visoko cenili Lenardove poskuse, so njegovo domnevo o »Urstoff«, enakem za vse atome in model prenosa mehanskih impulzov v etru, takoj zavrnil /69/.

Francis William Aston (1877-1945) je bil sin premožnega trgovca s kovinami v Birminghamu, kjer je študiral kemijo in delal med letoma 1903 in 1908. Tri leta je delal v tovarni piva, kjer se je začel zanimati za razelektritve /67/. V začetku leta 1910 je postal Thomsonov raziskovalni asistent. Leta 1913 je bil izbran za Maxwellovega štipendista v Cavendishu in je lahko razvil lastno smer raziskovanja. Leta 1907 je Thomson opisal delovanje masnega spektrografa za ločevanje ionov različnih izotopov, ki jih je napovedal že Crookes leta 1886. Leta 1912 je s poskusom prvi dokazal obstoj izotopov Ne. Prvi masni spektrograf je sestavil Aston leta 1919 in istega leta dokazal obstoj izotopov Cl in Hg /68/. Za izum spektrografa in raziskovanje izotopov je leta 1922 dobil Nobelovo nagrado iz kemije. Leta 1925 in 1937 je izboljšal delovanje spektrografa. Odkril je masni defekt in ga leta 1927 izmeril za številne izotope. Leta 1931 je odkril izotop ^{238}U .

V začetku leta 1910 je Thomson uporabil svoj stari model atoma za obravnavo sipanja žarkov β v snovi in dve leti pozneje pri opisu ionizacije. Jeseni 1910 je namesto luminescenčnega zaslona začel fotografirati pozitivne žarke. Sprva je ekspozicija trajala nekaj ur, nato pa 3 min in manj. Moral je priznati, da pri starejših meritvah ni zaznal težjih ionov zaradi premajhne občutljivosti luminescenčnega zaslona iz willemita.

Philipp Lenard (1862-1947) je bil rojen v Bratislavi. Študiral je pri Helmholtzu in doktoriral pri Bunsenu v Heidelbergu. Kot asistent je delal pri 5 let starejšem Hertzu v Bonnu in po njegovi smrti izdal Hertzova dela ter vodil bonnski fizikalni institut. Nato je postal profesor v Wroclawu (Breslau), leta 1895/96 v Aachnu, med letoma 1896 in 1898 v Heidelbergu, med letoma 1898 in 1908 v Kijevu in leta 1910/1911 znova v Heidelbergu. Leta 1905 je dobil Nobelovo nagrado. Leta 1936 se je upokojil. Objavil je učbenik »Deutsche Physik« z nacistični izhodišči /70/.

Jeseni 1911 je J.J. Thomson tudi Bohru predložil izvedbo poskusa s »kanalskimi« žarki. Bohr ni bil posebno navdušen, saj so si v tem času v Cavendishu



Slika 5: Thomsonova merilna naprava iz obdobja po letu 1910 za fotografiranje pozitivnih žarkov z veliko posodo za razelektritev, s posodo z ogljikom, hlajenim v tekočem zraku, in z velikim elektromagnetom (Falconer, n.d., 1988, str. 297).)

večino naprav za poskuse morali izdelati kar sami, vključno s pihanjem stekla /71/.

Že od leta 1898 si je Thomson zamišljal ionizacijo kot posledico trka hitrega katodnega žarka ob molekulo, iz katere izbije novi katodni žarek. Ni pa zagotovo vedel, ali pride le do izbijanja elektrona (ionizacije), ali pa se iz molekule odcepi cel ion, kot je verjel leta 1907 in domnevo potrdil z meritvami leta 1910.

Opazovanja v izboljšani Wilsonovi meglični celici so leta 1911 prepričala Thomsona, da večina ionov v plinu nastane po trku med ioni in molekulami. Leta 1912 je uporabil Faradayev valj za eno redkih kvantitativnih meritev, vendar se je kaj kmalu vrnil h kvalitativnim meritvam s fotografskimi ploščami.

Do leta 1910 je Thomson menil, da je enota pozitivne elektrike kar vodikov ion. Leta 1912 je to misel končno opustil, saj je natančni Anton dokazal, da so bili njegovi zgodnji rezultati posledica onesnaženja merilnega aparata z vodikom. Raziskovanje »pozitivnih žarkov« ni več obetalo odgovora na vprašanje narave elektrike. Zato ga je Thomson opustil in se vrnil k preučevanju sestave atomov in svetlobe /72/. Tako je na 2. Solvayevi konferenci poleti 1913 opisal kvantno emisijo in absorpcijo sevanja z novim modelom atoma. V središču si je zamislil pozitivne naboje z večino elektronov, ki so bili obkroženi z redkimi šibko vezanimi valenčnimi elektroni. Verjetno si je vse do leta 1921 mislil, da maso atoma sestavljajo α -delci, vodikovi atomi pa so dodani pri jedrih z lihimi masnimi števili /73/.

5 Nobelovi nagrajenci med sodelavci J.J. Thomsona in Rutherforda

Kmalu po koncu 1. svetovne vojne je Thomson prepustil vodenje Cavendishovih laboratorijev nekdanjemu učencu Rutherfordu. Obdržal je le skromen laboratorij za raziskovanje pozitivnih žarkov v Cavendishu in častno mesto vodje kolidža Trinity. Za seboj je pustil veličastno delo. Kar 7 njegovih asistentov je dobilo Nobelove nagrade, 27 pa jih je bilo članov RS. Nekaj časa so nekdanji J.J. Thomsonovi študentje predavali na več fizikalnih katedrah v Britaniji in tudi na številnih drugih v angleško govorečih deželah /74/. Bil je pomemben tudi kot svetovalec eksperimentalnih fizikov. Med drugim je v pismih predložil teorijske rešitve Langmuirju in Tonksu, ki sta leta 1928 in februarja 1929 raziskovala nihanja zelo visokih »Langmuirjevih« frekvenc v ioniziranem plinu.

Vendar pa ima tudi »Sonce svoje pege« in tako tudi J.J. Thomson ni pravilno ocenil nadarjenosti Nielsa Bohra, ko ga je kot mlad doktorand obiskal v Cavendishu leta 1911. Kljub temu pa je imela J.J. Thomsonova teorija atoma velik vpliv na Rutherfordov jedrski model še pozimi 1910/11 /76/. Po 1. svetovni vojni je počasi začel izgubljati stik z novimi odkritji. Med vojno je bil dotok nemških in francoskih časopisov v Cambridge prekinjen, po vojni pa iz teh ali onih vzrokov naročil ni obnovil. Ker pa je bila nemška fizika tisti čas tako pomembna, kot je pozneje postala ameriška, je J.J. Thomson ostal zunaj idejnih tokov novih generacij fizikov /77/.

Tabela 1: Nobelovi nagrajenci med sodelavci J.J. Thomsona in Rutherforda

Leto	Področje	Raziskovalec	Narodnost	Laboratorij (direktor)	Čas sodelovanja
1906	fizika	J.J. Thomson (1856-1940)	Anglež		
1908	kemija	Ernest Rutherford (1871-1937)	Avstalec	Cavendish (Thomson)	1895-1898
1915	fizika	William Lawrence Bragg (1890-1971)	Avstalec	Cavendish	1908-1919 pri Wilsonu
1917	fizika	Charles Glover Barkla (1877-1944)	Anglež	Cavendish (T)	1895-1902
1921	kemija	Frederick Soddy (1877-1956)	Anglež	Montreal (Rutherford)	1900-1902
1922	fizika	Niels Bohr (1885-1962)	Danec	Manchester (R)	1912-1916, tudi Cavendish 1911
1922	kemija	Francis William Aston (1877-1945)	Anglež	Cavendish (T)	1910-1913, nato samostojen
1927	fizika	Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)	Škot	Cavendish (T)	1900-1934, profesor od 1925
1928	fizika	Owen Willans Richardson (1879-1959)	Anglež	Cavendish (T)	1901-1906
1935	fizika	James Chadwick (1891-1974)	Anglež	Cavendish (R)	1919-1935, namestnik direktorja po 1923
1937	fizika	George Paget Thomson (1892-1975)	Anglež	Cavendish (T,R)	1919-1922
1943	kemija	Georg Hevesy (1885-1966)	Madžar	Manchester (R)	1902-1914
1944	kemija	Otto Hahn (1879-1968)	Nemec	Cavendish (R)	
1947	fizika	Edward Victor Appleton (1892-1965)	Anglež	Cavendish (T)	1920-1924 asistent demonstratorja
1948	fizika	Patrick Mainars Stuart Blackett (1897-1947)	Anglež	Cavendish (R)	1923-1933
1950	fizika	Cecil Frank Paeul (1903-1969)	Anglež	Cambridge	Le študira do 1925
1951	fizika	John Douglas Cockroft (1897-1967)	Anglež	Cavendish (R)	1925-1939
1951	fizika	Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995)	Irec	Cavendish (R)	1930-1934
1967	fizika	Hans Albrecht Bethe (r. 1906)	Nemec	Cavendish (R)	Občasni obiski
1978	fizika	Pjotr L.Kapica (1894-1984)	Rus	Cavendish (R)	1921-1935

Predvsem je bil J.J. Thomson sprejemljiv za kritike svojih sodelavcev med pogovori v laboratoriju. Svoje mnenje je bil vedno pripravljen spremeniti pod pritiskom argumentov. Tako je bil še 7.8.1887 v pismu prijatelju in sodelavcu Richardu Threlfallu (1861-1932) razmeroma hladen do predlogov, da naj bi tudi dekleta obiskovala univerzitetna predavanja. Manj kot poldrugo leto pozneje pa se je 2.1.1890 poročil s svojo študentko Rose Elisabeth Paget. Podobno se je 17.7.1876 pripetilo tudi Ludwigu Boltzmannu (1844-1906) in štajerski Slovenki Henrietti pl.Aigentler (1854-1936) v Gradcu.

6 Odmevi J.J. Thomsonovih raziskav na Slovenskem

V slovenskem jeziku pred koncem 19. stoletja ni bilo mogoče dobiti tehtnega odgovora o naravi elektrike: »Kaj je elektrika?... Priznati moramo, da ne znamo odgovora na vprašanje, ki smo ga stavili na začetku tega odstavka. Prišli smo do jedne tistih mej, katerih prekoračiti ne moremo. Ne bom rekel, da učenjaki ne vedó, neizmerno bistroumno razjasniti si različnih električnih prikaznij. Toda o poslednjem vzroku teh prikaznij nam učenost svetá ne vé nič povedati...« /78/.

Jožef Rejšner (tudi Josip, 1875-1955) je bil rojen v Ljubljani. Študiral je na dunajski filozofski fakulteti in vmes odslužil še enoletni vojaški rok. Od leta 1895/96 je prejemal Knafljevo štipendijo. Med letoma 1899 in 1900 je bil suplent v Celju in nato do leta 1904 v 8. dunajskem okraju, kjer je v izveštvju leta 1904 objavil razpravo »Uporaba določenega integrala za definicijske enačbe« v nemškem jeziku. Do leta 1905 je poučeval na realki v Idriji in nato na novomeški gimnaziji. Po enoletnem dopustu 1908/1909 za pisanje učbenika, iz katerega smo povzeli citat o elektronih, je bil z ukazom ministrstva junija in julija 1910 prestavljen iz Novega mesta na 1. klasično gimnazijo v Ljubljani, kjer se je upokojil leta 1921, potem ko je zadnje leto honorarno predaval fiziko tudi na Medicinski fakulteti. Med prvo svetovno vojno je bil mobiliziran. Med letoma 1921 in 1923 je bil narodni poslanec. Po upokojitvi je bil med letoma 1923 in 1938 ponovno zaposlen kot direktor Tehniške srednje šole v Ljubljani /81/.

J.J. Thomsonov model atoma, polnega elektronov, je imel na Slovenskem zagovornike še tik pred 1. svetovno vojno: »Novejša raziskovanja so nam prinesla glede sestave atomske snovi marsikaj novega in skoraj nepričakovanega. Predvsem se je pokazalo, da ne izpolnjuje čista snov vsega atomovega prostora in da si moramo misliti atom sestavljen iz velike množice

silno drobnih telesnih delcev. Te od atoma mnogo tisočkrat manjše in lažje delce imenujemo elektrone. Najlažji vodikov atom ima čez 2000 elektronov v sebi; v drugih atomih jih je pa gotovo še več. Kakor se atomi v telesu ne prestopajo gibljejo in tresejo, podobno krožijo tudi elektroni v malem prostoru atoma z veliko hitrostjo...« /79/.

Pred 1. svetovno vojno so se tudi srednješolci na Slovenskem učili o elektroni in o pozitivnih žarkih /80/: »Elektron je smatrati kot najmanjši naelektrjeni tvorni delec, ki se od tvarinskega atoma bistveno razlikuje... So tudi žarki, ki padajo v katodnem prostoru na katodo; če je katoda sitasta, grede ti žarki skozi njo in tvorijo na drugi strani takozvane kanalske žarke. Magnet jih odklanja v nasprotnem smislu nego katodne žarke, vendar ne z enako jakostjo. So torej tudi pozitivni elektroni; njihova hitrost je manjša, njihova masa je večja od negativnih elektronov.«

Desetletje pozneje je bil elektron slovenskemu bralcu takole opisan: »... atomi elektrike, ki so se ločili od navadne materije. Thomson jih je imenoval korpuskula (telesca), danes je splošno v rabi ime 'elektron', ki jim ga je dal Stoney. Crookesova teorija je postala začetek zelo plodovite elektronske teorije« /82/.

7 Uporabljene okrajšave:

AHES	Archive for history of exact sciences
BAAS	British Association for the Advancement of Science
CalTech	California institute for Technology, Pasadena
HSPS	Historical Studies in the Physical and Biological Sciences
RHS	Revue d'histoire des sciences
RI	Royal Institution
RS	Royal Society of London
WE	Western Electric

8 Literatura

- /61/ Bruno Carazza in Helge Kragh, Augusto Righi's magnetic rays: A failed research program in early 20th-century physics, HSPS 21 (1990) str. 3; P.S. Kudrjavcev, Kurs istorii fiziki, Prosveščenie, Moskva 1974, str. 218 in Istorija fiziki, II, Moskva 1956 str.468; P. Sigmund, Sputtering by Ion Bombardment: Theoretical Concepts (ur. R.Berisch), n.d., 1981 str.12
- /62/ Dahl, n.d., 1997, str. 242-251 in 257-264
- /63/ W. Thomson, Aepinus atomized, Phil.Mag. 3 (1902) str. 257-283; J.J. Thomson, The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits, Phil.Mag. 6 (1903) str.673-693; Vjalcev, n.d., 1981, str. 84; Feffer, n.d., 1989, str. 38-39; Weinberg, n.d., 1986, str. 141
- /64/ Isobel Falconer, J.J. Thomson's work on positive rays, 1906-1914, HSPS 18/2 (1988) str. 271
- /65/ G.P. Thomson, J.J. Thomson and the Cavendish Laboratory in his Day, Nelson, London and Edinburgh 1967, str. 175 in 181; Dahl, n.d., 1997, str. 284
- /66/ Brian Bowers, Lengthening the day, Oxford University Press, Oxford-New York-Tokyo 1998, str. 115.
- /67/ G.P. Thomson, n.d., 1970, str. 51
- /68/ Strnad, n.d., 1996, str. 285 in 1998, str. 183; Robinson, n.d., str. 97
- /69/ Lenard, Ann.Phys. 60 (1894) str. 225 in 64 (1898) str. 279. Prevod v Abraham, n.d., 1905, str. 369, 378, 391 in 558-559; Darrigol, n.d., 1998, str. 22-23; Vjalcev, n.d., 1981, str. 66
- /70/ Strnad, n.d., 1996, str. 142; Birks, n.d., 1963, str. 27
- /71/ Kjaus, n.d., 1977, str. 44-45
- /72/ Falconer, n.d., 1988, str. 265-267
- /73/ Falconer, n.d., 1988, str. 271-308
- /74/ Filonovič, n.d., 1990, str. 152-153; G.P. Thomson, n.d., 1967, str. 172
- /75/ Polovično je bil zaposlen drugje.
- /76/ Dahl, n.d., 1997, str. 338
- /77/ G.P. Thomson, n.d., 1967, str. 155
- /78/ Henrik Schreiner (1850-1920), Fizika ali nauk o prirodi s posebnim ozirom na potrebe kmetijskega stanu, Družba sv. Mohorja v Celovcu, 1889, str. 124-125; Ivan Šubic (1856-1924), Električna, nje proizvodnja in uporaba, SM, Ljubljana 1897
- /79/ Fran Čadež, Skrivnost radioaktivnosti, Slovenska matica, Ljubljana 1908, str. 25-26
- /80/ Dr. Karl Rosenberg, Lehrbuch der Physik für Obergymnasien. Mit Anhang, Alfred Hölder, Wien 1915, str. 359; Jožef Reisner, Fizika za višje razrede srednjih šol, Ljubljana 1913, str. 312-313 (2: z dodatkom Osnovni nauki astronomije, Ljubljana)
- /81/ Peter Vodopivec, Luka Knafelj in njegovi štipendisti, Knjižnica »Kronika«, Ljubljana 1971, str. 75 in 96
- /82/ Lavo Čermelj, Materija in energija, 1923. Ponatis: Slovenska matica, Ljubljana 1980, str. 65

NASVETI

VAKUUMSKO PRIJEMANJE IN TRANSPORT PREDMETOV

Vakuumska tehnika se da s pridom uporabljati za prijemanje in prenos predmetov. V transportu je to lahko dopolnilo paletnega sistema. Tu bomo obravnavali le vakuumski prijem in spust trdnih predmetov ali bremen, tj. prve in zadnje faze vsakega transporta. Za transport bremen v ožjem smislu besede pa lahko izberemo primerno dvigalno-prenosno napravo ali tudi ročni prenos.

Tlačno področje vakuumu, ki ga pri tem uporabljamo, je grobi vakuum, tj. od 1000 do 1 mbar.

Značilni prednosti vakuumskega prijemanja predmetov sta naslednji:

- za prijem niso potrebni kovinski kraki, klešče, vilice, verige ali vrvi
- vakuumska prijemalka je mnogo manjša od bremena.

Ti dve glavni prednosti omogočata zelo široko uporabo v notranjem in zunanjem transportu predmetov, ki imajo zelo občutljivo površino ali pa jih s klasičnimi načini težko prijemamo. Ker je vakuumska prijemalka mnogo manjša od bremena, ni težav pri skladiščenju predmetov, saj jih lahko zlagamo tesno enega poleg drugega.

V industriji lahko z uvedbo vakuumskega transporta tudi do 30 % povečamo proizvodnjo, pri površinsko občutljivih izdelkih pa odpravimo možnost poškodb, ki so pri klasičnem prijemu precej pogoste.

Principialna shema vakuumske prijemalke je prikazana na sl. 1. Če izčrpamo zrak iz prostora med prijemalko in površino trdnega predmeta, tj., da v tem prostoru ustvarimo podtlak oz. vakuum, potem atmosferski tlak

stisne s silo $F(N)$ prijemalko in tisti del bremena, ki je pod njo. Sila stiska oz. tlačna sila je odvisna od tlaka v vmesnem prostoru in efektivne površine prijemalke, ne pa od prostornine tega prostora. Da bi dosegli čim večje prijemne sile pri konstantni površini, stremimo za tem, da bi bil tlak v vmesnem prostoru čim nižji, kar pa je odvisno od zmogljivosti črpalke, prevodnosti vodov in tesnilnih razmer (puščanja) na stični površini med prijemalko oz. njenim tesnilom in bremenom (predmetom).

Če označimo zunanji (atmosferski) tlak s p_z (mbar), ki je okoli 1000 mbar, in notranjega s p_n (mbar), potem moramo za izračun sile upoštevati njuno razliko, ki jo označimo s p_d (mbar), torej:

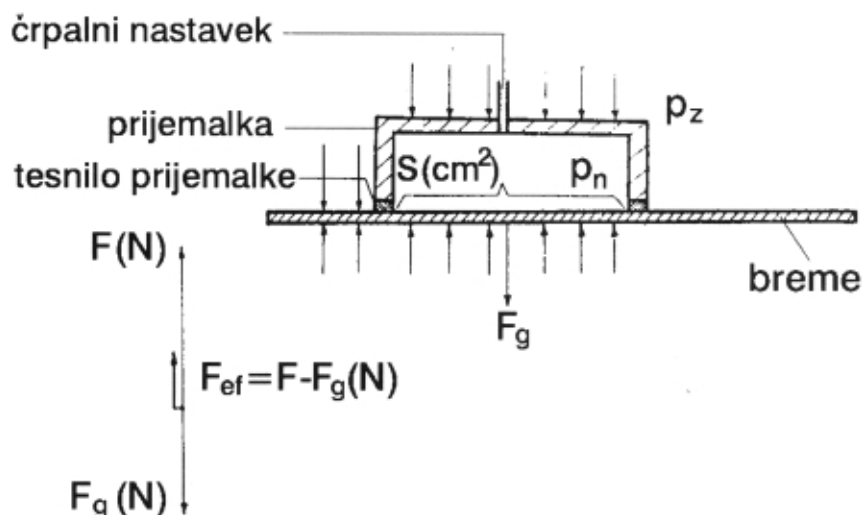
$$p_d = p_z - p_n \quad (1)$$

Tlak $p_d = 1000$ mbar je enak 10 N/cm^2 (temu odgovarja sila 10 N na vsak cm^2 površine; praktično, kot da bi pritiskala utež z maso 1 kg na ploščino 1 cm^2).

Predpostavimo, da je masa bremena zanemarljivo majhna ali enaka nič ($m = 0 \text{ kg}$). Prijemalka je neobremenjena. Sila na neobremenjeno prijemalko je:

$$F = p_d \cdot S \quad (2)$$

pri tem je tlak p_d izražen v N/cm^2 (1 mbar je 10^2 N/m^2 oz. 10^{-2} N/cm^2), efektivna površina prijema S v cm^2 , F pa v N (njuten).



Slika 1: Principialna shema vakuumskega prijemanja

Pri visečem bremenu pa je sila, ki stiska breme in prijemalko, enaka rezultanti obeh sil, tj. gravitacijske sile bremena F_g (N) in F_0 , torej:

$$F_{ef} = F - F_g = p_d \cdot S - F_g \quad (3)$$

Če je sila $p_d \cdot S$ enaka ali manjša od F_g , bremena ni mogoče dvigniti, ker se prijemalka pri poskusu dviga odlepi s površine bremena. Enako se zgodi, če je tlačna razlika $p_d = 0$, kar pomeni, da vmesni prostor ni evakuiran.

Za bolj nazorno predstavo o prijemnih silah, ki jih na tak način dosežemo, naslednji zgled:

S prijemalko, ki ima velikost moške dlani (pribl. 100 cm²), bi lahko varno prijeli jekleno ploščo velikosti 1 m², debeline 10 do 12 mm, če bi ustvarili in vzdrževali vakuum v vmesnem prostoru vsaj 1 mbar.

Uporabnost vakuumskega transporta v raznih panogah gospodarstva

Navajamo le nekaj značilnih uporabnikov vakuumskega prijemanja in transporta:

1. Industrija stekla, steklarske delavnice
2. Lesna industrija in industrija izdelkov iz umetnih snovi: lesonit, vezane plošče, panelne plošče iverke, ultraplas itd.
3. Industrija pohištva
4. Kovinska industrija: proizvodnja plošč iz aluminija, nerjavnega jekla, bakra, medenine itd., ter trgovska podjetja in večji uporabniki tega materiala
5. Industrija in uporabniki gradbenega materiala: betonski bloki, betonske, kovinske in plastične cevi, salonitne plošče, marmorne plošče, umetni kamen
6. Papirna industrija in tiskarne: bale rotopapirja, listi papirja v tiskarskih strojih
7. Prehrabna industrija: transport konzerv in jajc
8. Tovarne, ki embalirajo svoje proizvode v sode ali jeklenke: industrija nafte in derivatov, proizvodnja komprimiranih plinov
9. Precizna mehanika: prijemanje majhnih predmetov z »vakuumsko pinceto«
10. Skladišča

Problem tesnilnih materialov z ozirom na površinske lastnosti bremen

Za doseg maksimalne sile prijema mora biti notranji tlak med prijemalko in površino bremena p_d čim manjši (okrog 1 mbar). Vakuumske črpalke, ki jih navadno uporabljamo, imajo končni tlak 10⁻¹ do 10⁻² mbar, torej odgovarjajo prejšnji zahtevi. Najbolj pa se moramo posvetiti preučevanju tesnilnih razmer na sami površini bremena.

Pri gladkih površinah bremen, kot so npr. steklene ali polirane kovinske plošče in drugi površinsko gladki predmeti, tesnjenje ni težava in je zato uporaba vakuumskega prijemanja na tem področju najbolj razširjena. Prijemalke imajo vgrajeno ravno ali oblikovano tesnilo, navadno okrogle ali elipsaste oblike. Tesnilo je izdelano iz gume ali mehkega plastičnega materiala, ki sta odporna proti olju, različnih oblik in trdote od 20 do 50 po Shoru.

Pri bremenih z izredno grobimi in vdolbinastimi površinami, kot jih imajo razni gradbeni izdelki, je treba dimenzionirati širino tesnila tako, da prekrije premer največjih vdolbin. Trdota gume mora biti čim manjša, zato se pogosto uporablja posebna penasta guma, ki se lepo prilagodi nehomogeni površini bremena in s tem ustvari primerno tesnjenje.

O projektiranju vakuumskih prijemalnih naprav bomo pisali v naslednjem Vakuumistu. To pot vas, spoštovane bralke in bralci, želimo samo opozoriti na to vrsto uporabe vakuumske tehnike, ki vam bo morda kdaj prišla prav (npr. če vam bo toča razbila avtomobilsko pločevino, pa bi radi imeli spet lep avto).

Dr. Jože Gasperič

OBVESTILA

Koledar domačih in mednarodnih konferenc s področja vakuumskih znanosti, tankih plasti, površin, fizike plazme in vakuumske metalurgije

2001

September

- **3. - 6. september**
European Coating Conference, Zürich, Švica
e-pošta: zilic@coatings.de
- **4. - 7. september**
ECOSS-20
Krakov, Poljska
spletna stran:
<http://www.confer.uj.edu.pl/ECOSS20/>
- **3. - 14. september**
NATO-ASI on "Chemical Physics of Thin Film Deposition Processes"
Kaunas, Litva
contact: prof. Yves Pauleau
spletna stran: <http://www.polycnrs-gre.fr>
- **17.-20. september**
7th European Vacuum Conference(EVC-7) & 3rd European Topical Conference on Hard Coatings (ETCHC-3), Madrid, Španija
kontaktna oseba: Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. CSIC
spletna stran:
<http://www.icmm.csic.es/aseva/evc7.html>

Oktober

- **10. - 12. oktober**
37th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Optoelectronic Devices and Applications, MIDEM Bohinj, Slovenija
spletna stran:
<http://paris.fe.uni-lj.si/midem/conf2001>
- **26. oktober - 2. november**
15th International Vacuum Congress (IVC-15)/
11th International Conference on Solid Surfaces (ICSS-11)/ AVS 48th International Symposium,

Moscone Center, San Francisco, ZDA

spletna stran:

<http://www.avs.org/symposium/sanfrancisco/default.html>

- **18. oktober**
9. slovensko srečanje o uporabi fizike,
hotel Kompas, Kranjska Gora, Slovenija
spletna stran:
<http://www2.arnes.si/~mbabic8/kr-gora.htm>

November

- **5. - 8. november**
15th Int. Conf. on Surface Modification Technologies
Indianapolis, ZDA,
Customer Service Center,
e-pošta: cust-srv@po-asm-intl.org
- **14. - 16. november**
9. konferenca o materialih in tehnologijah (54. posvetovanje o metalurgiji in kovinskih gradivih, 9. posvetovanje o materialih, 21. slovensko vakuumsko posvetovanje), Kongresni center GH Emona, Portorož, Slovenija
spletna stran: <http://www.imt.si/portoroz>
- **27. - 28. november,**
Int. Conf. on Carburising and Nitriding, Brno, Češka Republika,
e-pošta: asocacetz@mbox.vol.cz
- **28. - 30. november**
33rd IUVESTA Workshop: "Diamond, Diamond Like Carbon, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide"
Campos do Jordão City, Hotel Leão da Montanha, Brazilija
kontaktna oseba: R.Jackman@eleceng.ucl.ac.uk
ali: mcsalvadori@if.usp.br
spletna stran:
<http://www.iuvsta.org/empworkshops.html#2001>

2002

April

- **21. - 26. april**
34th IUVESTA Workshop: "XPS: From Spectra to Results-Towards an Expert System"
Hotel de l'Univers, Saint-Malo, Francija
kontaktna oseba: Cedric Powell, NIST,
Gaithersburg, MD, ZDA.
- **29. - 30. maj,**
Inter. Conf. on Industrial Surface Technology,
Stockholm, Švedska
e-pošta: info@simr.se

Junij

- **16. - 20. junij**
9th Joint Vacuum Conference
Seggau Castle Conference Centre, Gradec,
Avstrija
kontaktna oseba: M. Leisch, Technische
Universität Graz;
m.leisch@tugraz.at
spletna stran: <http://www.jvc9.tugraz.at>

Julij

- **22. - 26. julij**
The 7th International Conference on the Structure
of Surfaces
Newcastle, NSW, Avstralija
spletna stran: <http://www.pco.com.au/icsos7>

September

- **1. - 6. september,**
Thin Film Division
12th International Conference on Thin Films
(ICTF-12)
Bratislava, Slovaška
e-pošta: ictf12@savba.sk;
spletna stran:
<http://www.savba.sk/sav/inst/fyzi/ictf12>

Oktober

- **10. - 13. oktober,**
3rd Inter. Conf. on Surface Engineering,
Sichuan Province, LR Kitajska,
spletna stran: www.swjtu.cn/ICSE2002

2004

Julij

- **28. junij - 2. julij**
16th International Vacuum Congress (IVC-16)/ 12th
International Conference on Solid Surfaces
(ICSS-12)
Benetke, Italija

TEHNOLOŠKI CENTER ZA VAKUUMSKO TEHNIKO, VAKUUM-TC

Tako kot pri mnogih dejavnostih obstaja tudi na Slovenskem na področju vakuumске znanosti, tehnike in tehnologij zanimanje za združevanje znanja in sil za medsebojno pomoč in uspešnejše delo. Bivše Ministrstvo za znanost in tehnologijo je z namenom pomagati tovrstnim prizadevanjem pripravilo Pravilnik o infrastrukturnih centrih (Ur. list RS št. 82/99). Ob koncu lanskega leta je v Sloveniji delovalo 29 takih centrov – vsak sicer malo na svoj način, vendar vsi s ciljem, da bi na svojem branžnem področju zagotovili čim boljše pogoje za prenos znanja, raziskav in tehnologij v gospodarsko prakso.

Iniciativna skupina za ustanovitev vakuumškega centra (mag. Vladimir Murko, dr. Jože Gasperič, Karol Požun, univ. dipl. inž., in mag. Andrej Pregelj) je od konca lanskega leta stopila v stik s številnimi uporabniki vakuuma in nosilci znanja in z njimi "premlevala" načine in možnosti sodelovanja. Izkazano zanimanje in aktivnosti so pripeljale do sedanjega stanja, ki je naslednje:

19. julija je 9 institucij podpisalo pogodbo, s katero pristopajo k ustanovitvi zavoda Tehnološki center za vakuumsko tehniko, skrajšano: "Vakuum-TC", z namenom, da bodo sodelovali pri izvajanju naslednjih dejavnosti:

- pomoč pri prijavljanju na domače in mednarodne raziskovalne projekte

- raziskave in razvoj za potrebe branže in posameznih naročnikov, pri čemer je zagotovljena ustrezna zaupnost dobljenih rezultatov
- izvajanje meritev in raznih preskušanj
- spremljanje novosti iz raziskav in tehnologij na področju vakuuma ter informiranje in pomoč pri uvažanju le-teh v posamezne gospodarske organizacije
- publicistična dejavnost
- izvajanje oz. organizacija raznovrstnega strokovnega izpopolnjevanja za potrebe branže

Sedaj so vključene naslednje institucije: Danfoss Trata, d.d., Inštitut za kovinske materiale in tehnologije - IMT, Euromix, d.o.o., Stikos d.o.o., Fakulteta za elektrotehniko in Naravoslovnotehniška fakultete Univerze v Ljubljani, Inštitut za tehnologijo materialov Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru, Iskra kondenzatorji, d.d., in Medivak, d.o.o. Predvidena je razširitev v bližnjem obdobju, saj potekajo razgovori še z drugimi, pri katerih pa do zdaj formalnosti še niso bile urejene, ali pa seznanjanje še ni dozorelo, da bi prišlo do vključitve. Novi zavod je sedaj (začetek avgusta 2001) v postopku registriranja na sodišču in ima v pripravi urejanje vakuumškega laboratorija v prostorih tovarne Iskra Zaščite, d.d., Stegne 23, Ljubljana. Dodatne informacije dobite na uredništvu in pri omenjenih članih iniciativnega odbora.

Mag. Andrej Pregelj

OSMO SLOVENSKO-HRVAŠKO SREČANJE, 23. MAJ 2001

Začetek sedaj že tradicionalnih srečanj s hrvaškimi kolegi sega v obdobje nastanka novih držav po letu 1992. Delovni enodnevni strokovni sestanki, na katerih udeleženci na kratko predstavimo rezultate raziskovalnega dela s področja vakuumске znanosti in tehnologij, vedno potekajo v prijetnem vzdušju medsebojnega razumevanja in vzpodbujanja. Spoznavamo, kje si lahko pomagamo in tudi osebne vezi, ki so se pri tem spletle, so tako njim kot nam vsekakor koristne. Dosedanja srečanja smo organizirali (načeloma izmenično) v Zagrebu leta 1993, Ljubljani leta 1994, na Inštitutu R. Bošković v Zagrebu leta 1996, na Institutu za fiziko v Zagrebu leta 1998, na Kemijskem institutu v Ljubljani leta 1999.

Zaradi razmeroma kratkega časa (prvi pogovori so se pričeli šele v februarju 2001), smo zavzeto pristopili k organizacijskim aktivnostim. Na prvem sestanku, ki je bil 13. marca, smo izbrali za mesto dogajanja hotel Kokra na Brdu pri Kranju, za datum srečanja je bil določen 23. maj, v programski odbor so bili izbrani dr. Monika Jenko, dr. Jože Gasperič, dr. Anton Zalar, dr. Peter Panjan, dr. Milorad Milun, dr. Nikola Radić in dr. Branko Pivac, v organizacijski odbor pa dr. Lidija Irmančnik Belič, mag. Milan Čekada, mag. Janez Šetina, dr. Janez Kovač, dr. Božidar Etlinger, dr. Petar Pervan in dr. Hrvoje Zorc.

Slovenski člani omenjenih odborov so imeli potem veliko sestankov oz. usklajevalnih dogovarjanj, na katerih so vklopili še prenekaterega sodelavca in na

katerih so bile skrbno pretehtane vse podrobnosti in bile porazdeljene odgovornosti. Tu je potrebno omeniti: sestavljanje, razmnoževanje in razpošiljanje vabila (zgibanka, internet), posebna vabila za razstavjalce, obveščanje za pridobitev prispevkov, dogovarjanje s hotelom za dvorano in prehrano, pregled prispelih povzetkov, skrb za finančno pokritje, sestava urnika, izbira predsedujočih, priprava posterske sekcije, oblikovanje in tiskanje zbornika povzetkov, organiziranje sprejemne službe in še kaj. O našem znanstveno-strokovnem sestanku je izšlo obvestilo v Delu. Za organizacijo srečanja nam je Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport odobrilo finančno podporo.

Srečanje sta s kratkima pozdravnima nagovoroma odprla predsednika obeh društev (mag. Andrej Pregelj, predsednik DVTS in dr. Nikola Radić, predsednik DVTH), potem pa so se zvrstile tri sekcije s skupno 18 predavanji in sekcija z 20 postri. Vmes smo na kosilu in med odmori pri kavi ali soku imeli priložnost poglobljene seznanjanja. Število prispevkov (38), ki je najvišje doslej, štirje razstavjalci (Pfeiffer-SCAN, Iskra Zaščite, J. K. Lesker in Varian-MEREL), pa sponzorji (IMT, ITPO, MŠZŠ in KI) in ves dan med 40 in 50 prisotnih poslušalcev, so lepa nagrada za vse, ki so pripomogli, da je osmo srečanje slovenskih in hrvaških strokovnjakov s področij vakuumске tehnike tako uspešno potekalo.

mag. Andrej Pregelj, predsednik DVTS

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

MVP035ohnePos

Podtlačni zgoščevalnik



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