

ICONISMUS XI



Fig. IV.

VAKUUMIST

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

48 let
DVTS

Fig. II.

LJUBLJANA, OKTOBER 2008

ISSN 0351-9716

LETNIK 28, ŠT. 3 2008

UDK 533.5.62:539.2:669-982

HiPace™

The turbopump innovation.

The new dimension in vacuum technology!
Intelligent. Flexible. Efficient.

- ▶ Four sizes offering pumping speeds of from 1,000 to 2,000 l/s
- ▶ High pumping speeds for light gases (H₂, He) and heavy gases (Ar, CF₄)
- ▶ The utmost in process suitability, resistant to particles



PFEIFFER  **VACUUM**

SCAN d.o.o. Preddvor

Phone: +386 4 2750 200 · Fax: +386 4 2750 240 · scan@siol.net

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Phone: +43 1 894 17 04 · Fax: +43 1 894 17 07 · office@pfeiffer-vacuum.at

www.pfeiffer-vacuum.net

VSEBINA

ČLANKI

- * Razvoj keramične žarilne svečke (Aljoša Maglica, Milan Ambrožič) 4
- * Opazovanje magnetnih domen z vrstičnim elektronskim mikroskopom s spinsko polarizacijo sekundarnih elektronov (Zoran Samardžija) 9
- * Osemdesetletnica televizijskega patenta ljubljana Codellija (Stanislav Južnič) 20
- * Prvih 800 let frančiškanskega vakuumu za Slovence (ob 800-letnici frančiškanskega reda v letu 2009) (Stanislav Južnič) 22

NASVETI

- * Kje in kako dovajati reaktivni plin med naprševanjem tankih spojinskih plasti? (Peter Panjan, Miha Čekada, Matjaž Panjan) 32

IN MEMORIAM

- * Jože Planinc (1924–2008) (Jože Gasperič) 34

DRUŠTVENE NOVICE

- * 12. Združena vakuumaska konferenca (Miran Mozetič) 35

Obvestilo

Člane DVTS prosimo,
da čim prej poravnate
naročnino za leto 2008
v višini 25,00 EUR

SPONZOR VAKUUMISTA:

– **Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo**

VAKUUMIST

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Glavni in odgovorni urednik: dr. Peter Panjan

Uredniški odbor: dr. Miha Čekada, mag. Andrej Demšar, dr. Jože Gasperič (urednik za področje vakuumске tehnike in sistemov), dr. Bojan Jenko, dr. Monika Jenko (urednica za področje vakuumске metalurgije), dr. Stanislav Južnič, dr. Janez Kovač, dr. Ingrid Milošev, dr. Miran Mozetič, dr. Vinko Nemanič, dr. Boris Orel, mag. Andrej Pregelj, dr. Janez Šetina, dr. Alenka Vesel in dr. Anton Zalar

Tehnični urednik: Miro Pečar

Lektor: dr. Jože Gasperič

Korektor: dr. Miha Čekada

Naslov: Uredništvo Vakuumista, Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, 1000 Ljubljana, tel. (01) 477 66 00

Elektronska pošta: info@dvts.si

Domača stran DVTS: <http://www.dvts.si>

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

Oblikovanje naslovne strani: Ignac Kofol

Tisk: Littera picta, d. o. o., Rožna dolina, c. IV/32–36, 1000 Ljubljana

Naklada: 400 izvodov

RAZVOJ KERAMIČNE ŽARILNE SVEČKE

Aljoša Maglica, Milan Ambrožič

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Električno prevodni, oksidacijsko in korozijsko obstojni delčni kompoziti z dobro toplotno prevodnostjo so potencialno zanimivi za izdelavo grelnih elementov, kot so keramični grelniki, prižigalniki peči in keramične čepne žarilne svečke za dizelske motorje. Primerni materiali morajo imeti tudi dobro obstojnost proti termičnemu šoku, visoko trdnost in žilavost. Sestavljeni so iz električno neprevodne matrice z dobrimi kemijskimi in mehanskimi lastnostmi in iz dispergiranih delcev prevodne sekundarne komponente. Si_3N_4 in $\text{Si}_x\text{O}_y\text{C}_z\text{N}_w$ sta najprimernejša materiala za električno neprevodno keramično komponento, kot prevodno komponento pa najpogosteje uporabljajo WC in MoSi_2 . Raziskave Si_3N_4 s prevodnimi delci so usmerjene v razvoj novih in predvsem cenejših materialov z ustreznimi mehanskimi in električnimi lastnostmi. V članku so prikazani rezultati naših raziskav sintranja keramičnih kompozitov na osnovi $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ (silicijev nitrid s titanovim nitridom) in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ (silicijev nitrid z molibdenovim disilicidom). Meritve so med drugim pokazale, da je specifična električna prevodnost kompozitov zelo odvisna od deleža prevodne komponente, ki je pomemben tudi za dosego perkolacijskega praga.

Development of a ceramic glow plug

ABSTRACT

Electrically conducting composite ceramics with good oxidation and corrosion resistance and thermal conductivity are interesting for the production of various heating elements, such as ceramic heaters, igniters and ceramic glow plugs for diesel engines. Candidate materials must also have good resistance to thermal shock, high strength and toughness. State-of-the-art composite materials usually consist of an electrically insulating matrix component with good chemical and mechanical properties and dispersed particles of conducting secondary component. The most capable materials for insulating matrix are silicon nitride and $\text{Si}_x\text{O}_y\text{C}_z\text{N}_w$, while MoSi_2 and WC are the most commonly used as the conducting component. Research on silicon nitride with dispersed conductive particles is also aimed at the use of cheaper and more easily available raw materials with desirable mechanical and electrical properties. In this paper the results of sintering investigations based on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ composites are shown. The measurements showed, among other facts, that the specific electrical conductivity of composites depends strongly on the amount of the conducting component, which is also important for the achievement of the percolation threshold.

1 UVOD

Dizelski motorji nimajo klasičnih vžignih svečk v valjih motorja, temveč se gorivna mešanica v valju vžge zaradi povišanja njene temperature pri hitrem stiskanju v kompresijskem taktu. Vseeno pa vozila z dizelskim motorjem potrebujejo žarilno svečko, ki omogoča zagon in boljše delovanje hladnega motorja. Zaradi delovanja svečke se zmanjšajo vibracije motorja, manjši je hrup, ki ga motor ob zagonu proizvaja, nižje pa so tudi emisije izpušnih plinov.

V preteklosti so se za ta namen uporabljale kovinske žarilne svečke. Njihovi slabosti sta dolg odzivni

čas in omejena trajnost uporabe. Razvoj dizelskih motorjev in višji ekološki standardi so postavili zahtevo po žarilni svečki, ki bi hitreje dosegla temperaturo, potrebno za vžig goriva, s tem pa bi omogočila boljše delovanje hladnega motorja. Doba trajanja take svečke naj bi bila primerljiva s trajnostno dobo dizelskega motorja.

Zato so različna podjetja po svetu pred okoli 20 leti začela razvijati keramično čepno žarilno svečko (KČŽS). Taka svečka naj bi izpolnjevala naslednje zahteve: temperaturo 1000 °C naj bi dosegla v manj kot dveh sekundah z začetnim tokom manjšim od 20 A, delovna temperatura svečke naj bi bila okrog 1300 °C, kar bi zagotavljalo tok manjši od 8 A in napetost okrog 8 V.

Silicijev nitrid (Si_3N_4) je med najprimernejšimi materiali za električno neprevodno keramično komponento, kot prevodno komponento pa najpogosteje uporabljajo WC in MoSi_2 ⁽¹⁻⁹⁾.

Pri našem razvojnem-raziskovalnem delu smo za neprevodno matrično komponento kompozitnega materiala izbrali keramiko na osnovi silicijevega nitrida Si_3N_4 , kot električno prevodno komponento pa TiN ali MoSi_2 . Od dveh kristalnih modifikacij Si_3N_4 , α in β , ki sta obe heksagonalni, je druga termodinamsko bolj stabilna, zato se pri sintranju prah α - Si_3N_4 pretvori v β - Si_3N_4 . Le-ta ima tudi boljše mehanske lastnosti, tudi večjo toplotno prevodnost, ki je pomembna za dobro delovanje grelnih elementov.

2 PREGLED PATENTOV, POVEZANIH S KČŽS

Najprej smo opravili natančen pregled patentov v zvezi s keramično svečko. Pomagali smo si z iskalnikom esp@cenet. Večinoma navajamo patente, ki so prijavljeni v ZDA (zaradi enostavnosti pregledovanja in tiskanja) in imajo v Evropi ustrezne zamenjave. Nekaj patentov, ki prek spleta niso bili dostopni, smo naročili in dobili s pomočjo knjižnice IJS.

Pri študiju patentov smo se omejili le na tiste, ki so neposredno povezani s keramičnim grelnikom (materiali, tehnologija) in njegovo vgradnjo v ohišje svečke. Dokumentov, ki opisujejo zgradbo ohišja svečke, njegovo obliko, pa tudi krmiljenje svečke in spremljanje razmer v zgorevalnem prostoru (novejši tipi KČŽS), nismo obravnavali. Prvi patenti s področja KČŽS so se v svetu pojavili že v začetku 80-ih let prejšnjega stoletja. Nekaj let kasneje je podjetje Kyocera prvo

pričelo komercializirati in masovno izdelovati keramične čepne svečke na osnovi Si_3N_4 .

Po številu prijavljenih patentov lahko sklepamo, da na tem področju prednjači japonski NGK, opazno pa je še podjetje Bosch, ki je prve patente s tega področja prijavilo že pred petnajstimi leti. Zanimivo je vprašanje, kakšna je povezava med NGK in drugimi japonskimi proizvajalci (Denso, Kyocera, Bosch automotive systems), saj vsi proizvajajo KČŽS podobnih oblik in iz podobnih materialov. Žal je večina patentov, ki bi to pomagala razložiti, v japonščini. Prav tako ne moremo vedeti, katera od patentno zaščitene inovacije se tudi dejansko uporablja v proizvodnji izdelka. Zanimivo je tudi, da ima Beru, kot največji proizvajalec žarilnih svečk za dizelske motorje na svetu, izredno majhno število patentov s področja KČŽS.

Tabela 1: Število najdenih patentov z iskalnikom esp@cenet

prijavitelj	vse vrste žarilnih svečk	keramična žarilna svečka
Allied Signal (Autolite)	13	3
Beru	48	7
Bosch	168	59
Caterpillar	24	7
Denso	229	45
Federal Mogul (Champion)	7	0
ISUZU	140	28
Jidosha Kiki Co.	151	167
KIA	11	2
Kyocera	28	27
NGK	341	175
SSANGYONG	3	2

Na svetu je sedaj okoli 2640 patentov, kjer je v naslovu ali povzetku omenjena žarilna svečka, in okoli 460 patentov, ki se nanašajo na keramično žarilno svečko. Patenti, ki se nanašajo predvsem na posamezne tehnološke postopke, v tej številki niso zajeti, so pa ravno tako povezani s KČŽS. Za njihov pregled smo uporabili mednarodno klasifikacijo patentov.

3 EKSPERIMENTALNO DELO

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ in delčni kompoziti $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ so bili pripravljene iz naslednjih izhodnih surovin: Si_3N_4 (SILZOT HQ, SKW, Berlin, DE), MoSi_2 (< 2 μm , 99+ %, Sigma-Aldrich, DE), TiO_2 (RC8, Cinkarna Celje, SLO), Al_2O_3 (Alcoa, ZDA) in Y_2O_3 (grade fine, H.C. Starck, Berlin, DE). Zaradi boljše preglednosti smo kompozite $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ označili z oznako A in delčne kompozite $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ z oznako B (tabela 2). Dodatka Y_2O_3 in Al_2O_3 izboljšata sintranje Si_3N_4 zaradi nastanka prehodne tekoče faze med sintranjem.

Mešanice praškov smo pripravili iz izračunanega razmerja izhodnih surovin. Preračunane količine začetnih praškov smo skupaj s Si_3N_4 mlevnimi telesi

Tabela 2: Sestava delčnih kompozitov A in B: masni deleži sestavin so podani v odstotkih.

Sestava materiala	Si_3N_4	Y_2O_3	Al_2O_3	TiO_2	MoSi_2
A	82,8	4,5	2,7	10	/
B1	61,2	3,9	2,9	/	32,0
B2	49,9	3,1	2,4	/	44,6
B3	44,7	2,8	2,2	/	50,3

mešali dve uri v planetarnem mlinu, pri čemer smo kot tekoči medij uporabili absolutno čisti etanol. Prah MoSi_2 smo predhodno zmelili v atritorju do povprečne velikosti delcev 0,71 μm . Pripravljene praške smo stisnili na polavtomatski stiskalnici s tlakom 100 MPa v kvadre dimenzij 5 mm \times 42 mm \times 3 mm. Enoosno stisnjene kvadre smo dodatno izostatsko stisnili s tlakom 790 MPa v tlačni posodi, vgrajeni v Indosovi stiskalnici 1000 kN. Tako pripravljene vzorce smo sintrali v elektroporovni peči (Degussa) z grafitnimi grelniki pri temperaturi 1850 °C dve uri v pretoku N_2 pri tlaku 1 bar. Vzorce smo do temperature sintranja segrevali s hitrostjo 10 °C/min in po sintranju ohlajali s hitrostjo 20 °C/min. Temperaturo smo merili z optičnim pirometrom OMEGA OS 3722 (Omega Engineering, ZDA) z natančnostjo 1 °C. Temperatura v peči je zaradi nezvezne avtomatske regulacije nihala za 10 °C.

Mikrostrukturo sintranih vzorcev smo analizirali z vrstičnim elektronskim mikroskopom (Scanning Electron Microscope – SEM, Jeol-5800, Japonska). Upogibno trdnost sintranih vzorcev smo merili s štiritočkovnim preskusom na napravi Instron 1362, kjer sta bila razmika med podpornimi valji nosilca vzorcev 10 mm in 20 mm, hitrost njihovega relativnega pomika pa 1 mm/min. Električno upornost vzorcev smo izmerili z napravo DC Multimeter 3457A (HP) pri sobni temperaturi s štiritočkovno metodo in enosmernim tokom. Naprava dopušča merljivost električne upornosti v območju od $10^{-3} \Omega$ do 4 G Ω .

4 PERKOLACIJSKI PRAG

Perkolacijski prag pomeni najmanjši prostorninski delež prevodne komponente, da postane kompozit prevoden. Geometrijsko je perkolacijski prag dosežen takrat, ko se prevodni delci v neprevodni matrici stikajo tako, da tvorijo makroskopsko veliko gručo, ki sega skozi celoten vzorec. V resnici pa je navadno perkolacijski problem bolj zapleten, saj ima tudi matrica končno prevodnost. Med sintranjem tudi nastanejo druge faze z določeno prevodnostjo, tako da ima lahko celoten kompozit od nič različno prevodnost, tudi če se delci prevodne komponente ne stikajo med seboj. Vseeno pa lahko čisto z numeričnimi simulacijami geometrijskega perkolacijskega proble-

ma ocenimo vedenje materiala blizu perkolacijskega praga, saj tam v vsakem primeru električna prevodnost skokovito naraste.

Časovno zahtevne simulacije Monte Carlo pokažejo za naključno razporejene okrogle delce enakih velikosti v neprevodni matrici perkolacijski prag pri prostorninskem deležu okrog 30 %⁽¹⁰⁾. Perkolacijski prag pa se lahko močno zniža pri podolgovatih prevodnih delcih⁽¹¹⁾. Tudi nehomogena razporeditev prevodnih delcev lahko precej zniža perkolacijski prag. To velja tudi v primeru naših kompozitov: če so velikosti prevodnih zrn dosti manjše od velikosti zrn matrične komponente, saj se tedaj okrog vsakega neprevodnega zrna nabere plast prevodnih zrn. Tedaj lahko ocenimo perkolacijski prag brez zahtevnih numeričnih simulacij.

Za lažji račun vzemimo, kot da so zrna obeh komponent okrogla in po velikosti homogena. Polmer velikih neprevodnih zrn R naj bo precej večji od polmera r prevodnih zrn. Da eno neprevodno zrno obkroži plast N dotikajočih se prevodnih zrn v treh dimenzijah, mora veljati enakost površin: $k \cdot 4\pi R^2 = N \cdot \pi r^2$. Korekcijski faktor k je okrog 0,91, ker so med glavnimi krogi prevodnih kroglic "praznine", izračunamo pa ga tako, da čim tesneje zložimo skupaj kroge v ravnini.

V resnici pa je lahko faktor k precej manjši od 0,91, ker ni nujno, da se vse sosednje kroglice dotikajo med seboj. To je pravzaprav 2-dimenzionalni perkolacijski problem: če kroglice s površine velike krogle razgrnemo v ravnino, se moramo vprašati: kolikšen naj bo ploščinski delež prevodnih krogov za dosego perkolacijskega praga. Simulacija Monte Carlo pokažejo $k \approx 0,7$, nekoliko odvisno od modela. Ker torej pride na eno veliko neprevodno kroglo N majhnih prevodnih kroglic, lahko iz tega izračunamo razmerje prostorninskih deležev prevodne in neprevodne komponente: $V_P/V_{NP} = 4 \cdot k \cdot r/R$, kar je za majhno število r/R kar približno volumenski delež prevodne komponente. Pričakujemo torej, da je perkolacijski prag v grobem sorazmeren z razmerjem povprečnih velikosti zrn obeh komponent. Na primer, če so kristalna zrna prevodne komponente približno 30-krat manjša od zrn matrice, je perkolacijski prag le 10 %.

5 REZULTATI IN DISKUSIJA

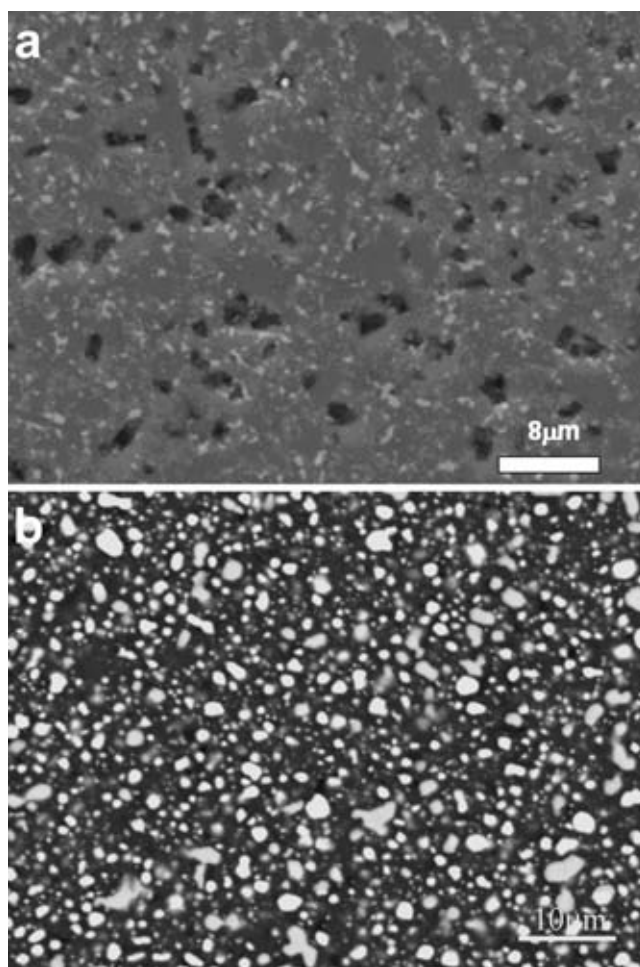
Mikrostruktura preiskava poliranih površin obeh kompozitnih materialov $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ (A) in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ (B3) je prikazana na sliki 1. Na obeh SEM-posnetkih so razvidna podolgovata zrna $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, med katerimi je svetlejša sekundarna faza na osnovi YAG-a, ki najverjetneje vsebuje Y_2O_3 in Al_2O_3 . Pri materialu A so vidna še razporejena majhna zrna TiN, ki nastanejo med reakcijskim sintranjem silicijevega nitrida in

titanovega dioksida. Med možnimi reakcijami sta naslednji dve:

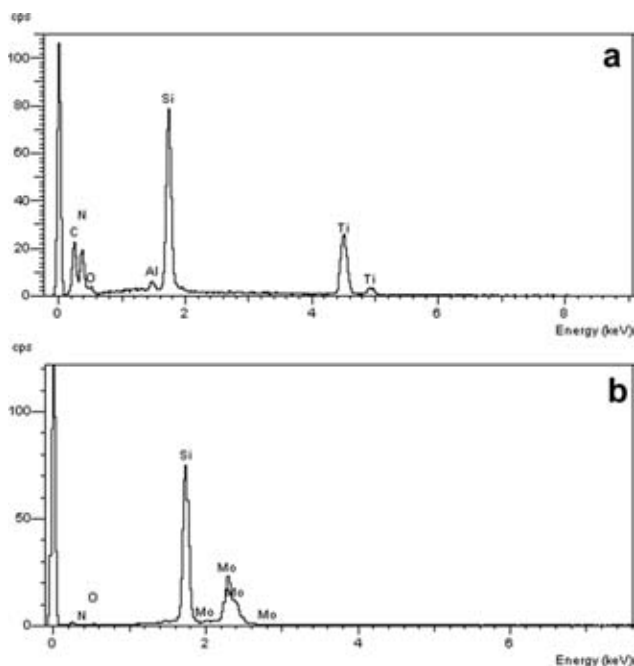


TiO_2 med sintranjem reagira s Si_3N_4 , pri čemer nastaneta TiN in dušik (N_2), ki preide v atmosfero, poleg tega še SiO ali pa SiO_2 . Nastanek SiO_2 pripomore k večjemu deležu prehodne tekoče faze, kar izboljša zgoščevanje in zato tudi mehanske lastnosti. Reakcija med Si_3N_4 in TiO_2 poteka pri temperaturah med 1150 °C in 1450 °C in šele pri višji temperaturi se material sintra. Nastanek TiN smo potrdili tudi z EDS-analizo svetlih zrn, ki je pokazala prisotnost elementov Ti in N (slika 2). Na diagramu sta prikazana tudi signala Si in Al, ki prihajata iz okolice.

Na osnovi mikrostruktorne analize materiala z oznako A smo ocenili povprečno velikost kristalnih zrn TiN na okrog 1,6 μm . Poleg omenjenih faz lahko pri mikrostrukturi materiala B3 opazimo še svetlejša zrna MoSi_2 , ki so enakomerno razporejena po celotnem materialu. Njihova povprečna velikost je v primerjavi s TiN-zrni večja za 0,2 μm , njihova morfo-



Slika 1: Mikrostruktura sintrane keramike na osnovi Si_3N_4 pri 1850 °C, 2h, v N_2 : a) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiN}$ in b) $\text{Si}_3\text{N}_4/$ (prostorninski delež 35 %) MoSi_2 .



Slika 2: EDS analiza sintranega kompozita pri 1850 °C, 2 h, N₂: a) Si₃N₄/TiN in b) Si₃N₄/MoSi₂

logija pa je enakoosna. Prisotnost svetlih zrn MoSi₂ smo potrdili tudi z EDS-analizo (slika 2), kjer sta prisotna signala elementov Mo in Si.

Mikrostruktura vzorcev B1 in B2 je enaka mikrostrukturi materiala B3, razlika je le v njihovem deležu prevodne komponente. V primeru B3 so svetla zrna MoSi₂ najbolj izrazita, saj je njihov prostorninski delež največji (35 %).

Pri primerjavi obeh sintranih kompozitov (slika 1) smo ugotovili, da se kompozitni material Si₃N₄/MoSi₂ bolj zgosti, kar je razvidno iz mikrostrukturne analize. Boljše sintranje materiala B je posledica večjega dodatka oksidov Y₂O₃ in Al₂O₃ v začetni mešanici. Pravilna izbira vrste in količine oksidnih dodatkov ter pogojev sintranja, to je temperature, tlaka in atmosfere, močno vpliva na končne lastnosti in obstojnost produkta. Posebej pomembna je sestava izhodnega prahu in razmerje faz v sistemu Si₃N₄-aditivi, saj ti parametri uravnavajo sestavo faze med zrnji in morfologijo nastalega β-Si₃N₄.

Pri sintranih vzorcih smo izmerili tudi upogibno trdnost in električno prevodnost (tabela 3). Kompoziti Si₃N₄/TiN so dosegli največjo trdnost komaj 409 MPa, kar je bilo pričakovati, saj ima ta material tudi pore

Tabela 3: Primerjava upogibne trdnosti σ_{up} in specifične električne prevodnosti σ_{el} sintranih materialov sestave A in B

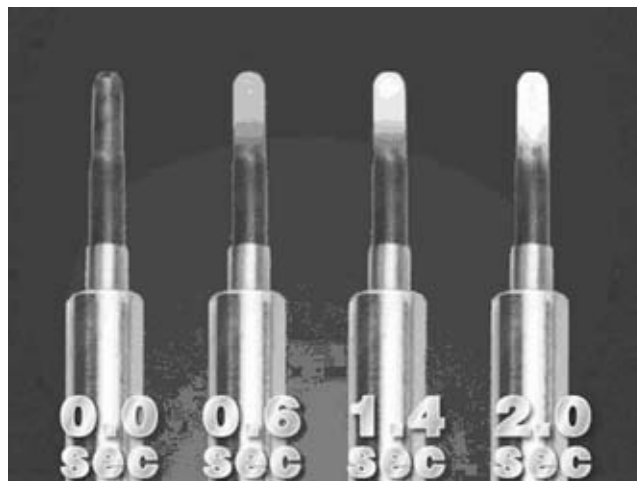
Sestava materiala	σ_{up}/MPa	$\sigma_{el}/(1/\Omega \text{ m})$
A	409	$7,1 \times 10^{-8}$
B1	480	$8,5 \times 10^{-9}$
B2	350	7,15
B3	270	306

(slika 1), ki poslabšajo mehanske lastnosti. Upogibna trdnost kompozitov Si₃N₄/MoSi₂ se spreminja odvisno od količine dodanega MoSi₂ v začetno mešanico. Material z oznako B1 doseže najvišjo upogibno trdnost (480 MPa), medtem ko sta vrednosti upogibne trdnosti materialov B2 in B3 nižji: 350 MPa in 270 MPa. Večji delež MoSi₂ v začetni mešanici torej precej zmanjša upogibno trdnost končnega produkta.

Specifična električna prevodnost vzorcev je odvisna od vrste in količine prevodne faze (TiN ali MoSi₂). Pri materialu A je relativno nizka zaradi premajhnega deleža dodanega TiO₂ v začetno mešanico. Ker smo pri tem materialu odvisni od kemijske reakcije med sintranjem, ki je ni lahko nadzirati, smo večji poudarek namenili kompozitom Si₃N₄/MoSi₂, saj je pri njih prevodna komponenta prisotna že kot izhodna surovina. Material z oznako B1 doseže nizko vrednost specifične električne prevodnosti, le $8,5 \cdot 10^{-9} /\Omega \text{ m}$, primerljivo vrednostim za izolatorje. Pri večjem deležu MoSi₂ vrednost električne prevodnosti znatno raste in doseže pri materialu z oznako B2 za 9 velikostnih redov višjo prevodnost, kar kaže na to, da smo zagotovo presegli mejo perkolacijskega praga. Za prostorninske deleže MoSi₂ v začetni mešanici med 30 % in 35 % imajo kompoziti Si₃N₄/MoSi₂ ustrezno električno prevodnost, ki naj bi se pri keramičnih grelnikih in čepnih svečkah gibala v območju od $1/\Omega \text{ m}$ do $100/\Omega \text{ m}$.

4 SKLEP

Električno prevodnost kompozita iz neprevodne matrice silicijevega nitrida in prevodne komponente TiN ali MoSi₂ lahko z uravnavanjem prostorninskega deleža prevodne komponente spreminjamo za več velikostnih redov. Tako praktično presežemo perkolacijski prag. Izolacijski del čepne svečke lahko izde-



Slika 3: Delovanje keramične žarilne svečke glede na čas po vključitvi

lamo s kompozitom, kjer je delež prevodne komponente malo pod perkolacijskim pragom, prevodni del pa s kompozitom podobne sestave, le da je delež prevodne komponente večji. Tako zaradi podobne sestave delov svečke med drugim dosežemo, da so med delovanjem škodljive termične napetosti veliko manjše, in sicer zaradi skoraj enakega koeficienta temperaturnega raztezanja materialov. Manjše termične napetosti in odlične mehanske lastnosti silicijevega nitrida omogočajo dolgo dobo trajanja svečke. Rezultati meritev upogibne trdnosti so namreč pokazali, da lahko s sintranjem v prisotnosti taline pri atmosferskem tlaku izdelamo delčne kompozite s trdnostmi blizu 500 MPa. Te vrednosti so primerljive s trdnostmi nekaterih keramičnih materialov, ki so narejeni s sintranjem ob povišanem tlaku. V primeru MoSi_2 je treba najti najboljši kompromis med trdnostjo in prevodnostjo, kar bi bilo mogoče z zmanjšanjem velikosti zrn MoSi_2 in s tem bi se zmanjšal perkolacijski prag.

Za konec pa še slika delujoče keramične žarilne čepne svečke proizvajalca Le-Mark (slika 3)⁽¹²⁾.

5 LITERATURA

- ¹A. Bellosi, A. Tampieri, *Journal of the European Ceramic Society*, **9** (1992), 83–93.
- ²H Kawamura, *Key engineering materials*, **89** (1994), 713–718
- ³K. Yamada, N. Kamiya, *Mat. Sci. Eng. A-Struct. Mat., Properties, microstructure and Processing*, **261** (1999), 270–277
- ⁴Frank L. Riley, *Journal of the American Ceramic Society*, **83** [2] (2000), 245–65
- ⁵Byong-Taek Lee, Yeu-Joo Yoon, *Materials Letters*, **47** (2001), 71–76
- ⁶V. Medri, and A. Bellosi, *Journal of Material Research*, **19** (2004) 5, 1567–1574
- ⁷S. Kobel, J. Pluschke, U. Vogt, T. J. Graule, *Ceramics International*, **30** (2004), 2105–2110
- ⁸Xinwen Zhu, Yoshio Sakka, You Zhou, Kiyoshi Hirao, *J. Ceram. Soc. Jpn.* **114** (2006), 1093–1096
- ⁹Z. Guo, M. Parlinska-Wojtan, G. Blugan, T. Graule, M. J. Reece, J. Kuebler, *Acta Materialia* **55** (2007), 2875–2884
- ¹⁰Drory A., Balberg I., Berkowitz B., *Phys. Rev. E* **52** [4] (1995), 4482–4495
- ¹¹De Bondt S., Froyen L., Deruyttere A., *J. Mater. Sci* **27** (1992), 1983–1988
- ¹²www.le-mark.cn/E-pages/product/glow%20plug.asp

OPAZOVANJE MAGNETNIH DOMEN Z VRSTIČNIM ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM S SPINSKO POLARIZACIJO SEKUNDARNIH ELEKTRONOV

Zoran Samardžija

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Pri raziskavah in razvoju sodobnih nanostrukturnih magnetnih materialov ter novejših konvencionalnih magnetnih naprav, kot so npr. diski za shranjevanje podatkov z veliko gostoto zapisa, potrebujemo ustrezno eksperimentalno tehniko za opazovanje magnetnih domen. Ena od tehnik preiskav z visoko ločljivostjo (≥ 10 nm) je vrstična elektronska mikroskopija z analizo spinske polarizacije sekundarnih elektronov – SEMPA. To metodo lahko uporabljamo za preiskave površinske magnetizacije tako masivnih vzorcev kot tudi tankih plasti. Opazujemo lahko magnetne strukture različnih velikosti: relativno velike feromagnetne domenske strukture (>10 μm), domenske stene (~ 200 nm) in fine strukture (<50 nm). V prispevku opisujemo metodo SEMPA z izbranimi primeri analize magnetnih materialov.

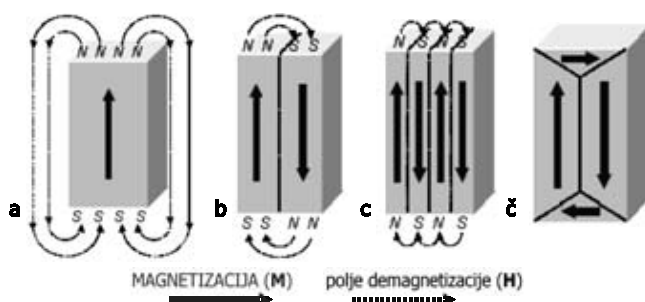
Observation of magnetic domains by scanning electron microscope with spin polarization of secondary electrons

ABSTRACT

For research and development of novel nanostructured magnetic materials and modern conventional magnetic devices, e.g. high-density data storage disks, there is a need for an experimental technique for observation of magnetic domains. One of the high-resolution techniques (≥ 10 nm) is scanning electron microscopy with analysis of spin polarization of secondary electrons – SEMPA. This method can be used for observation of surface magnetization on bulk samples as well as on thin films. Magnetic structures of different size scales can be observed: relatively large ferromagnetic domain structures (>10 μm), domain walls (~ 200 nm) and fine structures (<50 nm). In this paper we present the method SEMPA with selected examples of magnetic material analysis.

1 UVOD

Osnovni namen metod za opazovanje magnetnih struktur je določiti prostorsko porazdelitev vektorja magnetizacije $\mathbf{M}(x,y,z)$ v preiskovanem vzorcu. Magnetizacija v magnetnih materialih je lahko neenakomerna na področjih, ki so velikostnega reda od 10^{-9} do

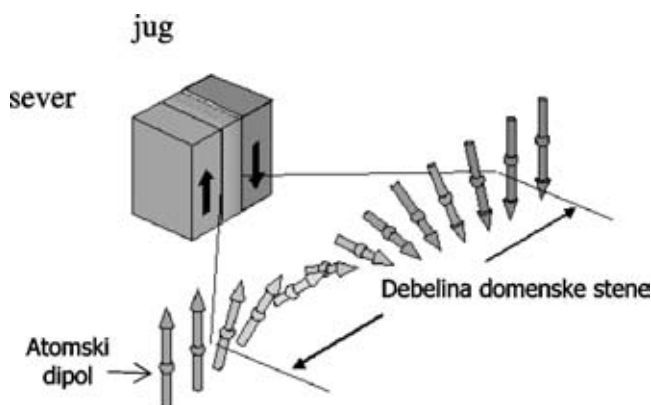


Slika 1: Shematski prikaz razpada magnetizacije na domene: (a) ena domena, (b) dve domeni, (c) štiri domene in (č) zaključena domenska struktura brez zunanjega polja ⁽¹⁾

10^{-3} m (nm do mm). Na področjih velikosti $\geq 10^{-6}$ m (μm) so tipične magnetne strukture t. i. magnetne domene. Koncept magnetnih domen je predlagal Weiss (1907), ki je tako razložil pojav, da sorazmerno majhno zunanje magnetno polje lahko povzroči velike spremembe magnetizacije v feromagnetnih materialih. Magnetne domene so območja, v katerih sta smer in jakost magnetizacije konstantni, medtem ko se smer magnetizacije med posameznimi domenami lahko spreminja (slika 1).

Tako je v večjem volumnu feromagnetnega materiala brez zunanjega magnetnega polja usmerjenost domen skoraj naključna. Možno je tudi, da je vsota magnetizacije za celoten vzorec enaka nič. Meje med domenami z različno usmerjenostjo magnetizacije so domenske stene, ki nastanejo zaradi magnetostatskih interakcij in minimiziranja celotne energije sistema. Dimenzije domenskih sten so velikostnega reda nekaj sto nanometrov (slika 2).

Čeprav je teorija nastanka domen dobro znana, je v sistemih, ki so večji od nekaj mikrometrov, težko natančno teoretično predvideti magnetne domenske strukture zaradi zapletenosti procesa njihovega nastanka. V takih primerih lahko teorijo uporabimo predvsem za razlago opaženih domenskih struktur. Teorijski izračuni pa so bolj uspešni pri t. i. mikromagnetnem modeliranju majhnih enostavnih struktur, kot so tanke magnetne plasti ⁽²⁾. Vendar so realne magnetne komponente in naprave veliko bolj zapletene. Zato za razumevanje in pojasnitev njihovega delovanja potrebujemo ustrezne metode za preiskovanje magnetnih struktur.



Slika 2: Shematski prikaz domenske stene z nasprotno usmerjenimi magnetizacijami (kot 180°)

Dandanes imamo na razpolago več metod za opazovanje magnetnih domen, ki se razlikujejo po načinu merjenja magnetnega kontrasta, ločljivosti, enostavnosti oziroma kompliciranosti razlage meritev, zahtevah pri pripravi vzorcev, ceni preiskav itd. Tehnike opazovanja, ki imajo ločljivost v nanometrskem območju, so neobhodno potrebne pri raziskavah in razvoju sodobnih nanostrukturnih magnetnih materialov ter novejših konvencionalnih magnetnih naprav, kot so npr. diski za shranjevanje podatkov z veliko gostoto zapisa. Vendar je treba poudariti, da za popolno karakterizacijo kompleksnih magnetnih struktur velikokrat uporabljamo kombinacijo več komplementarnih metod. Vsaka posamezna metoda nam poda določene informacije o magnetnih strukturah, prav tako pa vsaka deluje optimalno za specifične vrste vzorcev.

Ena od tehnik preiskav z visoko ločljivostjo (≥ 10 nm) je vrstična elektronska mikroskopija z analizo spinske polarizacije sekundarnih elektronov – SEMPA ali spin-SEM. Prvi SEMPA-instrument je bil narejen leta 1984⁽³⁾ za preiskave domen in domenskih sten masivnih vzorcev. Zaradi izredne površinske občutljivosti pa je metoda postala posebej primerna za analize tankih in ultratankih magnetnih plasti. SEMPA uporabljamo za preiskave kristaliničnih in amorfni materialov, za osnovne raziskave feromagnetizma v dvodimenzionalnih sistemih kot tudi za preiskave, povezane z različnimi tehnološkimi problemi, kot so npr. način zapisovanja informacij na magnetne medije, preskušanje karakteristik magnetnih glav za zapisovanje itd.⁽⁴⁾

V prispevku opisujemo metodo SEMPA z izbranimi primeri analize magnetnih materialov. V kratkem pregledu so za primerjavo podane značilnosti drugih metod za opazovanje magnetnih struktur.

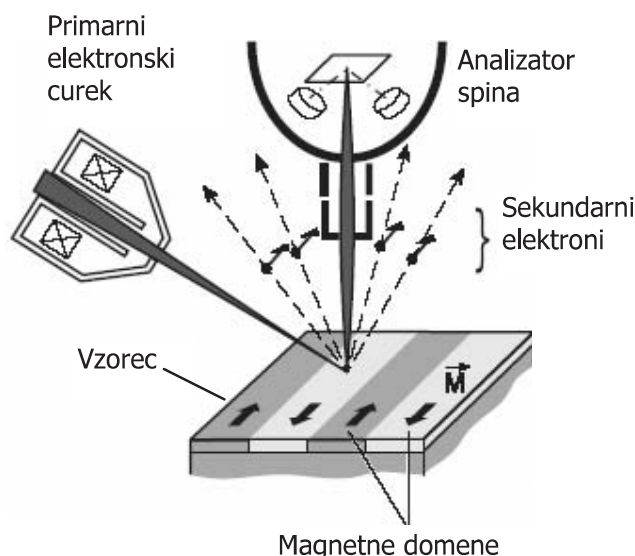
2 VRSTIČNA ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA Z ANALIZO SPINSKE POLARIZACIJE – SEMPA

2.1 Način delovanja SEMPA

Metoda SEMPA (Scanning Electron Microscopy with Polarization Analysis) je nastala kot kombinacija standardne vrstične elektronske mikroskopije (SEM) in analize spinske polarizacije elektronov (slika 3).

Z analizatorjem polarizacije spina določimo smer magnetizacije v vzorcu na mestu interakcije s primarnimi elektroni.

Podobno kot v SEM fokusiran curek primarnih nepolariziranih elektronov visoke energije vrstičimo po površini vzorca. Po večkratnem neeleastičnem sipanju na elektronskih "oblakih" atomov primarni elektroni izgubijo svojo energijo, pri čemer nastanejo

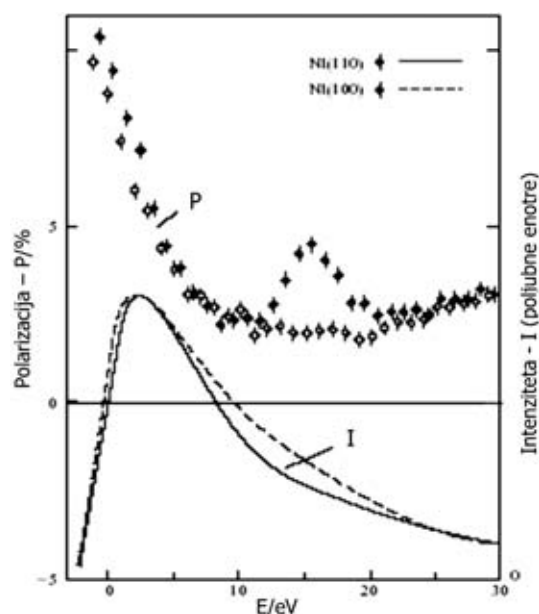


Slika 3: Shematski prikaz delovanja SEMPA. Primarni elektroni povzročijo emisijo sekundarnih elektronov, ki so spinsko polarizirani zaradi magnetizacije v feromagnetnem vzorcu (M).

nizkoenergijski ($E_k < 50$ eV) sekundarni elektroni. Zaradi močne absorpcije je izstopna globina sekundarnih elektronov, ki zapustijo površino vzorca, okoli 1 nm. Zato je površinska občutljivost tehnike SEMPA zelo velika. Pri feromagnetnih vzorcih so sekundarni elektroni spinsko polarizirani. Njihov magnetni moment je vzporeden z magnetizacijo, medtem ko je spin usmerjen nasprotno od vektorja magnetizacije M (slika 5). Tako z merjenjem spinske polarizacije v določeni smeri (x, y, z) dobimo "sliko" določene komponente vektorja magnetizacije na vzorcu.

2.2 Spinska polarizacija sekundarnih elektronov

Polarizacija spina sekundarnih elektronov je zelo odvisna od njihove kinetične energije (slika 4)⁽⁴⁾. Pri višjih energijah ima polarizacija (P) (teoretično) pričakovane vrednosti, medtem ko pri nizkih energijah opazimo dvakrat ali trikrat večje vrednosti. Razlaga takšnega pojava je prednostno neelastično sipanje elektronov s spinom \downarrow in posledično večja verjetnost nastanka in detekcije elektronov s spinom \uparrow . Tudi intenziteta (I) sekundarnih elektronov je največja pri nizkih energijah. Tako lahko z ustrezno napravo v energijskem intervalu od 0 eV do 10 eV zberemo in detektiramo veliko število spinsko polariziranih elektronov. Z nizkoenergijskimi sekundarnimi elektroni dobimo učinkovito kombinacijo velike intenzitete in velikega deleža spinsko polariziranih elektronov, kar poveča magnetni kontrast v SEMPA. Hkrati dosežemo izredno površinsko občutljivost, ki nam omogoča opazovanje magnetnih struktur ultratankih plasti debeline samo nekaj atomskih plasti.



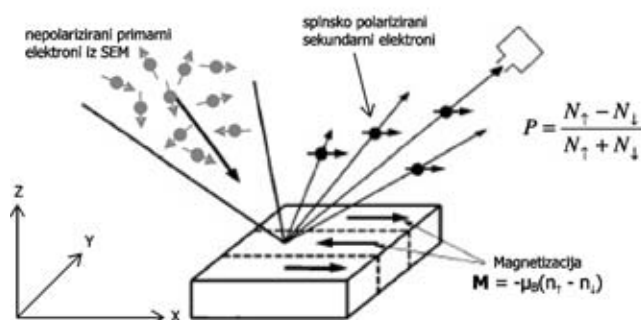
Slika 4: Diagram odvisnosti polarizacije (P) sekundarnih elektronov in intenzitete (I) od kinetične energije sekundarnih elektronov za vzorce Ni(100) in Ni(110). Meritve so bile narejene pri energiji primarnih elektronov 600 eV. Razvidno je povečanje polarizacije pri nizkih kinetičnih energijah. Podobno vedenje je opaženo za druge 3d feromagnetne prehodne kovine Fe in Co, ki imajo največje vrednosti okoli 50 % in 35 %. Polarizacijski vrh za Ni(110) pri 16 eV je posledica spinsko polarizirane strukture energijskega pasu za kristalografsko orientacijo (110).

Z metodo SEMPA ločeno merimo posamezne komponente vektorja spinske polarizacije elektronov P . Tako je polarizacija vzdolž x -osi

$$P_x = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow}) \quad (1)$$

kjer sta N_{\uparrow} in N_{\downarrow} število elektronov s spinom, ki je paraleln (\uparrow) oziroma antiparaleln (\downarrow) z x -osjo (slika 5).

Elektronska spinska polarizacija ima vrednosti v intervalu $-1 \leq P \leq 1$, ki so po enačbi (1) normalizirane glede na celotno število emitiranih elektronov $N = N_{\uparrow} + N_{\downarrow}$. P je torej neodvisna od sprememb intenzitete sekundarnih elektronov in od fluktuacij toka primarnega elektronskega curka. iz tega izhaja, da so SEMPA-meritve spinske polarizacije neodvisne



Slika 5: Primer polarizacije sekundarnih elektronov na feromagnetnem vzorcu. Magnetizacija in polarizacija imata nasproten znak zaradi nasprotne usmerjenosti spinskega magnetnega momenta in spina elektrona ⁽²⁾.

od topografije vzorca. Intenziteto in polarizacijo sekundarnih elektronov izmerimo istočasno toda neodvisno. Tako ločeno posnamemo slike topografije (podobno kot v SEM) ter "magnetne" slike porazdelitve magnetizacije na površini preiskovanega vzorca.

Vrednost polarizacije lahko ocenimo iz poenostavljenega modela, pri čemer privzamemo, da kaskada sekundarnih elektronov nastane kot posledica enakomernega vzbujanja elektronov v valenčnem pasu.

V tem primeru je

$$P = n_B / n_V \quad (2)$$

kjer je n_B število Bohrovih magnetonov na atom in n_V število valenčnih elektronov na atom.

Izračunane vrednosti polarizacije P za Fe 28 %, Co 19 % in Ni 5 % se zelo dobro ujemajo z eksperimentalnimi meritvami za sekundarne elektrone s kinetično energijo med 10 eV in 20 eV. Spinsko polarizirani sekundarni elektroni, emitirani iz feromagnetnega vzorca, izražajo spinski delež magnetizacije:

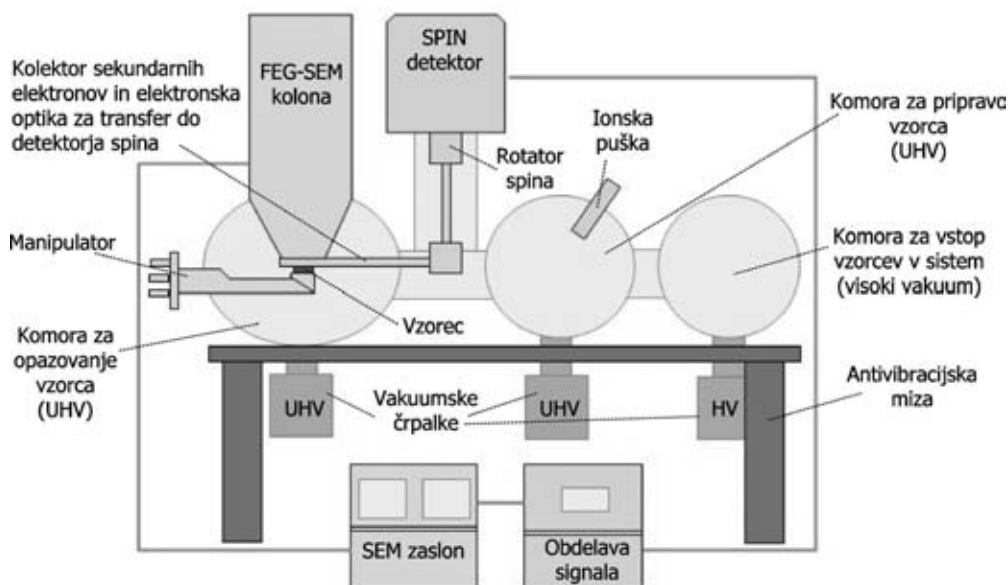
$$M = -\mu_B(n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) \quad (3)$$

kjer je n_{\uparrow} (n_{\downarrow}) število spinov v volumenski enoti, ki so paralelni (antiparalelni) z določeno orientacijo, $(n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$ je efektivna spinska gostota na atom, μ_B je Bohrov magneton ($\mu_B = e\hbar/2m_e = 5,79 \cdot 10^{-5}$ eV/T) ⁽⁵⁾. V 3-d-feromagnetnih prehodnih kovinah z elektronsko strukturo tipa $3s^23p^64s^23d^n$ je orbitalni magnetni moment skoraj "zamrznjen" in je spinski delež magnetizacije približno enak celotni magnetizaciji. Pri železu (bcc-Fe) sta vrednosti spinskega in orbitalnega magnetnega momenta na atom $m_S = 1,98 \mu_B$ in $m_O = 0,085 \mu_B$. Razmerje m_O/m_S je torej 0,043 ⁽⁶⁾.

Izmerjene komponente vektorja polarizacije (P_x, P_y, P_z) so proporcionalne magnetizaciji (M_x, M_y, M_z), so pa nasprotno usmerjene. Konstanta proporcionalnosti med P in M ni točno določena in se spreminja za različne materiale. Zato nam meritve SEMPA dajejo predvsem relativne vrednosti komponent vektorja magnetizacije na površini vzorca, ne pa njihovih absolutnih vrednosti.

2.3 Osnovne značilnosti metode SEMPA

V osnovi ima metoda SEMPA veliko lateralno ločljivost, ki je predvsem odvisna od premera fokusiranega primarnega elektronskega curka ter od vpliva zunanjih mehanskih in elektromagnetnih motenj na njegovo stabilnost. Zaradi majhne učinkovitosti spinskih detektorjev je treba v primarnem curku ohraniti zadosten tok elektronov, da v primernem času lahko posnamemo polarizacijske slike s primernim kontrastom in razmerjem signal-šum. Zato v sodobnih napravah SEMPA uporabljamo elektronske izvire, ki imajo visoko svetilnost. To so katode, ki delujejo na osnovi hladne ali termične poljske emisije (FEG –



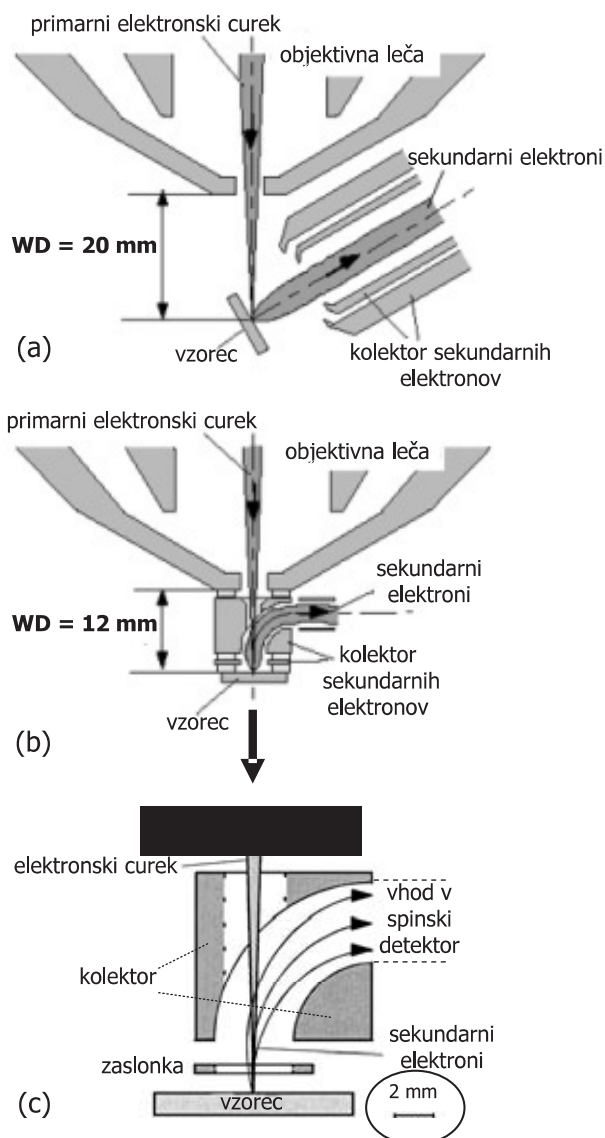
Slika 6: Shema novejšje izvedbe naprave SEMPA (2001). Komora z ultravisokim vakuumom (UHV) je potrebna, da se prepreči adsorpcija preostalih plinov na površini vzorca med analizo. Ionska puška v UHV-predkomori za pripravo vzorca je namenjena za odstranjevanje oksidnih plasti in površinske kontaminacije.

field emission gun). Tako npr. pri toku 1 nA posnamemo sliko SEMPA v času okoli 60 minut. V najboljšem primeru pri slikah magnetnega kontrasta dosežemo ločljivost okoli 10 nm, pri rutinskem delu pa okoli 100 nm. SEMPA ima tudi vse tiste prednosti, ki so značilne za vrstično elektronsko mikroskopijo: velika delovna razdalja, velika globinska ostrina in enostavno spreminjanje povečave, kar omogoča analizo površin velikosti od nekaj milimetrov do nekaj sto nanometrov.

Zaradi izredne površinske občutljivosti (informacijska globina je ~ 1 nm) mora biti površina vzorcev za SEMPA čista in brez kakršnekoli kontaminacije oziroma oksidnih plasti ali adsorbatov. Pri pripravi vzorcev uporabljamo tehnike za pripravo čistih površin v napravi sami (*in situ*). Zato mora naprava SEMPA delovati v ultravisokem vakuumu ($p < 5 \cdot 10^{-8}$ Pa). Skica instrumenta s pripravo vzorca *in situ* je prikazana na sliki 6⁽⁷⁾.

V SEMPA se uporabljajo različni analizatorji oziroma detektorji spinske polarizacije (polarimetri) sekundarnih elektronov. To so Mottov detektor, nizkoenergijski detektor z difuzijsko razpršitvijo (LEDS) in detektor z uklonom nizkoenergijskih elektronov (LEED). Za vse vrste polarimetrov je zna-

Slika 7: Konvencionalna (a) in nova izvedba (b) kolektorja sekundarnih elektronov v SEMPA. V (a) je smer primarnega curka elektronov različna od smeri sekundarnih elektronov (delovna razdalja (WD) je 20 mm) medtem ko sta v (b) smeri enaki. V izvedbi (b) zberemo sekundarne elektrone, ki so za 90° odklonjeni od prvotne smeri. To omogoča zmanjšanje delovne razdalje na 12 mm. Marker na sliki (c) nam kaže tudi realno velikost novonarejenega kolektorja⁽⁸⁾.



čilna zelo majhna učinkovitost detekcije, ki je velikostnega reda 10^{-4} .

Čeprav je SEMPA v principu neodvisna od majhnih topografskih variacij na površini vzorca, je zaželeno, da so vzorci dobro polirani ter brez površinskih mehanskih napetosti. Vzorci morajo biti električno prevodni.

2.4 Instrumentalni faktorji

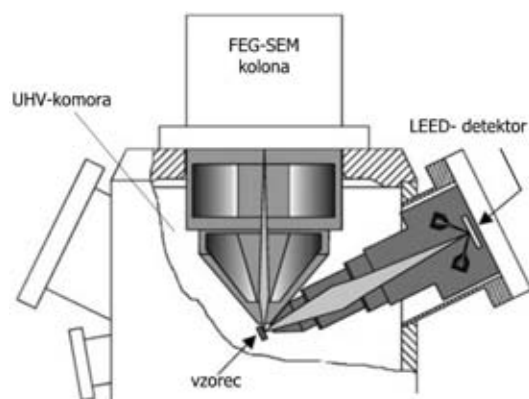
Za delovanje vrstičnega mikroskopa je značilno, da sferna aberacija objektivne leče hitro narašča s povečanjem delovne razdalje med vzorcem in objektivno lečo. Zato visoko ločljivost praviloma dosežemo pri čim krajši delovni razdalji. V zadnjih letih so bile narejene izboljšave posameznih komponent v napravah SEMPA, ki omogočajo majhne delovne razdalje in veliko lateralno ločljivost, celo do 5 nm^(8,9). To so dosegli predvsem z novo izvedbo geometrije kolektorja sekundarnih elektronov ter vhodnega dela analizatorja spinske polarizacije. Slika 7 prikazuje konvencionalno in novo konstrukcijo kolektorja sekundarnih elektronov.

Nova izvedba (slika 7b) omogoča tudi, da se vzorec fizično pritisne ob kolektor in tako mehansko pritrdi z objektivno lečo. Tako postane celoten sistem primarne elektronske optike z vzorcem še manj občutljiv za zunanje mehanske motnje.

Drugi način za zmanjševanje delovne razdalje je predelava oblike vhodnega dela spinskega detektorja (slika 8), ki je prilagojena geometriji objektivne leče in omogoča namestitev detektorja tik pod objektivno lečo v SEM-koloni.

Kolona UHV FEG-SEM je posebno prirejena izvedba mikroskopa LEO Gemini⁽⁹⁾.

Kratka delovna razdalja in velik izstopni kot sekundarnih elektronov (take-off angle), ki je približno enak 90° , omogočata velik prostorski kot zbira-



Slika 8: Shema SEMPA prikazuje relativno orientacijo SEM-kolone, vzorca in spinskega LEED-detektorja v UHV-komori. Nova izvedba detektorja omogoča majhno delovno razdaljo (WD) med objektivno lečo in vzorcem kot tudi majhno razdaljo med vzorcem in detektorjem (8 mm).

nja (solid angle) le-teh. Za sekundarne elektrone nizke energije, ki največ prispevajo k polarizaciji, je učinkovitost zbiranja skoraj 80-odstotna. Pri vseh modifikacijah je treba upoštevati, da zunanje magnetno polje SEM objektivne leče pri majhnih delovnih razdaljah lahko vpliva na polarizirane elektrone in zato ne sme presegati 795,7 A/m. Če želimo dobiti izredno visoko ločljivost, mora biti zunanje polje $< 79,57$ A/m.

2.5 Analizator spinske polarizacije

Fizikalna osnova delovanja večine detektorjev spinske polarizacije je spinsko-orbitalna interakcija elektronov, ki nastane pri procesu sipanja elektronov na atomih tarče. Asimetrija spina se kaže v različnem sipalnem preseku za elektrone s spinom, ki je paralelen oziroma antiparalelen s smerjo vektorja normale na ravnino sipanja (Mott, 1929)^(5,10). Tako se elektroni s spinom \uparrow in \downarrow sipajo v različne smeri. Sipalni presek za elektrone s spinsko polarizacijo P je podan z enačbo:

$$\sigma(\theta) = I(\theta)[1 + S(\theta) P \cdot n] \quad (4)$$

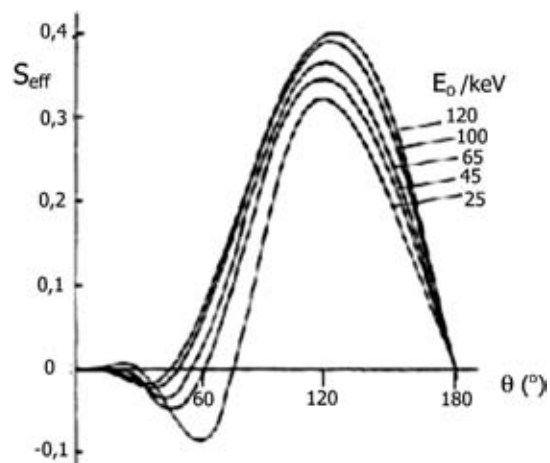
kjer je θ sipalni kot, $I(\theta)$ intenziteta sipanih elektronov brez vpliva spinsko-orbitalne interakcije in n enotni vektor, pravokoten na ravnino sipanja⁽¹¹⁾.

$S(\theta)$ je Shermanova funkcija, ki je odvisna od atomskega števila Z materiala tarče, energije vpadnih elektronov E_0 in sipalnega kota θ (slika 9). Asimetrijo (A) polarizacije (P) detektiramo pravokotno na smer polarizacije in na smer vpadnih elektronov. Za vsako komponento polarizacije izmerimo število sipanih elektronov desno (N_R) in levo (N_L) od določene smeri. Izmerjena asimetrija sipanja je tako

$$A = (N_L - N_R)/(N_L + N_R) \quad (5)$$

Povezava med A in P je podana z

$$A = S_{\text{eff}} \cdot P \quad (6)$$



Slika 9: Vrednosti Shermanove funkcije S_{eff} v odvisnosti od energije vpadnih elektronov E_0 in sipalnega kota θ .

kjer je S_{eff} efektivna Shermanova funkcija, ki je v bistvu merilo za spinsko občutljivost polarimetra. Značilne vrednosti za S_{eff} so $< 0,3$.

Asimetrija sipanja narašča z energijo elektronov. Največjo asimetrijo izmerimo, ko je detektor postavljen v smeri kota povratnega sipanja $\theta = 120^\circ$.

Učinkovitost polarimetra (*figure-of-merit*) ocenimo iz enačbe:

$$F_{\text{om}} = (I/I_0) \cdot (S_{\text{eff}})^2 \quad (7)$$

kjer je I_0 tok elektronov, ki vstopijo v polarimeter, I je tok sipanih elektronov, izmerjen z levim in desnim detektorjem oziroma celotno število sipanih elektronov v časovni enoti t : $(N_L + N_R)/t$. Razmerje I/I_0 je manjše od 10^{-2} . Učinkovitost polarimetra je tako okoli 10^{-4} . To pomeni, da samo 1/10000 del emitiranih sekundarnih elektronov prispeva k magnetnem kontrastu, ki ga merimo s spinsko polarizacijo.

V polarimetrih z Mottovim detektorjem se elektroni pospešujejo do visokih energij (od 50 keV do 100 keV) in sipajo na tarči iz težkega elementa, kot je npr. tanka zlata folija. Drugi detektorji (LEED in LEDS) uporabljajo isti princip delovanja toda s sipanjem elektronov nizkih energij, npr. od 100 eV do 200 eV.

Princip delovanja konvencionalnega spinskega Mottovega detektorja je prikazan na sliki 10a. Po sipanju na Au-tarči elektrone detektiramo s štirimi detektorji A, B, C, D, ki so postavljeni simetrično in pod optimalnim kotom 120° . Ko je rotator spina izklopljen, izmerimo komponento polarizacije P_x iz razlike (asimetrije) števila detektiranih elektronov z detektorji A in B. Na enak način izmerimo P_y iz razlike signalov detektorjev C in D. Z vklopljenim

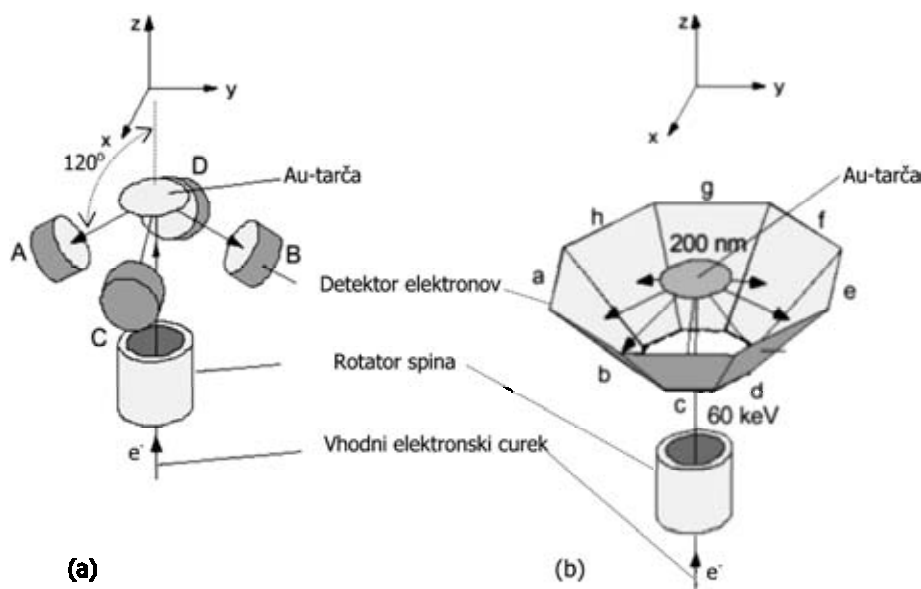
rotatorjem spina se vektor polarizacije obrne za 90° okoli x -osi in se komponenta P_z transformira v P_y . Tako izmerimo komponento P_z enako kot P_y . Novejša izvedba detektorja z visoko učinkovitostjo (slika 10b) je nastala na osnovi rezultatov sistematičnih raziskav spinske odvisnosti sipanja elektronov ^(7,8).

Komponento P_x izmerimo iz razlike signalov, izmerjenih na detektorjih d, e, f in h, a, b. P_y določimo iz razlike signalov, izmerjenih na detektorjih b, c, d in f, g, h. Z vklopljenim rotatorjem spina izmerimo komponento P_z na način, opisan kot v primeru konfiguracije (a). Dodatna prednost detektorja na sliki 10b je, da detektorje b, d, f in h uporabimo za določanje obeh komponent polarizacije P_x in P_y . Debelina zlata tarče je 200 nm in energija vhodnih elektronov 60 keV. Učinkovitost novega detektorja je več kot 5-krat višja od konvencionalnega. Slika 11a prikazuje skico zgradbe Mottovega spinskega polarimetra v prečnem prerezu. Zaradi visoke napetosti je treba zagotoviti dobro električno izolacijo med ohišjem in električnim delom polarimetra ter ustrezno vakuumsko tesnjenje.

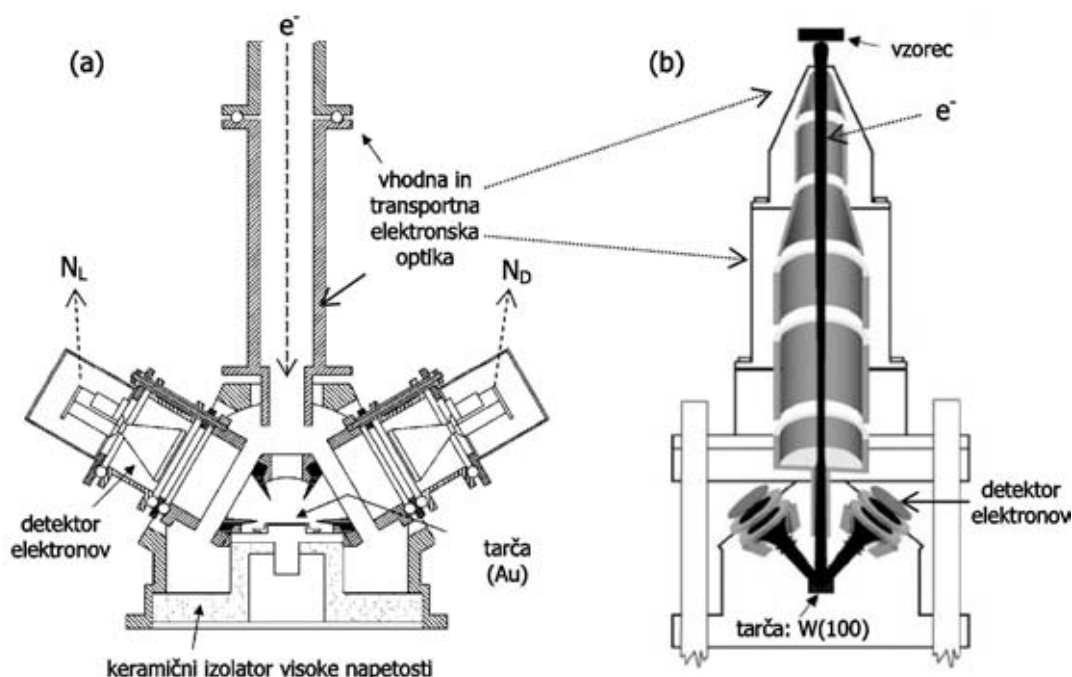
V obeh primerih je prikazana samo ena kolona polarimetra z enim parom detektorjev za merjenje določene komponente polarizacije. Druga kolona je postavljena v ravnini, ki leži pravokotno na ravnino slike.

V primerjavi z Mottovim polarimetrom, polarimeter z LEED-detekcijo (slika 11b) deluje pri nizki kinetični energiji elektronov (100–200 eV) in ne potrebuje posebne električne izolacije.

Vsak tip polarimetra ima določene prednosti in pomanjkljivosti. Tradicionalni Mottov analizator ima



Slika 10: (a) Princip spinskega detektorja. Polarizirani elektroni se sipajo na tarči (Au). Število sipanih elektronov izmerimo z detektorji A, B, C in D, ki so postavljeni simetrično glede na smer vpadnih elektronov ter določimo komponente polarizacije P_x , P_y in P_z oziroma vektor polarizacije \mathbf{P} . (b) Zgradba novega detektorja z izboljšano učinkovitostjo (F_{om}). Polarni kot detekcije sipanih elektronov je od 90° do 160° . Trapezoidni elektronski detektorji (8x, a-h) so postavljeni skupaj in brez praznega prostora med njimi.



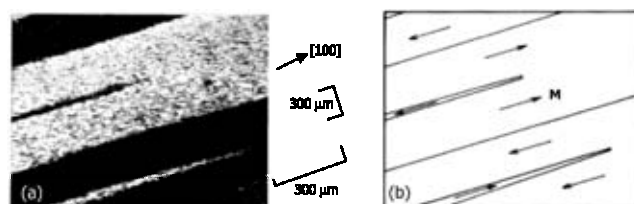
Slika 11: (a) Prečni preiz zgradbe Mottovega polarimetra z Au-tarčo za sipanje visokoenergijskih elektronov. (b) Načrt polarimetra na osnovi LEED (slika 8). Tarča za sipanje nizkoenergijskih elektronov je monokristal volframa v orientaciji (100).

večje vrednosti S_{eff} v primerjavi z LEDS in LEED, medtem ko je njihova učinkovitost F_{om} primerljiva. Ker deluje pri visokih energijah vhodnih elektronov, je manj občutljiv za asimetrijo elektronske optike polarimetra. Analizatorji, ki uporabljajo elektrone nizkih energij, so bolj občutljivi za asimetrije aparature in zato potrebujejo skrbno načrtovanje ter natančno izdelavo transportne elektronske optike. Čeprav so Mottovi analizatorji po dimenzijah večji in jih težje integriramo s SEM-kolono, ki se precej uspešno uporablja v napravah SEMPA. Prav tako se zelo uspešno uporabljajo LEED-analizatorji. Izboljšano učinkovitost LEED-detektorja pridobimo, ko za difrakcijo elektronov uporabljamo monokristal W(100). LEED-izvedbe so kompaktne in manjših dimenzij, toda z učinkovitostjo F_{om} , ki je primerljiva z Mottovimi analizatorji.

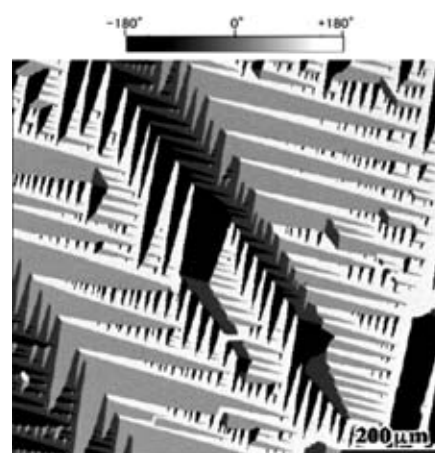
3 PRIMERI UPORABE SEMPA

Slika 12 prikazuje enega "pionirskih" posnetkov (Koike, 1984) domenske strukture na površini Fe-vzorca v orientaciji (001), ki je bil narejen na eni od prvih naprav SEMPA⁽³⁾. Premer elektronskega curka je bil 10 μm , tok 10 nA, energija 10 keV in delovna razdalja 50 mm. Uporabljen je bil polarimeter na osnovi Mottovega detektorja.

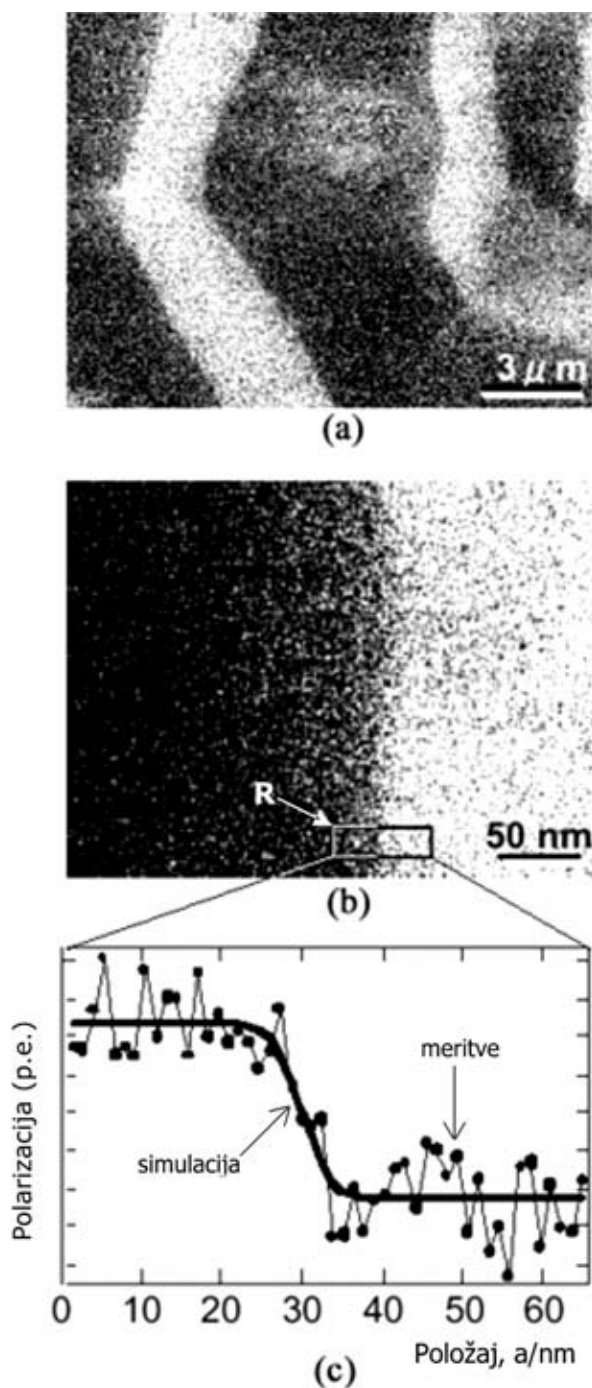
Značilnost prvih posnetkov s SEMPA je majhna ločljivost ($\geq 10 \mu\text{m}$), majhna učinkovitost polarimetra, majhno razmerje signal-šum in slaba kvaliteta slike. Razvoj in izboljšave metode so razvidne iz novejših



Slika 12: (a) Slika prikazuje magnetni kontrast na osnovi spinske polarizacije sekundarnih elektronov na površini vzorca Fe (100). Čas snemanja je bil 5 min. Povprečno število detektiranih elektronov N_R in N_L je bilo okoli $3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Spinska polarizacija na svetlem področju je bila -13% in na temnem področju $+13 \%$. Slika (b) prikazuje rekonstrukcijo domenske strukture in smeri vektorja magnetizacije na svetlem oziroma temnem področju.



Slika 13: Izmerjene komponente polarizacije uporabljamo kot signal za ponazoritev magnetne domenske strukture. Smer vektorja polarizacije izračunamo iz treh komponent (P_x, P_y, P_z) in ga lahko predstavimo prek različnih svin, različnih barv, s puščicami itd.



Slika 14: (a) Posnetek magnetne domenske strukture vzorca SmCo_5 pri majhni povečavi. Temna in svetla področja sta domeni z nasprotno usmerjeno magnetizacijo. Razvidne so ostre meje med domenami.

(b) Posnetek pri veliki povečavi prikazuje visoko ločljivost, ki je bila dosežena z uporabo novega kolektorja sekundarnih elektronov, z novo zgradbo Mottovega detektorja in z uporabo FEG-SEM-kolone v ultravisokem vakuumu.

Širina področja, na katerem polarizacija spreminja smer, je bila ocenjena iz meritev vzdolž linije, označene s pravokotnikom R na sliki (b). Izmerjene vrednosti polarizacije so bile integrirane v smeri navpično na pravokotnik, v kateri leži tudi domenska stena.

Rezultat integracije je prikazan s črnimi krožci na sliki (c). Izmerjeni profil vključuje tudi vpliv fluktuacij toka primarnega elektronskega curka. Slika (c) jasno prikazuje, da se izmerjena spinska polarizacija izrazito spreminja na območju 10 nm.

posnetkov (slika 13 in 14) istega avtorja (Koike, 2001)^(7,8).

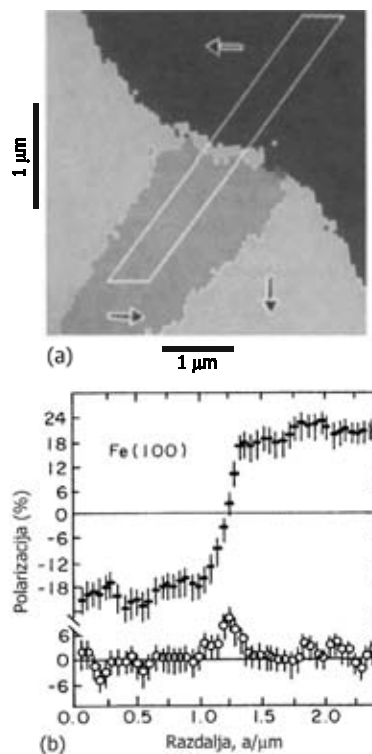
Slika prikazuje magnetno domensko strukturo vzorca Fe (001), kjer je smer magnetizacije predstavljena z različnimi svinami (marker zgoraj).

Sivina v centru markerja predstavlja smer magnetizacije "naravnost", svetlo siva smer "levo" in temno siva smer "desno".

Linija na sliki (c) predstavlja rezultate simulacije profila čez domensko steno.

Lateralna ločljivost je bila določena iz simulacije oziroma izračuna polarizacijskega linijskega profila čez domensko steno⁽⁸⁾ ter primerjave z eksperimentalnimi meritvami (slika 3c). Analiza spinske polarizacije čez domensko steno pri vzorcu SmCo_5 je pokazala, da je učinkovita ločljivost novega instrumenta SEMPA okoli 5 nm.

Naslednji primer (slika 15) je visokoločljivostni posnetek strukture domenske stene na površini monokristala Fe v orientaciji (100)⁽¹²⁾. Vzorec je bil mehansko poliran ter pregrevan 20 min pri temperaturi $\sim 760^\circ\text{C}$ za popuščanje mehanskih napetosti. Pred začetkom preiskav SEMPA je bila površina vzorca očiščena v UHV-komori z ionskim jedkanjem v plazmi ionov Ar^{2+} z energijo 2 keV. Spinska polarizacija elektronov je bila izmerjena z LEED-polarimetrom z difrakcijo na kristalu W(001). Izmerjeni

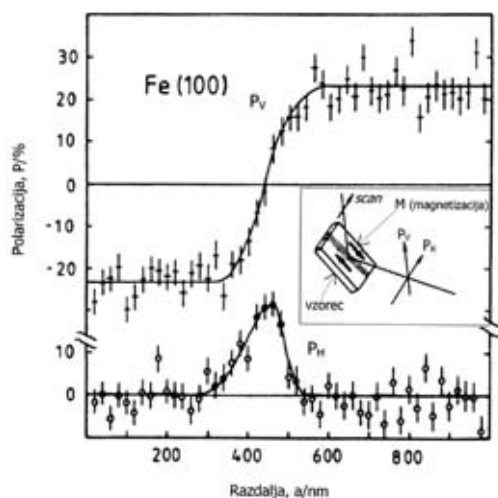


Slika 15: (a) Površinska struktura magnetnih domen pri Fe(100). Puščice kažejo izmerjene smeri polarizacije na domenah, ki določajo barvo na sliki. Okvir na sliki pomeni področje, iz katerega so izračunane povprečne vrednosti polarizacije, ki so prikazane na sliki (b).

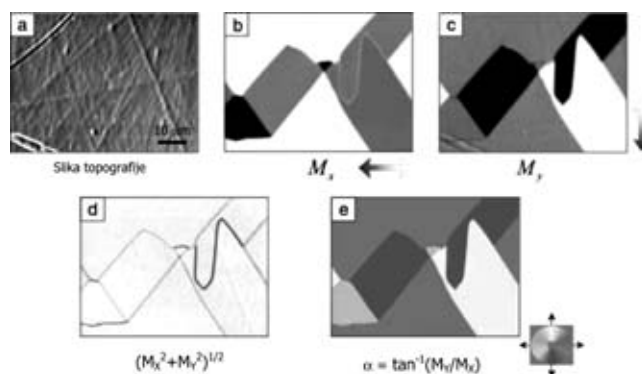
polarizacijski kontrast med različno namagnetenimi domeni je bil $\pm 24\%$.

Slika (b) prikazuje porazdelitev polarizacije čez domensko steno med področji z nasprotno usmerjenimi magnetizacijami (180-stopinjska domenska stena). Vertikalna komponenta polarizacije (P_V) je označena s križci in horizontalna (P_H) s krožci – P_H leži v ravnini slike (a). Dolžina koraka med posameznimi točkami linijske profilne analize je bila 50 nm. Odkloni kažejo 1σ statistično napako meritev, ki so bile narejene vzdolž 10 linij vzporedno z daljšim robom okvirja, narisane na sliki (a) ⁽¹²⁾.

Vertikalna komponenta polarizacije se zvezno spreminja med domenami od negativne do pozitivne vrednosti, kar potrjuje obstoj dveh domen z nasprotno usmerjenimi magnetizacijami (180°). Na presečišču, kjer je $P=0$, ima komponenta P_H maksimum. To neposredno potrjuje, da na površini vzorca 180-stopinjska stena ni Blochovega tipa, za katero namreč velja, da je P_H enaka nič čez celo domensko steno. Za bolj natančno preiskavo domenske stene je bila narejena linijska profilna analiza z visoko ločljivostjo in s korakom 20 nm med točkami (slika 16). Iz grafa odvisnosti komponente P_H od razdalje je bila ocenjena lateralna magnetna ločljivost na ≤ 40 nm. Zaradi izredno visoke ločljivosti opazimo izrazito povečanje vrednosti maksimuma P_H , ki ima (upoštevajoč statistično napako meritev) enako vrednost kot komponenta P_V pri zasičenju. Rezultati jasno kažejo, da 180-stopinjska domenska stena na površini monokristala Fe(100) ni Blochovega tipa. Znotraj domenske stene nastane rotacija vektorja magnetizacije na površini vzorca oziroma v ravnini, ki je navpična (vertikalna) na ravnino domenske stene. 180-stopinjska Blochova stena iz masivnega vzorca se na površini Fe(100) konča kot struktura Néelovega tipa. Ocenjena debelina domenske stene je bila (210 ± 40) nm.



Slika 16: Linijska profilna analiza visoke ločljivosti čez domensko steno 180° (nasprotno usmerjeni magnetizaciji, slika 15a). Vstavljen slika prikazuje orientacijo osi za detekcijo komponent polarizacije P_V in P_H glede na orientacijo vzorca.

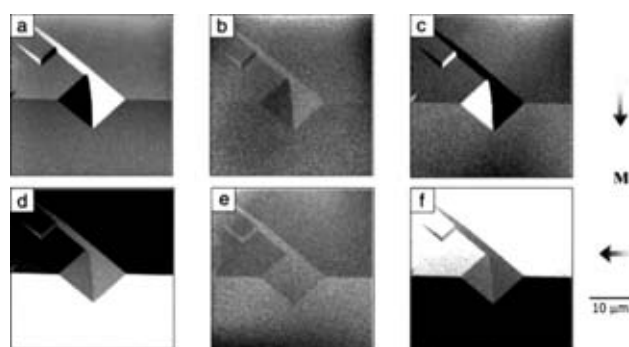


Slika 17: Posnetki SEMPA monokristala Fe-3 % Si. (a) Topografska slika površine; (b) Polarizacijska slika, kjer so različne sive proporcionalne komponenti magnetizacije M_X v smeri x ; (c) Podobna slika za komponentno M_Y ; (d) Slika intenzitete vektorja magnetizacije $|\mathbf{M}| = (M_X^2 + M_Y^2)^{1/2}$; (e) Slika prikazuje kot α vektorja površinske magnetizacije, ki je enak $\arctan(M_Y/M_X)$ in določa smer \mathbf{M} na površini vzorca.

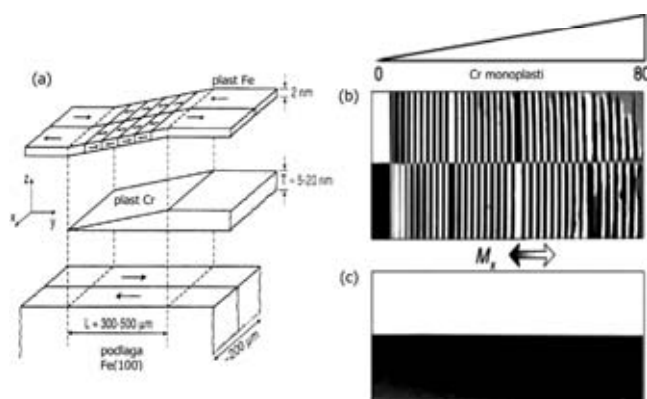
Slika 17 prikazuje domensko strukturo na površini monokristala Fe-3 % Si ⁽²⁾. V napravi SEMPA so bile istočasno posnete slike topografije vzorca (kot v SEM) ter dveh komponent magnetizacije M_X in M_Y . Na sliki za komponento M_X bela področja pomenijo smer magnetizacije v desno, črna pa smer v levo. Vmesna siva področja ustrezajo magnetizaciji v y -smeri. Tako pri sliki M_Y belo področje pomeni smer navzgor, črno pa navzdol. Intenziteta vektorja površinske magnetizacije na vzorcu je enakomerna in se lahko izračuna iz $|\mathbf{M}| = (M_X^2 + M_Y^2)^{1/2}$.

Primer na sliki 18 prikazuje zmogljivost in učinkovitost metode SEMPA pri opazovanju domen feromagnetnih tankih plasti, ki so medsebojno ločene z nemagnetnimi plastmi ⁽²⁾.

Triplastna struktura Fe/Cr/Fe je bila narejena z nanosom 1 nm debele plasti Cr na čisto rezino monokristala Fe(001) ter z nanosom 2 nm debele plasti Fe



Slika 18: Posnetki SEMPA komponent površinske magnetizacije na različnih plasteh triplastne strukture Fe/Cr/Fe. (a) Slika prikazuje komponento magnetizacije M_Y domenske strukture na podlagi iz Fe-rezine (whisker). (b) Isto področje po nanosu 1 nm debele nemagnetne plasti Cr. (c) Isto področje po nanosu 2 nm debele plasti Fe in formiranju triplastne Fe/Cr/Fe-strukture. Posnetki jasno prikazujejo nasprotni smeri magnetizacije med (a) in (c); (d-f) posnetki komponente magnetizacije M_X za enake pogoje, kot so opisani pri slikah (a-c).



Slika 19: (a) Skica geometrije "klinaste" strukture Fe/Cr/Fe za analizo SEMPA. Podlaga je rezina monokristala Fe(100) z dvema nasprotno usmerjenima domenama. Debelina Cr-plasti narašča približno za 10 nm na dolžini ~ 1 mm. Z epitaksijo je bilo nanoseno 80 monoplasti Cr. Plast Fe na površini je debela 2 nm. (b) Komponenta M_x spreminja smer magnetizacije v Fe-plasti z naraščanjem debeline Cr plasti po nanosu vsake monoplasti Cr. (c) Posnetek SEMPA magnetizacije (M_x) čiste Fe-podlage.

na plast Cr. SEMPA prikazujejo zanimivo domensko strukturo Fe-podlage. Sendvična struktura prikazuje inverzijo oziroma nasprotno (antiparalelno oz. anti-feromagnetno) usmerjenost vsake komponente magnetizacije glede na Fe-podlago. Sklopitev magnetizacije v tankih feromagnetnih plasteh, ki so razdeljene z nemagnetno plastjo Cr, je lahko feromagnetna ali anti-feromagnetna glede na magnetno strukturo podlage in je odvisna od debeline plasti Cr ⁽¹³⁾.

Tabela 1: Pregled in značilnosti metod za preiskave magnetnih struktur ⁽²⁾.

	Lorentzova mikroskopija (TEM)						
	SEMPA	MFM	Magneto-optična	Fresnel, Foucault	DPC	Holografija	XMCD
Vir kontrasta	M	$\nabla \mathbf{B}$	M	$\nabla \times \mathbf{B}$	B	B, Φ_B	M
Ločljivost (nm)							
najboljša	~ 10	40	300	~ 10	~ 2	~ 5	300
tipična	100	100	1000	50	20	20	500
Informacijska globina (nm)	1–2	20–500	20	debelina vzorca (≥ 150 nm)	2–20		
Čas zajemanja slike	1–100 min	5–30 min	10 ns–1 s	0,04–30 s	5–50 s	0,03–10 s	0,03 s do 10 min
Zun. magn. polje (A/m)	< 1	< 800	brez omejitev	< 500 (vert.) < 100 (horiz.)	< 100	< 1	
Izolatorji	ne	da	da	ne	ne	ne	ne
Vakuuum	UHV	ne	ne	HV	HV	HV	UHV
Topografsko-kristalografska občutljivost	nizka	visoka	visoka	srednja	srednja	srednja	nizka
Posebne zahteve za vzorce	čista površina	ravna in gladka površina	ravna in gladka površina	tanki vzorci ($= 150$ nm)			

MFM: mikroskopija na magnetno silo (Magnetic Force Microscopy)

Magnetooptična: Kerrov ali Faradayev efekt interakcije polarizirane svetlobe z magnetizacijo vzorca

Lorentz/TEM: različice Lorentzove mikroskopije v presevnem elektronskem mikroskopu (TEM)

DPC: mikroskopija diferencialnega faznega kontrasta (Differential Phase Contrast)

XMCD: efekt odvisnosti absorpcije polarizirane rentgenske svetlobe od magnetizacije (X-ray Magnetic Circular Dichroism); metoda uporablja sinhrotronsko svetlobo

M – magnetizacija; **B** – magnetna indukcija; Φ_B – magnetni fluks

Naslednji primer (slika 19) prikazuje rezultate podrobnih preiskav SEMPA sklopitve magnetizacije v tankih plasteh Fe v odvisnosti od debeline plasti Cr. Za ta namen je bila narejena posebna Cr-plast s strukturo "klinaste" oblike med Fe-podlago in 2 nm debelo plastjo Fe na površini (slika 19a) ⁽¹⁴⁾.

Debelina plasti Cr in Fe je bila izmerjena zelo natančno z uporabo metode RHEED (difrakcija elektronov z visoko energijo). Na začetku je magnetizacija v 2 nm debeli plasti Fe (slika 19b) sklopljena feromagnetno (v isti smeri) z magnetizacijo podlage vse do debeline Cr-plasti, ki ustreza štirim monoplastem Cr. Po vsakem naslednjem nanosu magnetizacija izmenično spremeni smer. Izmeničnost se nadaljuje do debeline 24 monoplasti. Naslednja sprememba v magnetizaciji Fe nastane, ko Cr-plast naraste za dve monoplasti. Ta fazni premik se pojavlja še pri debelini 44 in 64 Cr-monoplasti in je posledica majhne inkomenzurabilnosti med periodo izmenjevanja magnetizacije ($2,105 \pm 0,005$ monoplasti Cr) in mrežno razdaljo ^(2,14).

4 PRIMERJAVA METOD ZA PREISKAVE MAGNETNIH STRUKTUR

Kratek primerjalni pregled osnovnih značilnosti metod za preiskovanje oziroma opazovanje magnetnih struktur (domen) je podan v tabeli 1.

5 SKLEP

Osnovne značilnosti metode SEMPA so visoka ločljivost, površinska občutljivost, možnost kvantitativnega določanja smeri magnetizacije ter istočasna analiza topografije in magnetizacije pri preiskovanem vzorcu.

Metodo SEMPA uporabljamo za preiskave površinske magnetizacije tako masivnih vzorcev kot tudi tankih plasti. Opazujemo lahko magnetne strukture različnih velikosti: relativno velike feromagnete domenske strukture ($>10\ \mu\text{m}$), domenske stene ($\sim 200\ \text{nm}$) in fine strukture ($<50\ \text{nm}$), kot so različne magnetne singularnosti.

S tehnološkega vidika je metoda primerna za preiskave širokega spektra magnetnih materialov: od amorfnih in kristaliničnih mehkih feromagnetov do naprav za magnetno shranjevanje podatkov z visoko gostoto zapisa.

6 LITERATURA

1. "Magnetic Materials", University of Birmingham, UK http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic_materials

2. "Magnetic Domain Imaging of Spintronic Devices", NIST, Gaithersburg, MD, USA <http://physics.nist.gov/Divisions/Div841/Gp3/Pubs/pdf/epg698.pdf>
3. K. Koike, K. Hayakawa, Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) L187
4. R. Allenspach, IBM, J. Res. Develop., 44 (2000) 4
5. J. Unguris, M. R. Scheinfein, M. H. Kelley, A. Gavrin, R. J. Celotta, D. T. Pierce, <http://physics.nist.gov/Divisions/Div841/Gp3/Pubs/pdf/epg666.pdf>
6. C. T. Chen, Y. U. Idzerda, H.-J. Lin, N. V. Smith, G. Meigs, E. Chaban, G. H. Ho, E. Pellegrin, F. Sette, Phys. Rev. Lett., 75 (1995), 152
7. "Spin Measurement Team", National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Correlated Electron Research Center (CERC), Tsukuba, Japan http://unit.aist.go.jp/cerc/rep2001/rep_2001_spinE.html
8. T. Kohashi, K. Koike, Jpn. J. Appl. Phys., 40 (2001) L1264
9. R. Froemter, H. P. Oepen, J. Kirshner, Appl. Phys. A 76, (2003), p. 869–971
10. "Mott Scattering", <http://srs.dl.ac.uk/XUV-VUV/science/mott.html>
11. D. J. Huang, W. P. Wu, J. Chen, C. F. Chang, S. C. Chung, M. Yuri, H.-J. Lin, P. D. Johnson, C. T. Chen, "Performance of a Mott detector for undulator-based spin-resolved spectroscopy", Review of Scientific Instruments, 73(2002)11, 3778-3783
12. H. P. Oepen, J. Kirshner, Phys. Rev. Lett., 62(1989)7, 819
13. P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, Phys. Rev. Lett., 57(1986)19, 2442
14. J. Unguris, R. J. Celotta, D. T. Pierce, Phys. Rev. Lett., 67(1991)1, 40

VAKUUMSKI TEČAJ

OBVESTILO O TEČAJU OSNOVE VAKUUMSKE TEHNIKE ZA MLADE RAZISKOVALCE

V četrtek in petek, 8. in 9. januarja 2009, organizira Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije – DVTS dvodnevni tečaj iz Osnov vakuumске tehnike za mlade raziskovalce. Tečaj bo potekal na Institutu "Jožef Stefan" v Ljubljani, deloma pa tudi na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije. Obsegal bo teoretični in praktični del. Cena tečaja je 400 EUR (brez DDV). V ceni je všteta literatura (knjiga Vakuumska znanost in tehnika) in dve kosili.

Več o tečaju lahko preberete na društvenih straneh: <http://www.dvts.si>.

Na tečaj se prijavite dr. Janezu Kovaču na elektronski naslov: janez.kovac@ijs.si.

Vabljeni.

dr. Janez Kovač, tajnik DVTS
 Institut "Jožef Stefan"
 Jamova 39
 1000 Ljubljana
 tel. (01) 477 3403
 e-pošta: janez.kovac@ijs.si

OSEMDESETLETNICA TELEVIZIJSKEGA PATENTA LJUBLJANČANA CODELLIJA

Stanislav Južnič

AMNIM, d. o. o., Gorazdova 3, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Pred osmimi desetletji je Codelli začel v evropskih državah patentirati svoj televizijski sistem s spiralnim skeniranjem. Kmalu je ugotovil prednosti ameriških in način z vakuumskimi elektronkami, zato jih je vgradil v svojo zamisel. Žal se mu je medtem nova nemška oblast dovolj zamerila, da je izgubil gmotno podporo podjetja Telefunken. Kljub posesti na ljubljanskem Kodeljevem z lastnimi sredstvi ni mogel zmagati v patentnih bojih z ameriški tekmeci.

80th anniversary of the television patent by Codelli from Ljubljana

ABSTRACT

Eighty years ago, Codelli started patenting his television system with the spiral scanning all over Europe. During the patent procedures in Europe and North America, he found the advantages of American cathode tubes system, and adapted them for his system. In between, he disliked the Nazi regime and consequently lost the support of Berlin Telefunken enterprise. He was a wealthy proprietor at Ljubljana Kodeljevo district, but his property was far from enough for successful dealing with the American competitors.

UVOD

Vzporedno ob Nardinu in drugih izumiteljih, povezanih z Univerzo v Ljubljani, se je naša prestolnica v zgodnji dobi razvoja televizije ponašala še z drugimi snovalci tehniških novotarij. Med njimi je prednjačil Ljubljčan baron Anton Codelli, ki je bil rojen v Neaplju v kranjski plemiški družini italijanskega rodu. Po šolanju v Ljubljani in na Dunaju je leta 1906 opravil šestmesečni strokovni tehniški tečaj pri Telefunku v Berlinu kot uvod v tri desetletja plodnega sodelovanja s tem vodilnim berlinskim podjetjem.

Od leta 1907 je sodeloval z grofom Arcom, ki je bil rojen v Zgornji Šleziji. S Codellijem ga ni družila zgolj tehniška izumiteljska žilica, temveč tudi način življenja visokega plemstva v dobi zatona nekdanje veličine.

CODELLIJEVE PREDVOJNE IDEJE

Dne 12. 1. 1908 je Codelli opisal skeniranje televizijske slike z zrcali Wehneltovega valja z uporabo selenovih celic in prosil Telefunken za podporo. Tehnični direktor Telefunka, grof Arco, se je posvetoval s sodelavcem J. Schoemlichom in dne 28. 1. 1908 odgovoril, da je selen premalo občutljiv za svetlobo. Ne bi mogel slediti hitrim spremembam svetilnosti, zato bi dobili neostro sliko.¹

¹ Grof Georg Wilh. Alex. Hans Arco (1869–1940), Pismo Codelliju iz Berlina v Ljubljano, 28. 1. 1908, 4 stran; Pismo Codelliju iz Berlina na Dunaj, 23. 4. 1908, 3 (Codelli, šk. 20); Telefunknovo pismo dr. Schapiru, 15. 9. 1930, 2 strani (Codelli, šk. 19, prevod v: Dokumenti Slovenskega gledališkega muzeja, Ljubljana 13 (1977) št. 29, 120).

² Arco, pismo 12. 1. 1908 (Codelli, šk. 19).

³ Dokumenti Slovenskega gledališkega muzeja (Ljubljana) 13 (1977) št. 29, 119.

⁴ Schröter, 1930.

⁵ Codelli, 1930, 110–111; Grabnar, 1977, 112; Weiller, 1889, 334.

⁶ Ardenne, 1932, 18.

Codelli je po Arcu obveščal Telefunken o možnostih za prodor berlinskih kondenzatorjev namesto avstrijskih Sveticsovih na habsburško tržišče in še posebej v mornarico. Dogovarjal se je za sodelovanje s podružnico podjetja Siemens & Halske na Dunaju, ki je bila tesno povezana s Telefunkom.² Dne 23. 4. 1908 je Arco Codelliju poslal najnovejši Loewejev izum ojačanja fotografskih posnetkov in Schoemlichov sistem hkratnega branja in fotografiranja. Codelli se mu je za poslane fotografske pripomočke zahvalil v naslednjem pismu.³

CODELLI RAZVIJA TELEVIZIJSKI SISTEM PO VRNITVI IZ AFRIKE

Svoja raziskovanja televizije je Codelli nadaljeval na Arcovo spodbudo dne 14. 12. 1927, potem ko je končal kopico nevarnih afriških dogodivščin. Sodeloval je s Schröterjem, direktorjem raziskovalnega oddelka Telefunka v Berlinu med letoma 1920 in 1947, ki je že pred 1. svetovno vojno delal poskuse s katodnim sevanjem v tlivki. V prvi strokovni razpravi pravkar ustanovljene revije *Fernsehen* je Schröter za skeniranje slike predložil katodno elektronko s tlakom argona stotinko ali tisočinko milibara.⁴ V istem zvezku revije *Fernsehen* je Codelli predstavil svojo televizijo,⁵ ki je med mehanskimi sistemi edina točno prenašala sliko skenirano vzdolž spirale.⁶ S tem si je ljubljanski izumitelj naredil ime v podporo že pridobljenim patentom.

Schröter je 27. 9. 1930 prijavil patent predvajanja slik z zaporednim menjavanjem sodih in lihih vrstic, ki so ga v Nemčiji priznali 23. 3. 1933. Skupaj s Knollom je raziskoval prenos elektronskih slik v Telefunknovem televizijskem laboratoriju v Berlinu; objavil je več knjig in zbornikov o televiziji.

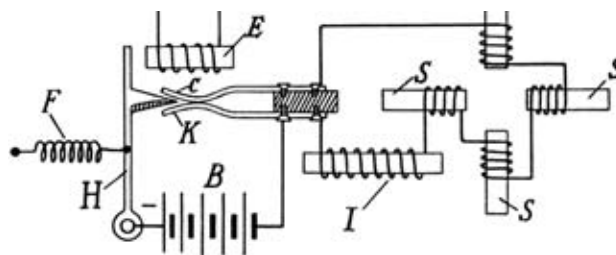
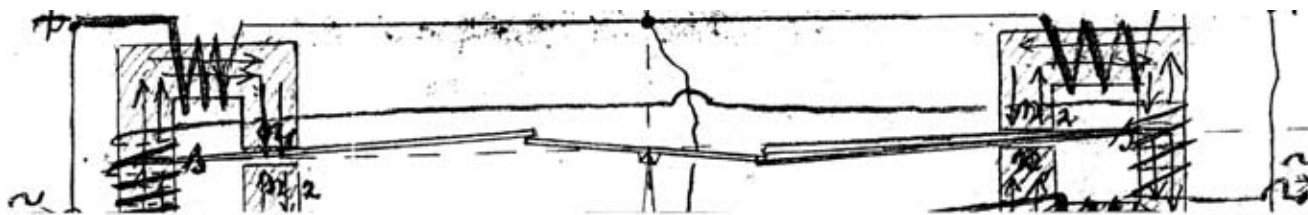
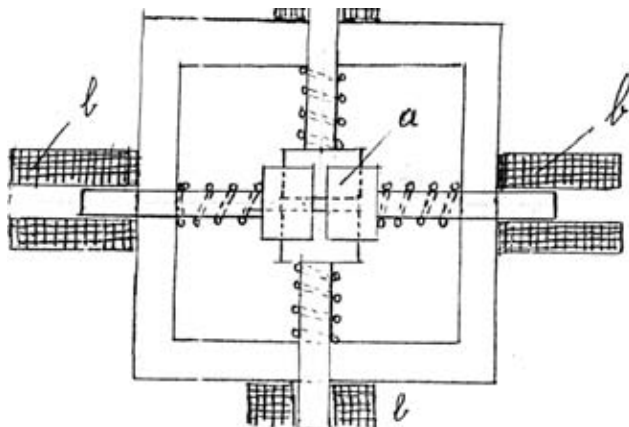


Abb. 7
Schaltungsschema des Gleichstromunterbrechers am Empfänger
Slika 1: Sedma skica sprejemnika pri enosmernem toku iz Codellijeve objave (Codelli, 1930. Ein neues Fernseh-System. *Fernsehen*. 1/št. 3, str. 107–114, tu str. 113).



Slika 2: Skica televizijskega sistema iz Codellijevega pisma Schröterju 14. 11. 1928 (Arhiv Republike Slovenije, Graščinski arhivi, Turn pri Ljubljani, škatla 19)



Slika 3: Skica televizijskega sistema iz Codellijevega pisma Schröterju 14. 11. 1928 (Arhiv Republike Slovenije, Graščinski arhivi, Turn pri Ljubljani, škatla 19)

Codelli je svoj izum patentiral 18. 5. 1928 v Nemčiji.⁷ Dne 14. 11. 1928 je poslal Schröterju opis svoje televizije s Kerrovo celico podobno kot v sistemu Karolusa. S Codellijevo pomočjo so napravo sestavili v Berlinu v šestih mesecih. Dne 22. 6. 1929 je direktor dr. Karel Schapira pri Telefunku izdal laboratorijsko potrdilo o izdelavi prototipa televizije po Codellijevem patentu, za katerega je bilo odobreno 25 300 mark, od tega 13 000 za odškodnino Codelliju in za njegovo potovanje v Berlin. Končna cena naprave je bila skoraj dvakrat višja,⁸ Codelliju pa je vsaj začasno padla sekira v med.

CODELLI S KATODNO ELEKTRONKO

Codelli je med Slovenci prvi uporabil katodno elektronko za televizijo. V njegovi zapuščini so številne kopije tujih patentov, iz katerih je dodobra razbral, kam "pes taco moli" v ZDA.⁹ Zato sta tako Codelli kot Schröter v poznih 1920-ih letih začela za televizijo uporabljati katodne elektronke, ki so se najbolj posrečile Rusu Zworykinu v ZDA. Codelli je uporabil Farnsworthovi podobno Braunovo elektronko s fotokatodo¹⁰ in priredil svojo osnovno idejo snemanja in sprejemanja slike vzdolž spirale tako, da je imela slika gostejše elemente v sredi kot na robovih.¹¹ Sedaj bi seveda potreboval denar za izdelavo prototipa, kot mu ga je leta 1929 dal Telefunken za mehansko inačico naprave.

Do leta 1933 so Codellijevi poskusi patentiranja v ZDA pogoreli, prav tedaj pa so krmilo nemške države prevzel

nacionalisti, ki jih je naš neprevidni Ljubljčan preveč na glas kritiziral. Žal je imel sam dokaj petični Codelli premalo pod palcem, da bi lahko brez nemške podpore "zobal češnje" s televizijskimi tekmeci pri ameriški RCA. Večino kodeljevskih posesti je prodal, smetano izuma televizije pa so kljub temu pobrali Američani. Pri tem se je bržkone tolažil tako, da televizija ni bila njegov edini konjiček: vozil je prvi (in drugi) avto na slovenskih tleh, plačal snemanje prvega igranega filma v Afriki in zamenjal tri zakonske žene. Po vojni je bila graščina Turn ob Ljubljani nacionalizirana, Codelli je pa je že pred koncem vojne odšel v Švico. Zaenkrat še ne vemo, ali je tam gledal televizijo, ki ni sledila njegovim inovacijam.

SKLEP

Codellijevo nasprotovanje nacističnemu režimu v Nemčiji je botrovalo prekinitvi sodelovanja s Telefunkom. Brez Telefunka pa se Codelli ni mogel kosati z nastajajočo televizijsko industrijo v ZDA, čeprav je v zagati razprodal dobršen del svoje posesti na Kodeljevem. Od decembra 1995 je na njegovi nekdanji graščini Turn na Kodeljevem odkrita spominska plošča. Codellijevo spiralno skeniranje pravzaprav nikoli ni bilo uporabljeno v večjem industrijskem obsegu in morda še vedno čaka svojega inovatorja. Slovenskega?

LITERATURA IN OKRAJŠAVE

- Arcova pisma Codelliju iz Berlina v Ljubljano, 1908 (AS, Codelli, šk. 20).
- Ardenne. 1932. Über Helligkeitssteuerung bei Kathodenstrahlröhren. *Fernsehen*. 3.
- AS – Arhiv Republike Slovenije v Ljubljani.
- Codelli, Anton. 1930. Ein neues Fernseh-System, *Fernsehen*. 1/št. 3, 107–114.
- Grabnar, Boris. 1977. Nenavadni baron na Kodeljevem. *Dokumenti Slovenskega gledališkega muzeja*. Ljubljana. 13/št. 29.
- NUK – Narodna in univerzitetna knjižnica v Ljubljani.
- Schröter. 1930. Die Braunsche Röhre als Fernseher. *Fernsehen*. 1.
- Schröter. 1930. Aus der Entstehungsgeschichte der Glimmlampe. *Fernsehen*. 1.
- Telefunknovo pismo dr. Schapiru, 15. 9. 1930, 2 strani (AS, Codelli, šk. 19).
- Weiller, L. 1889. Sur la vision à distance par l'électricité. *Génie Civ.* Bd. 15: 570–573.

⁷ NUK, Rokopisni oddelek, sign. Ms 1397, III (155).

⁸ AS, Codelli, šk. 19; NUK, 141, Nr. 3458, Nr. 3408 III.

⁹ Grabnar, 1977, 112; Codelli, AS, šk. 19 in NUK, 134.

¹⁰ Codelli, AS, šk. 19, str. 11–12, 15, 16, 38 (75), 44 (77–78).

¹¹ Codelli, AS, šk. 19, str. 74–75, zahteva 45.

PRVIH 800 LET FRANČIŠKANSKEGA VAKUUMA ZA SLOVENCE (ob 800-letnici frančiškanskega reda v letu 2009)

Stanislav Južnič

Oddelek za zgodovino znanosti Univerze v Oklahomi, Norman, Oklahoma, ZDA

POVZETEK

Opisujemo pomembne frančiškanske vakuumiste na slovenskih tleh. Zanima nas raziskovanje vakuumu z ozemljem sodobne Slovenije povezanih frančiškanov, minoritov in kapucinov; osredinili smo se na knjige o vakuumu v frančiškanskih in kapucinskih knjižnicah. Med frančiškani in kapucini, ki so vplivali na razvoj raziskovanja vakuumu med Slovenci, opisujemo predvsem kapucina Magnija, ki si je nekaj časa celo lastil prvenstvo pri Torricellijevem poskusu, vsekakor pa ga je prvi opisal v tisku. Žal se je izkazalo, da ga je s Torricellijevim dosežkom seznanil minorit Mersenne, ki je bržkone vodil najbolj razvejeno znanstveno dopisovanje do tedaj, tudi z vodilnimi vakuumisti svoje dobe.

Pomembni kranjski predavatelj vakuumskih ved v okviru fizike je bil novomeški meteorolog B. Vovk. Prvi predstavljamo Vovkove vakuumске šolske poskuse kot krono mnogih stoletij frančiškanskih raziskovanj vakuumu med Slovenci.

First 800 years of Franciscan Vacuum Sciences for Slovenians (800th Anniversary of the Franciscan Order)

ABSTRACT

The most important Franciscan vacuum scientists connected with the modern Slovenian lands are described. The development of Franciscan and Capuchin libraries are put in the limelight. The Capuchin V. Magni first described Torricellian vacuum experiment in print. Somewhat later his Franciscan companion, Parisian Minorite Father Mersenne, proved that Magni learned about Torricellian success from Mersenne's report. Mersenne led huge correspondence with scientists and especially vacuum researchers all over Europe.

After March Revolution meteorologist B. Vovk lectured on vacuum sciences within his physics curriculum at Novo mesto high school. Vovk's vacuum related school experiments are presented for the first time as the peak of several centuries of their co-brothers efforts in Slovenian lands.

1 UVOD

Frančiškani so s Frančiškovim vodilom za zbiranje svetih spisov na častnih krajih močno vplivali na razvoj knjižnic med Slovenci in še posebej na branje prirodoslovnih knjig, povezanih z raziskovanjem vakuumu. Bili so in so še vedno najštevilnejši red na Slovenskem; pri nas so se uveljavili v vseh treh vejah: frančiškanski, minoritski in kapucinski. Mnogi naši učenjaki so se šolali pri njih in pogosto vstopali v njihove vrste. Kdo so bili frančiškanski vakuumisti na južnih obronkih Alp?

2 VAKUUM V KAMNIKU

Samostan v Kamniku, kjer so frančiškani vodili tudi osnovno, pozneje pa s Kostanjevica nad Gorico premeščeno nadaljevalno latinsko šolo – gimnazijo, hrani medicino slovitega Helmonta. Morda jo je nabavil prav sin slovitega "polihistorja" Janeza Vajkarda, kamniški gvardijan Donatus Valvasor, ki si je zanimanje za raziskovanje vakuumu izostril v očetovi knjižnici na Bogenšpergu?

J. Helmont je po skupinskem portretu s sinom in izdajateljem, Franciscom Mercuriusom van Helmontom, le-temu posvetil svoja posmrtno zbrana medicinska in kemijska dela ob koncu tridesetletne vojne. Opisal je štiri antične elemente, še posebej pa pline in naravo vakuumu s kritiko Aristotela vred.¹ Torricellijevega poskusa ni poznal, saj so ga postavili komaj v letu J. Helmontove smrti. Helmont je opisal magnetno silo² in zlasti Paracelsusa (Paracelz);³ sin izdajatelj je dodal še kopico prav posrečeno neverjetnih zgodb o učinkovitosti filozofskega kamna,⁴ za katere oče Helmont gotovo ne bi dal roke v ogenj.

Deželni glavar Volf Engelbert Turjaški seveda ni hotel zaostajati za kamniškimi frančiškani. Zato je za svojo ljubljansko knjižnico kupil isto Helmontovo delo v nekoliko starejši izdaji; k zbranim delom na osemstotih straneh je dal privezati nekaj sto listov Helmontovih dotlej neobjavljenih kritik zagovornikov Galena, opisov ognja, bolezni in predvsem kuge v štirih posebej paginiranih delih.

Po kamniškem frančiškanskem katalogu iz leta 1760 je medicina s kirurgijo, anatomijo in botaniko vred spadala v dvanajsto, filozofija z matematiko, meteorologijo in aritmetiko pa v deseto strokovno skupino;⁵ obe skupini sta vsebovali tudi knjige o vakuumu. Med medicinske knjige so uvrstili Levinusa Lemniusa, jezuitskega vakuumista Gasparja Schotta in Stahla; Newtonovo Optiko z dodatkom njegovih razprav, objavljenih v *Phil. Trans.*, so kupili v latinskem Clarkovem prevodu, izdanem pri graških jezuitih.⁶ Značilno je, da so poleg baronov Erbergov v slovenskem prostoru zgolj kamniški in novomeški

¹ Helmont, 1648, 83, 87.

² Helmont, 1648, 612–614.

³ Helmont, 1648, 785, 787.

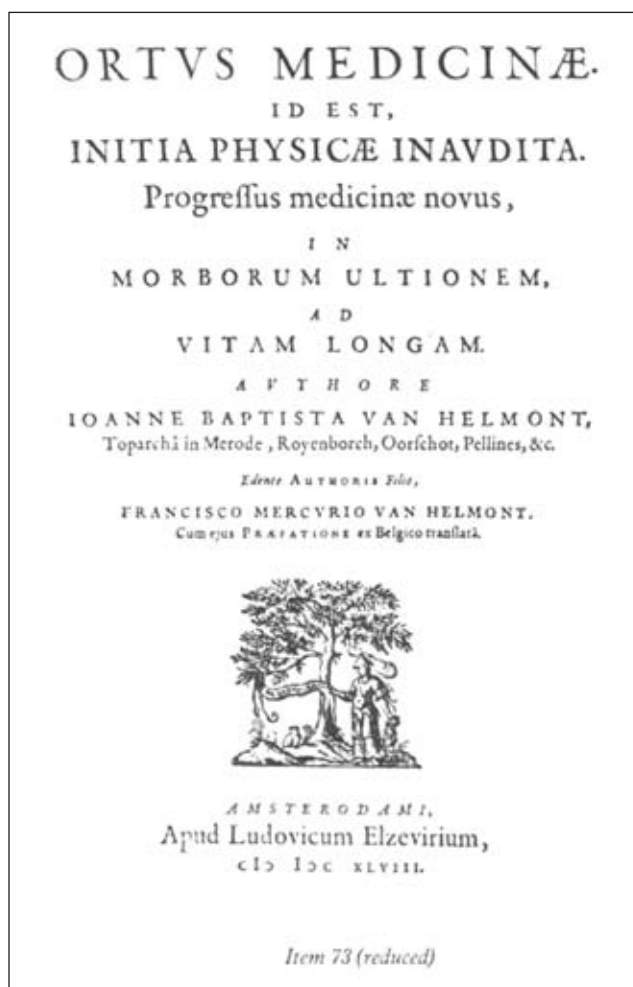
⁴ Grdenić, 2007, 298–299.

⁵ Dolar, 1993, 46.

⁶ Dolar, 1993, 47.



Slika 1: Frančiškan z odprto knjigo ob dominikancu (Brochoff, D. 1901. *Die Kloster Orden der hl. Katholischen Kirche*. stran 416).



Slika 2: Naslovna stran Helmontove knjige, ki jo hranijo kamniški frančiškani

Preglednica 1: Z vakuumom povezana literatura loških in kranjskih kapucinov, ki jo je Joahim (1740–1753) uvrstil k filozofiji s fiziko

Pisec	Naslov	Leto, jezik
Magnus, Albertus	<i>Divi Alberti Magni phisicor(um)...</i> (KSSKL-Loka S 3). Libri 9	1494 L
Schott, Kaspar	1661. <i>Cursus mathematicus, sive absoluta omnium mathematicarum</i> . Herbipoli: Schönwetter (S). Ponatisa: 1674. Francoforti: Cholin; 1699. <i>Cursus mathematicus, sive absoluta omnium mathematicarum</i> . Francoforti: Moen (NUK-4217; KSSKL-Loka T 1)	1699
Zahn, Joannes (* 1633; † 1707)	<i>Specula physico mathematica-historica notabili al mirabili scientiorum in qua mundi mirabilis aconomia, necv non mirifrice amplus, et magnificus... 1–2</i> . Norimbergae: Lochner (NUK-8462; KSSKL-Loka S 27).	1696
Gervais Brisacensis (* 1648 Breisach; OFM ^{Cap} ; † 1717)	<i>Cursus Philosophicæ brevi et clara methodo in tres tomules distributus; auctore P. F. Gervasio Brisacensi, Ordinis fratrum minorum Capucinatorum Provinciae Helveticae. Tomulus primus, Logica. Tomulus secundus octo libros Physicorum, seu Physicam universalem. Tomulus tertius, complectens libros de coelo, de generat., de meteoris, de animae, seu Physicam particularem et Metaphysicam</i> . Coloniae Agrippina (Köln): Joan Schlebusch (NUK-4615; KSSKL-Loka S 13–15, Kranj).	1699 L
Reinzer, Francisco (Reinitzer, SJ)	<i>Meteorologia philosophico-politica, in duodecim dissertationes per quaestiones meteorologicas et conclusiones politicas divisa, appositisque symbolis illustrata</i> . Augustae Vindelicorum: Wolf (NUK-8357, KSSKL-Loka S 2, 3)	1709 L
Semery, Andreas (* 1630; SJ; † 1717)	<i>Triennium Philosophicum quod P. Andreas Semeryremus e Societate Jesu in Collegio Romano Philosophiae iterum Professor Detabat Qu. Ac Editione ab Authori Recognitum & Auctum. Annus Secundus</i> . Venetiis (KSSKL-Loka S 25)	1690, 1708?
Jaslinszky, András (* 1715 Szinna; SJ 1733 Košice; † 1784 Rožňava)	<i>P. Andrea Jaslinszki SJ Institutiones Physicae</i> . Tyrnavia (NUK-8497; KSSKL-Loka T 4).	1756, 1761
Khell	<i>Physica ex recentiorum observationibus accommodata. 1–2</i> . Viennae: Trattner (KSSKL-Kranj V 29, Loka T 2–3; NUK-8206).	1751, 1754/55 L

frančiškani navdušeno kupili Newtonovi deli s sodobnim pojmovanjem atomov in vmesnega vakuuma, saj so zgolj ti frančiškani pri nas poučevali fizikalne vede na višji stopnji.

3 VAKUUM MED LOŠKIMI FILOZOFSKO-FIZIKALNIMI SPISI

Gorenjski kapucini so se najprej ustalili v Kranju (1640) in šele 28. 4. 1707 v Škofji Loki; vendar so po ukinitvi kranjskega samostana (1786) tamkajšnje knjige o vakuumu pristale pri loških sosedih⁷ skupaj s posameznimi spisi novomeških kapucinov.⁸

Loški kapucini so radi brali starega dobrega Alberta Magnusa; predvsem so listali njegovo mineralogijo, manj pa fiziko ali astronomijo.⁹ Albertov življenjepis so nabavili izpod Trithemiusovega benediktinskega peresa kot uvod v Albertovo mineralogijo z botaniko, ki jo danes hrani tudi NUK v dveh žepnih izdajah brez ekslibrisov.

Loški kapucini se z zvrhano žlico poguma niso branili niti protestantskih knjig, če so le pripomogle k pojasnjevanju skrivnostnih lastnosti vakuuma. Hranili so knjigo wroclawskega luteranca Daniela Sennerta, profesorja medicine v Wittenbergu (1603), kjer je poučeval skupaj s svojim svakom, Michaelom Döringom. Sennert je zastarelo Galenovo medicino in Aristotelov nauk usklajeval s kritiko Paracelsusovih novosti v spodbudo napredku atomizma; postal je poglavitna opora Boylovim razmišljanjem o vakuumu.¹⁰ Volf Engelbert Turjačan je nabavil kar dve Sennertovi knjigi, Mayr pa je leta 1678 svojim ljubljanskim strankam poleg dveh Sennertovih del ponujal Barnerovo knjigo o Sennertovih medicinskih sistemih. V Ljubljani so hranili dva ponatisa Sennertovih medicinskih pisem (1634), ki jih je kupil tudi Volf Engelbert turjaški. V enem od ljubljanskih izvodov je bila Sennertova razprava o vročini vezana za Senner-

tovimi Pismi; v drugi izdaji¹¹ pa ne. Loški kapucini so nabavili zgodnejšo objavo Sennerta iz leta 1611. Sennert je opisal naravo, prav tako pa razdelitev medicinskih ved.¹²

Loški kapucini se niso prav nič otepali številnih knjig piscev iz vrst sicer nasprotnega jezuitskega reda; kupili so knjigo jezuita Schotta, ki je prvi opisal Guerickejeve vakuumske poskuse in uporabljal njegovo črpalko. V loškem samostanu so brali filozofski tečaj s fiziko kapucina švicarske province Gervaisa Brisacensis. Gervais se je po logiki v posebej paginirani knjigi lotil še splošne fizike s posebnim poudarkom na vakuumskih poskusih z živim srebrom kapucina Valerijana Magnija; le-temu svojemu sobratu je očitno pripisal Torricellijev poskus, saj ubogega Torricellija še omenil ni.¹³

4 LOŠKE KNJIGE O VAKUUMU, UVRŠČENE MED MEDICINSKE VEDE

Loški kapucini so nabavili londonske raziskave Lowerja, ki je med zahodnjaki prvi vpeljal transfuzijo krvi; sodeloval je z Robertom Hookom, izdelovalcem Boylovih vakuumskih črpalk. Ločani so brali tudi Paracelsusa in predhodnika Stahlove teorije gorenja, Becherja; slednji je leta 1666 postal komercialni svetnik na Dunaju, kar je stopnjevalo priljubljenost njegovih del pri nas.

5 VAKUUMSKI POSKUSI KAPUCINA VALERIJANA MAGNIJA

Eksperimentalna žilica je že zgodaj tesala frančiškanski pogled na svet, do najvišje točke pa jo je pripeljal kapucin Valerijan Magni (Maximilian Magnani, Magnus, * 15. 10. 1586 Milan; OFM Cap; † 29. 7. 1661 Salzburg), najpomembnejši kapucinski ba-

Preglednica 2: Z raziskovanjem vakuuma povezani medicinski spisi v loški kapucinski zbirki

Pisec	Naslov	Leto, jezik
Lower, Richard	Englischen Artzney-Büchlein...	1738
Johann Joachim Becher (* 1635 Speyer; † 1682 London).	<i>Jos. Joachim Becher Land Medicus (KSSKL-Loka Y 10)</i>	
Paracelsus	<i>Dess Fürsten aller Artzeten Aureoli Paracelsi Tractat (KSSKL-Loka Y 1).</i>	1563
Joseph Kraus (* 9. 11. 1678 Neumarkt; SJ; † 16. 11. 1718 Osijek).	<i>Consolatio Geographiae in solatium desolatae mathesis et discipulorum per modum recreationis automnalis instituta et proposita a rev. D. Carolo Rodhe, sacri exemptique ordinis Cisterciens. Celeberrimi Monasterii ad Fontes Marianos professo, praeside R. P. Josepho Kraus č Societate Jesu. Edita in examine publico ipso praeside.</i> Labaci: Mayr (KSSKL-Kranj W 88).	1717

⁷ Bahr, 2005, 397–398, 679, 681; Jan, 2000, 3.

⁸ Benedik, 1994, 213.

⁹ Opomba Marte Gartner.

¹⁰ Grdenić, 2007, 366, 397–399, 410.

¹¹ NUK-11724.

¹² Sennert, 1664, 127.

¹³ Brisacensis, 1699, 3: 34/35.

ročni raziskovalec vakuuma. Volf Engelbert Turjaški je nabavil celo Magnijevo polemično teologijo iz Magnijevih zrelih let.

Magni se je rodil kot tretji otrok italijanskega finančnika grofovskega rodu, Konstantina. Konstantin je bil španski podložnik v službi naših cesarjev Maksimilijana II. in Rudolfa II.; zato se je leta 1588 preselil na praški cesarski dvor in sina imenoval po vladarju. Ime se ga je držalo le, dokler se nadarjeni poba ni prelevil v kapucina Valerijana. Valerijan je kratek čas poučeval na Dunaju (1613). Leta 1619 so ga premestili v Linz, kjer je srečal Keplerja; podpiral je tudi Galileijeve ideje v nasprotju z nekaterimi jezuiti, ki so bili tovrstnim novotarijam dokaj sovražni, saj jim je "šel v nos" obstoj vakuuma. Po kratkotrajnem poučevanju na praški univerzi je Magni postal habsburški odposlanec v Parizu (1622–1623); tam se je osebno seznanil z vodilnimi raziskovalci vakuuma, med drugim z leto-dve mlajšima B. Pascalovim očetom in minoritom Marsennom.

Magni se je uveljavil kot svetovalec praškega nadškofa Harracha (1622–1634), poznejšega kardinala. Nekaj časa je celo služboval kot provincial češke kapucinske province (1624), dokler ni leta 1626 postal apostolski misijonar na Poljskem, Ogrskem in v Nemškem cesarstvu; slednje je, nerodnemu imenu navkljub, vsebovalo tudi naše kraje. Magni je skušal prepričati nadškofa kardinala Dietrichsteina, naj s pomočjo svojih družabnih zvez objavi Galileijeve *Discoursi* na Češkem; žal je kardinal prav tedaj izpustil brezgrešno dušo in knjigo so pozneje objavili kar v Leydenu.¹⁴ Tako se je mladi Valerijan že zelo zgodaj seznanil s poglobitvimi novostmi tedanje znanosti; vseskozi je rad priznaval svoj dolg Galileijevemu opisu vakuuma.

Magnijeva stremjenja so dala mogočen zamah vakuumskim raziskavam znotraj kapucinskega reda, ki ga je pomagal vzpostaviti v poljskem kraljestvu. Njegov zgodnji opis protestantskega nauka so leta 1634 prevedli celo Angleži; bil je ognjevit in včasih kar strasten pisec.¹⁵ Poljski kralj Vladislav (Ladislaus) mu je želel nadeti celo kardinalski klobuk; žal se leta 1643 ni posrečilo zbrati dovolj podpore neposredno po Magnijevem prvencu *De luce mentium et eius imagine* (1642). Podobno se je četrto stoletja pozneje kardinalski klobuk izmaknil stremuškemu čelu Volfovega brata, turjaškega kneza Janeza Vajkarda.

Leta 1645 je Vladislav poslal Magnija v Rim pripravljat torinski kongres; nadebudni kapucin je vplivnim Rimljanom dobrohotno delil svojo knjigo *De luce*. Kapucin Magni je naslednje leto samostojno

opravił Torricelijevemu podoben poskus na varšavskem dvoru Vladislava IV. in Louise-Marie de Gonzaque princese Nevers. Kraljičin tajnik, Pierre Des Noyers, je o uspehu takoj obvestil francoske fizike. Zanimanje za znanost se je v Varšavi nadaljevalo še pod oblastjo Vladislavovega polbrata, Jana Kazimierza. Kazimierz je bil jezuit in kardinal pred poroko s polbratovo vdovo, Louise-Marie de Gonzaque; vseeno je s prestola hudomušno podpiral kapucina Magnija, ki si je bil z jezuiti močno v laseh. Nekaj mesecev po odstavitvi prvega ministra, kneza Janeza Vajkarda Turjaškega, je cesar Leopold spravił Kazimierza na hladno in na poljski prestol postavil Mykolasa Kaributasa Wisniowieckega, junaka poznejših Sienkiewiczovih romanov, ki jih od nekdanj radi beremo tudi Kranjci. Seveda se je novi kralj naslednje leto poročil z brhko cesarjevo polsestro Eleonoro, okrog prineseni Kazimierz pa je z dolgim nosom in kratkih rokavov kmalu dočakal zadnje dni v Franciji.¹⁶ Eleonora je pozneje kot radoživa vdova med svoje dvorne dame štela tudi kneginjo Alojzijo, hčerko kneza Janeza Vajkarda Turjaškega.

Magni in Pascal sta se sprva dajala za prvenstvo pri novih poskusih z vakuumom, kasneje pa sta raje soglasno kritizirala jezuite. Zaradi zahtev po prioriteti Valerijana Magnija je Blaise Pascal pohitel z objavo Novih poskusov s praznim oktobra 1647. Istočasno je napisal predgovor h knjigi o praznem, ki se je le deloma ohranila. Istega leta 1647 je Magni svoje vakuumске poskuse opisal v knjižici polni ostrih kritik Aristotela; bil je to prvi tiskani opis lastnosti vakuuma nad zaprto cevjo z živim srebrom. Vsekakor je Magni med potovanjem po Italiji moral kaj slišati o Torricelijevih dosežkih, ki so postali priljubljeno jabolko spora po Torricelijevem pismu Michelangelu Ricciju (13. 6. 1644); pismo je bilo resda tajno in zasebne narave, a so kmalu prav vsi vedeli za opis vakuuma nad živim srebrom v njem. Magni je bil doma iz najvišjih slojev milanske družbe, le nekaj ur ježe od Torricelijevih Firenc, zato se mu bi tako pomembna novica le stežka izmuznila.

Roberval je obtožil Magnija za plagiat, saj mu je Descartov nekdanji sošolec Marin Mersenne (* 1588; OFMConv 1611; † 1648) zaupal, da je Magnija srečal v večnem Rimu in ga obvestil o Torricelijevem vakuumu (1645).¹⁷ Po vrnitvi iz Firenc in Rima je minorit Mersenne spomladi 1645 v Parizu objavil poročilo o Torricelijevem poskusu;¹⁸ v svoji samostanski celici blizu Place Royal je po gromozanskem krogu dopisovalcev in obiskovalcev seznanil Francoze z novimi dokazi za obstoj vakuuma. O gibanju in

¹⁴ Sousedík, 1983, 21, 31, 55.

¹⁵ Teraš, 1929, 57.

¹⁶ Targosz, 1971, 137–142.

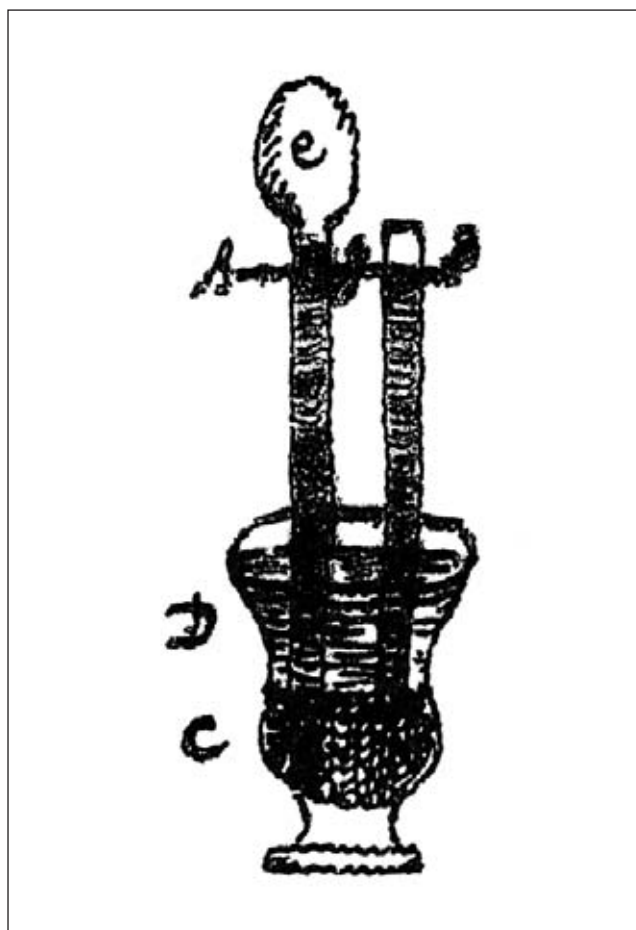
¹⁷ Sousedík, 1983, 75.

vakuumu si je dopisoval tudi s Hobbesom in Descartesom, ki praznot nista marala; Descartes je rad poudarjal, da je v praznem kozarcu še vedno polno zraka. Dne 13. 12. 1647 je René Descartes poročal Mersennu v Pariz, da je postavil merilo iz papirja ob barometer Torricellijeve vrste.¹⁹ Za izdelavo takšnih steklenih naprav je bilo treba izkušenih stekloprihačev; tako Mersenne ni mogel opraviti Torricellijevega poskusa v Parizu, kjer ni imel na voljo sposobnih obrtnikov. Kmalu po Mersennovi smrti so njegovi družabniki prerasli v zametek pariške Akademije znanosti.

Magni ni zlahka vrgel puške v koruzo in je hotel obveljati za odkritelja (Torricellijevega) vakuuma še desetletje pozneje na državnem zboru v Regensburgu (1654); tam je srečal kranjskega kneza Janeza Vajkarda Turjačana, najsvetlejšo med tedanjimi političnimi zvezdami. Ni zgrešil niti magdeburškega župana Otta Guerickeja, katerega oče je bil v mladosti poslanec poljskega kralja. Guericke ni povsem verjel Magniju, saj je medtem že sam marsikaj slišal o Torricellijevih uspehih. Magni je svojo knjigo podaril Guerickeju dokazujoč gibanje teles v vakuumu nad cevjo z živim srebrom v drugem delu svoje knjige; v zadnjem, tretjem delu knjige je natančno opisal prehajanje svetlobe brez snovnega nosilca skozi zrak in preko vakuuma. Očitno si svetlobe ni predstavljal v obliki delcev; raje je imel valove, tako kot pozneje vakuumista Huygens ali Hooke. Po Guerickejevem poročilu je uporabljal cev dolgo 6/4 magdeburških vatlov (Elle), ki jo je na enem koncu dodobra zamašil in napolnil z živim srebrom; le-tega so gotovo skopali prav v Idriji. Ko je nasprotni konec cevi zatisnil s prstom, zasukal in potopil v rezervoar, se je živo srebro počasi spustilo do določene višine 5/4 vatlov, ki jo danes izmerimo kot 760 mm. Magdeburški župan Guericke je torej meril v vatlih dolgih nekaj čez 6 dm.

Valerijan je v cevi nad živim srebrom opazoval prazen prostor, kot ga je znal izčrpati tudi župan Guericke.²⁰ Magnijeva kritika Aristotelovega zavračanja obstoja vakuuma je bila kar najhujši izziv jezuitom tedanjih dni. Magni je bil ravno na višku svoje življenjske poti, kot kapucin pa ni bil prijeten sogovornik jezuitom; proti njim je leta 1659 objavil uničujoč spis *Contra imposturas jesuitarum*. Podobno si jih je istočasno privoščil Pascal v pariških Provincialnih pismih; previdni Pascal se pod svoje norčevanje raje ni podpisal, saj se je gotovo bal, da bi ga doletele Valerijanovim podobne zagate. Za znanost sicer dokaj zagreti papež Aleksander VII. je Valerijana poklical v Rim na zagovor; premeteni Magni je

raje ostal v gostoljubnejšem mestu Dunaj, pa čeprav s trebihom zunaj. Zato je papežev dunajski nuncij leta 1661 po nasvetu jezuitov izdal ukaz za Magnijevo prijetje na Dunaju in njegovo privedbo v Rim; politika je bila pač nad znanostjo.²¹ Na srečo sta se cesar Ferdinand III. in njegov prvi minister, ljubljanski knez Janez Vajkard Turjaški, potegnila za nesrečnega kapucina, ki je očitno stopil na žulj mogočnim nasprotnikom. Nadobudni Valerijan si je glavo rešil s preselitvijo v bolj odročni Salzburg, ki so mu vrli Slovenci od davnin pravili Solnograd; tam je preživel zadnje mesece v samostanu v svojevrstnem hišnem zaporu, podobno kot tik pred njim Galilei v predmestju Firenc. Tik pred smrtjo se je Magni odpravljal v Rim, kamor so tedaj še vodile vse poti; tam bi svojo prirojeno zgovornostjo bržkone spreobrnil oblastnike k svojim teorijam vakuuma. Vendar je bil za tiste čase že starček in tudi jeklenih konjičkov tedaj še ni bilo na voljo; tako ga je tik pred ogledom večnega mesta obiskala neizprosna starka s koso.



Slika 3: Po Torricelliju imenovan poskus z vakuumom nad živim srebrom v cevi, ki bi ga skorajda pripisali iznajdljivemu kapucinu Valerijanu Magniju.

¹⁸ Gorman, 1994, 19.

¹⁹ Redhead, 1984, 31.

²⁰ Guericke, 1986, 92–93, 108.

²¹ Gorman, 1994, 19, 21; Thorndike, 1958, 7: 203.

Praški profesor Dobrzensky je verjel v Magnijevo prvenstvo še desetletje pozneje v svoji knjigi o Vodometih,²² ki jo je nabavil tudi Volf Engelbert Turjačan v Ljubljani; druge Dobrzenskijeve knjige je Valvasor zbral na Bogenšpergu. Seveda je mnenju Dobrzenskega lahko botroval tudi češki patriotizem, ki tedanjim izobražencem ni bil povsem tuj, čeprav je bil bolj zemljepisno kot narodnostno obarvan. Dobrzensky se je ostro prepiral z gorenjskim alkimistom Janezom Friderikom Rainom glede uporabe filozofskega kamna.

Magnijeva razmišljanja o praznem so bila krona sporov, ki so se vlekli že nad dve tisočletji. Jezuiti, ki so poučevali Aristotelovo fiziko, so imeli vakuum za nasprotje samemu sebi. Takšen se je zdel tudi zaradi uporabe latinskega jezika, kar je posrečeno zvenelo z oznako praznega "*locatum sine loco*". Galilejeva v italijanskem jeziku pisana fizika se je takšnemu besednemu nasprotju lahko izognila, na glavo pa ga je obrnil prav Magni (1647) z izzivalnim naslovom svojega dela "*locus sine locato*".²³ Opazovanja in poskusi vplivnega kapucina so utemeljila sodobne teorije vakuuma. Ker se je s svojimi poskusi neposredno dotaknil idej Otta Guerickeja in njegovega sodelavca, ljubljanskega kneza Janeza Vajkarda Turjaškega, so se z Magnijevimi idejami o vakuumu zelo hitro seznanili tudi drugi kranjski plemiči. Prav zato je Janez Vajkard z Magnijevo knjigo dopolnil svojo in bratovo ljubljansko knjižnico; ni treba trikrat reči, da vrlj pisec ni zvedavemu kranjskemu Janezu knjige kar podaril, podobno kot Janezovemu sodelavcu Guerickeju.

Magni se je jezuitom globoko zameril predvsem s svojo kritiko Aristotelovega zanikanja vakuuma. Po Aristotelu naj bi imeli štirje osnovni elementi naravno smer gibanja navzgor ali navzdol glede na svojo gostoto. Praznota nima gostote; zato se ji po Aristotelu ne da opredeliti smeri gibanja.²⁴ Kranjski jezuit in ljubljanski rektor, Anton Erberg iz Dola pri Ljubljani, se je še stoletje pozneje jezil na davno umrlega Magnija, ki je jezuitom očitno pošteno zagodel; s svojim opisom vakuuma jim je potisnil trn v oko. Vendar so se časi medtem že spremenili: naslednji rodovi so sprejeli Magnijev opis vakuuma. Še več: vakuum je dve stoletji po smrti svojega zgodnjega preizkuševalca, kapucina Magnija, postal osnova domala vseh sodobnih tehnologij, od žarnic do televizijskih zaslonov.

6 BRIXIANUS

Zgledu kapucinskega vakuumista Magnija so kmalu sledili raziskovalci iz drugih vej frančiškanskega reda. Eksperimentalni fizikalni učbenik mino-ritskega skotista Brixianusa so nabavili ljubljanski avguštinci; Brixianusov matematični učbenik v štirih delih z vrteninami vred (1738, 1739) pa je B. F. Erberg (1751) kupil za knjižnico ljubljanskih jezuitov kot eden od priročnikov, potrebnih za posodobitev pouka po navodilih presvetle cesarice Marije Terezije. Novomeški frančiškani so imeli oba dela svojega sobrata Brixianusa, fizikalnega kar v dveh izdajah po starem dobrem dolenskem načelu "gliha vkup štriha".

Minorit Fortunatus Brixianus (a Brixia, Brixanus, Girolamo Ferrari, * 1701 Brescia; OFMConv; † 1754) je bil profesor naravoslovja z matematiko vred v mestu Brescia, po katerem je prevzel svoj latiniziran priimek. Zagovarjal je domislice frančiškana Skota, atomizem in strogo zaverovanost v mehaniko kot temelj prirodoslovja. V eksperimentalnem in matematičnem učbeniku ni priznaval znanstvene avtoritete cerkve ali Aristotela, pravovernost Brixianusovega fizikalnega učbenika pa so potrdili v beneški Padovi (20. 9. 1745). Pri ljubljanskih avguštincih uporabljano izdajo (1751, 1752) sta sestavljali dve knjigi o splošni in ena o posebni fiziki, predvsem astronomiji s kronologijo vred. Pozneje je knjige dobila licejska knjižnica, kjer je del listov ostal še do konca 1990-ih let deloma nerazrezan. Zdi se, da Brixianus ni imel posebno vnetih bralcev med ljubljanskimi srajcami? Poltretje stoletje neprebrane liste je dobil v roke pisec teh vrstic, saj dotlej očitno niso vzbujali pretiranega zanimanja v beli prestolnici. Brixianus je obravnaval številne sodobne raziskovalce, med njimi Gassendija z vakuumom v porah,²⁵ svojega soseda jezuita Lano Tercija iz Brescie,²⁶ 'sGravesanda, Musschenbroeka²⁷ in Boerhaava. Brixianus je naravne pojave raziskoval s poskusi, ne da bi se posebej oziral na mnenje Aristotela ali teologov.²⁸ V obsežnem poglavju o vakuumu ni opisal Torricellijevih poskusov,²⁹ čeprav je priznaval obstoj vakuuma in natrosil zvrhano mero dokazov Torricellijeve florentinske *Accademia del Cimento* za razlikovanje med učinkovinama, ki povzročata toploto in mraz.³⁰ Med Newtonovimi kritiki je citiral italijanski beneški prevod *Lezioni di fisica* (1743) honorarnega člana pariške akademije (1721) in člana londonske Kraljeve družbe (1729), Josepha

²² Thorndike, 8: 202–203; Dobrzensky, 1659, 25, 28.

²³ Prager, 1980, 48.

²⁴ Sparnaay, 1992, 12; Podolny, 1986, 21.

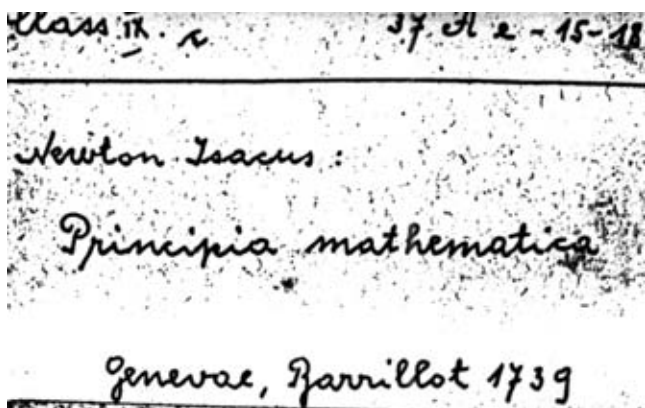
²⁵ Brixianus, 1751, 1: 52.

²⁶ Brixianus, 1751, 1: 250, 260.

²⁷ Brixianus, 1751, 1: 260, 277.

²⁸ Sodnik-Zupanec, 1943, 24; Lind, 1992, 73, 374.

²⁹ Brixianus, 1751, 1: 50–56, 244–262.



Slika 4: Toševa katalogizacija Newtonovih Principov (1739) v novomeškem knjižničnem katalogu iz leta 1942

Privata de Molièresa (1734–1739).³¹ Molières je knjigo zasnoval na svojih predavanjih pri Kraljevem kolegiju, v Newtonovo teorijo pa je skušal vpeljati majhne Descartesove vrtince.

Na koncu prve od splošnih fizikalnih knjig je Brixianus priporočil Newtonove Principe v izdaji svojih rimskih sobratov minoritov iz leta 1739, Samuel Clarkovo izdajo Newtonove optike iz leta 1729, 'sGravesandejev eksperimentalni učbenik (1741), Musschenbroekov prevod poskusov *Accademia del Cimento* (1731), beneško izdajo Boerhaavejeve kemije (1737) in nekaj medicinskih spisov. Priporočilo je padlo na plodna tla, saj so novomeški frančiškani ob Brixianusu nabavili še minoritsko izdajo Newtonovih Principov in eno izmed Musschenbroekovih del.

Medtem ko se je v prvi knjigi lotil nastajanja in pojavov teles po naravnih principih, je Brixianus drugo knjigo ločil na poglavja o viru težnosti,³² umetnem in naravnem težnostnem gibanju³³ ter težnostnem gibanju tekočin s posebnim poudarkom na hidrostatici.³⁴ Drugo knjigo je zaključil s skicami gibanja, klancev, trkov, veznih posod, vakuumskih barometrov in termometrov.

Zadnjo, tretjo knjigo posebne fizike je ločil na šest disertacij o nastanku sveta, matematičnem opisu Zemlje, sistemu vesolja, posebnostih zvezd in kronologije. Objavil je dva bakroreza Kopernikovega sistema, vmes med njima pa bakrorez Tychovega vesolja;³⁵ zastareli Ptolemejev nauk je očitno že zavrgel med staro šaro. Z zadnjo, devetnajsto skupino slik je pojasnil sončni mrk. Newtonov nauk je uporabljal tako v mehaniki kot pri optiki.³⁶

Ljubljanski jezuiti so brali še veliko drugih del frančiškanskih piscev. Med njimi je bil frančiškan Stefano Pace z italijansko pisano Fiziko peripatetikov, kartezijancev in atomistov. V prva dva dela so ljubljanski jezuiti trideset let po izdaji vpisali ekslibris; v tem času se je frančiškanski pesnik in učitelj Valentin Vodnik gotovo navzel Pacejevih idej. Zadnjo knjigo je Pace posvetil biološkim vedam. Pace je bil sprva parmski jezuit, vendar je leta 1697 prešel k frančiškantom. Svojo fiziko je povzel po jezuitu Pavlu Casatiji; po vrsti je opisal posamezne pojave (svetloba, mraz, toplota, elektrika) in o njih navajal mnenje kartezijancev, atomistov, starih sholastikov in novih peripatetikov; med slednje je bržkone štel sebe, saj je peripatetična prepričanja vedno navajal kot zadnja. Prvi del je začel s hvalo Roemerjevi meritvi hitrosti svetlobe kot dosežku "drugega Tycha",³⁷ opisom mraza po Glauberju,³⁸ tlaka zraka z vakuumom in Torricellijevim poskusom vred.³⁹ Nadaljeval je z Boylevimi dosežki,⁴⁰ bolonjskim kamnom⁴¹ in opisom kartezijanskih domnev Jacquesa Rohaulta (* 1620; † 1675);⁴² pri tem je omenjal Gassendija,⁴³ ne pa Newtona. Prvi del je zaključil s skicami odboja in loma svetlobe. V šestih traktatih druge knjige je opisal snov v zvezdah,⁴⁴ komete,⁴⁵ astrologijo za odločevanje,⁴⁶ posamezne planete,⁴⁷ plimovanje,⁴⁸ transformacije kovin,⁴⁹ končno pa še podzemne vode in potrese.⁵⁰ Slike, vstavljene na konec teksta, so predstavile vse možne sisteme sveta, mrke, lom svetlobe in magnete.

³⁰ Brixianus, 1751, 1: 278.

³¹ Brixianus, 1751, 1: 56.

³² Brixianus, 1751, 2: 1–29.

³³ Brixianus, 1751, 2: 30–231.

³⁴ Brixianus, 1751, 2: 232–350.

³⁵ Brixianus, 1752, 3: table XVI–XVIII.

³⁶ Brixianus, 1751, 1: 53, 56, 247.

³⁷ Pace, 1741, 1: 190.

³⁸ Pace, 1741, 1: 263.

³⁹ Pace, 1741, 1: 218–233.

⁴⁰ Pace, 1741, 1: 237.

⁴¹ Pace, 1741, 1: 291.

⁴² Pace, 1741, 1: 311.

⁴³ Pace, 1741, 1: 289.

⁴⁴ Pace, 1741, 2: 90.

⁴⁵ Pace, 1741, 2: 141.

⁴⁶ Pace, 1741, 2: 155, 158.

⁴⁷ Pace, 1741, 2: 149–153.

⁴⁸ Pace, 1741, 2: 177.

⁴⁹ Pace, 1741, 2: 360.

⁵⁰ Pace, 1741, 2: 388, 295.

7 NOVOMEŠKA FRANČIŠKANSKA KNJIŽNICA

Novomeški frančiškani so kupili vsa Boylova vakuumska in druga dela, podobno kot Valvasor na bližnjem Bogenšpergu; tako so si dodobra ogledali vse inačice Boylove vakuumske črpalke. Nabavili so tudi domneve eksperimentalnega fizika in Boylovega dopisovalca Placentinija, imenovanega Tarvisini, prav tako pa spis Boylovega dopisovalca z univerze v Kielu in Altdorfu, Günterja Christopha Schelhammerja. Placentini je zavrnil Schelhammerjeve domneve o vakuumu v barometru in se je raje priklonil Leibnizovim idejam. Tudi sicer so novomeški frančiškani v poznem baroku poučevali po Leibnizovih smernicah, saj so v ta namen kupili številna Wolffova in Sturmova dela s priredbami avguština Desinga vred.

Newtonova doba je pri novomeških frančiških pokončala vakuumu nasprotno kartezijanske vplive s posegi Angleža Keilla,⁵¹ ki je študiral pri Davidu Gregoryju v Edinburgu, ko je ta takoj po izidu Newtonovih Principov začel predavati o njih; Keill je Gregoryja spremljal celo na Oxford, ko je le-ta postal tam profesor astronomije (1702). Keill se je kmalu še sam dokopal do položaja profesorja filozofije in je

med prvimi predaval o Newtonovem prirodoslovju; učil je Johna Désaguliersa, katerega eksperimentalni priročnik so ljubljanski jezuiti kupili leta 1754.

Novomeški izvod izdaje Keillovega učbenika je izšel istočasno z minoritsko priredbo Newtonovih Principov; obe knjigi so novomeški frančiškani nujno potrebovali ob začetku svojih višješolskih študijev po ukazu Marije Terezije in van Swietena. Van Swietenov rojak, nizozemski Newtonov zagovornik, Musschenbroek, ni bil priljubljen le med novomeškimi frančiškani, temveč tudi pri ljubljanskih jezuitih. Ljubljanski jezuiti so Musschenbroeka kupili leta 1754 v poldrugo desetletje starem francoskem prevodu, medtem ko so novomeški frančiškani raje stavili na poznejšo izdajo latinskega originala. Na ljubljanskem Liceju so kmalu po Musschenbroekovi smrti popisali še pet drugih Musschenbroekovih del v skupno šestih knjigah, razen *Essai* vse v latinščini. Po dve knjigi sta bili natisnjeni na Nizozemskem in na Dunaju, ena pa celo v Ljubljani. Vsa dela so bila tiskana v četverki med letoma 1739 in 1768. Štiri so imela splošni, poudarjeno eksperimentalni značaj z vakuumskimi poskusi vred: po ena je obravnavala magnetizem oziroma kapilarnost.

Preglednica 3: Vakuumske knjige novomeških frančiškanov⁵²

Pisec	Naslov, kraj: izdajatelj	Leto, jezik
Schwenter, Daniel	<i>Mathematik und Physik</i> . Nürnberg	1651 N
Majolo, Simone	<i>Colloquia physica nova</i> . Vulturariac	1654 L
Boyle, Robert	<i>Opera omnia</i> . Venetiis: Hertz	1696 L
Wolff, Christian	<i>Mathematischen Wissenschaften</i> . Frankfurt: Renger	1701 N
Wolff, Christian	<i>Wirkungen der Natur = Physica</i> . Halle: Renger	1746 N
Descartes	<i>Physica et metaphysica</i> . Amstelodami: Blaeu	1704 N
Tarvisini (Giacomo Placentini, * 1672; † 1762)	<i>De barometro dissertationes duae Jacobi Placentini d. Tarvisini: quarum prima continet examen hypothesis D.G. Christoph: Schelhameri, altera interpretatione Leibintian(a)e: adiectis aliis circa motus barometri coniecturis</i> . Patavii: Conzatti.	1711 L
Stahl, Georg Ernst	<i>Experimenta, observationes, aninadversiones... chymicae et physicae</i> . Berolini: Hande	1731 L
Stahl, Georg Ernst	<i>Opusculum chymico physicum</i> . Halle	1715 L
Stahl, Georg Ernst	<i>Collegium practicum</i> . Nürnberg; Leipzig (nemški prevod: Storch, Johann alias Pelargus, Hudericus)	1729 L; 1745 N
Newton, Isaac	<i>Principia Mathematica</i> . Genevae: Barrillot	1739 L
Keill, John	<i>Physica et astronomia Vol 1</i> . Mediolani: Aonelli	1742 L
Musschenbroek	<i>Elementa physicae. Vol 1</i> . Venetiis: Recurti	1745 L
Brixianus, Fortunatus OFM	<i>Philosophia... Mechanica III. Vol 3</i> . Brixiae: Rizzardi	1745–1747 L
Brixianus, Fortunatus	<i>Philosophia... Mechanica II dela. Vol 1</i> . Brixiae: Rizzardi	1751–1752 L
umBiwald, Leopold SJ	<i>De Studii physici natura vol. 1</i> . Graecii: Widmanstad	1767 L
Biwald, Leopold	<i>Institutiones physicae. Vol. 1</i> . Graecii: Lechner	1774 L
Zallinger, Joann Batista (* 1735; SJ; † 1813)	<i>De viribus materiae Dissertatio physica</i> . Graecii: Widmanstad. ... 1771. <i>Propugnaret Jos. Liber baron de Sternbach</i> . Oeniponti.	L
Horváth	<i>Physica generalis et particularis</i> . Augustae: Rieger	1775 L
Ambshell, Anton	<i>Dissertatio de mundo in genere</i> . Labaci	1780 L
Imhof, Maximus	<i>Institutiones physicae</i> . Monachii: Lentner	1798 L
Neumann, Johan Philip	<i>Compendiaria Physica</i> . Graecii: Ferstl	1808 N

⁵¹ Keill, 1742, 196–208.

⁵² Pravilni naslovi so v oklepajih.

$a_n + \frac{125}{1000} = 0.7086333$, daher
 Log 51125 = 4.7086333. Die Mantisse stimmt mit der in den Tafeln befindlichen vollkommen überein
 Reustadt, im Juni 1857.

P. Bernard Vovk.

Slika 5: Vovkov podpis pod njegovo edino objavljeno znanstveno razpravo iz matematike s primesmi meteorologije (Vovk, 1857, 30)

Novomeški frančiškani so radi brali spise nekdanjih ljubljanskih profesorjev Biwalda, Ambschlla ali Neumanna, ki so zagovarjali Boškovičev opis vakuuma; seveda je tu šlo predvsem za šolske knjige, ki so jih zapovedovale dunajske oblasti.

8 NOVOMEŠKE VAKUUMSKE NAPRAVE BERNARDA VOVKA

Preglednica 4: Pomembnejši Vovkovi nakupi vakuumskih naprav za fizikalni kabinet

Naprava	Leto nabave
Zrakotesna posoda ⁵³	1857
Saussurov higrometer, dar novomeškega kanonika Josefa Žagarja	1862
Dve Geisslerjevi katodni elektronki; Josef Žagar zanje prispeva 10 fl öw ⁵⁴	1869
Ruhmkorffov induktor za 150 fl öw	1869
Geisslerjevi katodni elektronki	1870

Frančiškan Bernard Vovk je bil dolgoletni profesor fizike, meteorolog in ravnatelj gimnazije v Novem mestu. Med njegovimi nadarjenimi dijaki je bil znameniti raziskovalec hitrosti elektromagnetnih valov v vakuumu, Ignac Klemenčič, profesor v Gradcu in Innsbrucku. Vovk ga je s pomočjo najsodobnejših komaj dobro desetletje starih Geisslerjevih bonnskih vakuumskih elektronk že zelo zgodaj seznanil s skrivnostmi širjenja valovanj v vakuumu. Vovk je s svojim nakupom Geisslerjevih vakuumskih elektronk Dolenjcem pokazal tedaj najboljši vakuum le par let potem, ko so se s podobnimi napravami začele postavljati ljubljanske "srajce". Vakuumske naprave seveda niso bile med najcenejšimi, tako da je bil kanonik Josef Žagar profesorju Vovku v veliko pomoč: za 1 fl öw je bilo tisti čas mogoče kupiti kilogram govejega mesa. Tako so si za ceno Geisslerjeve elektronke naši ješči predniki lahko privoščili že kar prijetno pojedino za dobro obloženimi mizami, ki bi se šibile pod težo slastnih pečenk.

⁵³ Izvestje Novomeške gimnazije, 1857, 33.

⁵⁴ Izvestje Novomeške gimnazije, 1869.

9 SKLEP

Slovenski frančiškani so poučevali na nadaljevalnih javnih šolah le v Kamniku in Novem mestu. Kljub temu so se dodobra oskrbeli s prvorazredno fizikalno literaturo povezano s praznim, ki sta ga že ob zori vakuumski poskusov raziskovala kapucin Valerijan Magni in minorit Marin Mersenne.

10 NAHAJALIŠČA KRANJSKIH KNJIG O VAKUUMU IN REDOVNIŠKI NAZIVI

- FSLJ* – Knjige in rokopisi iz knjižnice frančiškanskega samostana v Ljubljani
FSKA – Knjige iz knjižnice frančiškanskega samostana v Kamniku
FSNM – Knjige in rokopisi iz knjižnice frančiškanskega samostana v Novem mestu
KSSKL – Signature knjižnice Kapucinskega samostana v Škofji Loki; nekatere med njimi so bile nekoč v Kranju
NUK – Signature Narodne in univerzitetne knjižnice v Ljubljani
OFM – datum vstopa v frančiškanski red
OFMConv – datum vstopa med minorite
OFMCap – datum vstopa med kapucine
S – 1668 (prepis leta 1762). *Catalogus Sive Repertorium omnium Librorum Bibliothecae Illustrissimi et excellentissimi Domini Domini Wolffgangi Engelberti R.I: Comitibus ab Auersperg...* *HHStA, FAA*, VII Laibach, A 14/4 conv. 1 Laibach-Fürstehof 1729–1895, str. 1–431
SJ – datum vstopa v jezuitski red

LITERATURA

- Bahor, Stanislav. 2005. Samostanske knjižnice na Dolenjskem. Frančiškani in knjižnica frančiškanskega samostana v Novem mestu. *Rast*. 66/3–4: 387–409.
 Bahor, Stanislav. 2005. Samostanske knjižnice na Dolenjskem. Kapucini in kapucinski samostan Krško. *Rast*. 66/6: 673–691.
 Benedik, Metod. 1994. Kapucini v Novem mestu. *Zgodovinski časopis*. 48/2: 195–216.
 Brixianus, Fortunatus. 1738, 1739. *Elementa mathematica in quatuor Tomos digesta. Tomus I. Algebrae Synopsis, generalem proportionum doctrinam, ac utriusque progressionis theoriam, & praxim continens. T. II. in quo linearum atque planorum symptomata demonstrantur. T. III. Geometriam solidorum continens. T. IV. In quo sectionum canicorum, solidorum ex earum revolutione generatorum, ac figurarum isoperimetrarum symptomata demonstrantur, precipuaque elementaris Geometriae Problemata resolutuntur.* Brescia: Rizzardi. (NUK-12070). Ponatis: 1756. Brescia (FSNM).
 Brixianus, Fortunatus. 1749. *Philosophia mentis methodicae... I. Logicam. II. Metahysicam.* Brescia: Rizzardi (NUK-4399).
 Brixianus, Fortunatus. 1735, 1736. Ponatis: 1745–1747. *Philosophia... Mechanica III. Vol 3.* Brixiae: Rizzardi (FSNM). Ponatis: 1751,

1752. *Philosophia Sensuum Mechanicam Methodicam Tractata atque ad usum Academicos accommodata opera & studio. Tomus primus physicam generalem continens. Tomus secundus physicam particularum complectens. Secundis cursis P. F. Fortunati A. Brixia ord. minor. S. Francisci Prov. Brixia. I–III.* Brescia: Rizzardi. (FSNM; NUK-8150).
- Dobrzensky, Jacobus Joanes Wenceslaus de Nigro ponte. 1657. *Nova, et amaenior de admirando fontium genio (ex abditas naturae clausus, in orbis lucem emanante) philosophia...* Ferrariae: Alphons & Jo. Battista de Merestis (S). Ponatis: 1659.
- Dolar, Jaro. 1993. Knjižnica frančiškanskega samostana v Kamniku. *500 let frančiškanov v Kamniku* (ur. Cevc, Emilijan). Kamnik: Kulturni center. 45–48.
- Gorman, Michael John. 1994. Jesuit Explorations of the Torricellian Space: Carp-Bladders and Sulphurous Fumes. *MEFRIM*. 106/1: 7–32.
- Grdenić, Drago. 2001. *Povijest kemije*. Prevod: 2007. *Zgodovina kemije*. Ptujška Gora: In obs medicus.
- Von Guericke, Otto. 1986. *Neue "Magdeburgische" Versuche uber den leeren Raum*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft M.B.H.
- Helmont, Jan Baptista van. 1648. *Ortus Medicinae. Id est, initia physicae inaudita. Progresus medicinae novus, in marborum ultionem ad vitam longam*. Amstelodami: Ludovic Elzevir (S); 800 strani in okoli 300 strani prilog; privezano ob Helmontova zbrana medicinska dela). Ponatis: 1651 (FSKA); 1652. Amstelodami: Elzevir (NUK-11620).
- Horváth, Joannis Baptistae. 1767. *Physica Generalis*. Tyrnavia; 1770. *Institutiones Physicae Particularis*. Tyrnavia; 1772. Augusta Vindel: Rieger; 1790. Budae (FSNM).
- Jacquier, François. 1766. *Institutiones Philosophicae ad Studia Theologica potissimum acomodata... Physica Generalis et Particularis*. Graecii (NUK-5018).
- Keill, John. 1739. Leyden; 1742. *Introductiones ad veram physicam et veram astronomiam. Quibus accedunt Trigonometria. De viribus centralibus. De legibus attractionis*. Mediolani: F. Agnelli (FSNM).
- Joseph Khell von Khellburg S. J. *Physica ex recentiorum observationibus accommodata. Usibus academicis a Josepho Khel é S. J. 2 dela*. Viennae: Trattner, 1751. 2: 1754, 1755. Viennae (KSSKL-V 29; NUK-8206).
- Lower, Richard; Carnaro, Luigi; Ludovici, C. 1738. *Englischen Artzney-Büchlein, das ist, Des weltberuhmzen englischen medici Hrn. D. Loweri und unterschiedlichen anderer vortrefflichen Medicorum in London nützliche... in gantz neues sehr nützlich*. Leipzig: Wiedmann (KSSKL).
- Magni, Valerijan. October 1647. *Demonstratio ocularis Loci sine locato, corporis successive moti in vacuo, luminis nulli corpori inhaerentis, a Valeriano Magno, fratre cappuccino, exhibita, Serenisse, Principibus Vladislao IV Regi, et Ludovicae Mariae Reginae Poloniae et Sveciae, Magis Ducibus Lithuaniae, Virgini Deiparae, ex voto sacra et d(edicata)*. Warsaw.
- Magni, Valerijan. 1654. *Lux in tenebris lucens quam tenebrae non comprehendunt*. Straubinga: Gallus (S).
- Magnus, Albertus. 1494. *Divi Alberti Magni phisicor(um)sive De phisico auditu libri octo*. Venetiis: Joan et Forlivio Gregorio (KSSKL).
- Majolo, Simone. 1654. *Dies caniculares, sive colloquia tria et viginti physica nova et penitus admiranda, quae aut in aethero sunt, aut in Europa, Asia atque Africa...* Vulturariac (FSNM).
- Mako, Paul von Kerek-Gede, S. J. 1764. *Compendiaria Matheseos institutio quam in usum auditorum philosophiae elucubratus est*. Viennae. Ponatis: 1766. Vindobonae: Trattner; 3: 1771. Vindobonae: Trattner (NUK-4303); 4: 1781. Vindobonae: Trattner (FSNM).
- Musschenbroek, Pieter van. 1739. *Elementa physicae conscripta in usum academicos a Petro van Musschenbroek*. Leyden: Luchtman; 1739.
- Mr. Pierre van Musschenbroek, *Essai de physique, avec une description de nouvelles sortes de machines pneumatiques, et un Recueil d'expériences. Traduit en français par Pierre Massuet*. Leyden: Luchtman (NUK-8463). 1745. *Elementa physicae*. Venetiis: Giovanni Battista Recurti (FSNM).
- Neumann, Johan Philip. 1808–1812. *Compendiaria Physica Instituto in usum tironum conscripta*. Graecii: Ferstl (NUK-8215; NUK-MS-667; FSNM).
- Newton, Isaac. 1687. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. Autore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucassiano, & Societatis Regalis Sodali. Imprimatur. S. Pepys, Reg. Soc. Praeses. Julii 5. 1686*. Londini: Steater. Ponatis: 1739–1742. (ur. Le Seur, Thomas; Jacquier. François). Genevae: Barrillot (FSNM).
- Newton, Isaac. 1704. *Opticks*. London; 1718. London. Samuel Clarkov latinski prevod: 1747. *Isaaci Newtoni Optices libri tres: accedunt ejusdem lectiones opticae, et opuscula omnia ad lucemet colores pertinentia, sumta ex transactionibus philosophicis*. Graecii: Widmanstand/Venezia: Manfrè (FSKA).
- Pace, Stefano. 1741. *La fisica dei Peripatetici, Cartesiani ed Atomisti al paragone della vera Fisica d'Aristotele*. Venezia (NUK-8413).
- Prager, Frank D. 1980. Berti's Devices and Torricelli Barometer from 1641 to 1643. *Annali dell' Instituto e museo di storia della scienza di Firenze*. 5/2: 35–53.
- Redhead, Paul Aveling. 1984. The measurement of vacuum pressures. *History of Vacuum Science and Technology*. (ur. Madey, Theodore E.; Brown William C.). New York: American Vacuum Society, American Institute of Physics. 31–37.
- Schwenker, Daniel; Harsdörffer, Georg Philipp. 1636. *Daniel Schwenker... Deliciae mathematicae et physicae, oder, Mathemat. Und philosophische Erquickstunden darinnen sechs-hundert drey und sechsig schöne, liebliche und annehmliche Kunststücklein*. Nürnberg (S). Drugi in tretji Harsdörfferjev del 1651 in 1653 (S; NUK-4154); 1677. Nürnberg: Endter (NUK-5062); 1651–1653. Nürnberg: Dümmler (FSNM).
- Sodnik – Zupanec, Alma. 1943. *Vpliv Boškovičeve prirodne filozofije v naših domačih filozofskih tekstih XVIII. stoletja*. Ljubljana: SAZU.
- Sousedík, Stanislav. 1983. *Valerian Magni (1586–1661)*. Praga: Clara Vušehrad.
- Targosz, Karolina. 1971. Le mécénat de Louise-Marie de Gonzague et les liens scientifiques Franco-Polonais au XVII^e siècle. *XII^e Congrès international d'Histoire des sciences*. XI: 137–142.
- Teraš, Mavricij. 1929. *Iz zgodovine, življenja in delovanja kapucinov: v spomin 400-letnice kapucinskega reda*. Celje: Kapucinski samostan.
- Thorndike, Lynn. 1941–1958. *History of Magic and Experimental Science*. 5–8. del. New York: Columbia University Press.
- Valvasor, Janez Vajkard. 1689. *Die Ehre dess Hertzogthums Crain*. Laybach-Nürnberg: Endter.
- Vovk, Bernard. 1857. *Arithmetische Progressionen. Programm des k. k. Gymnasiums in Neustadt am Schuljahres 1857*. 3–30.
- Wolff, Christian. 1733–1743. *Elementa matheseos universa*. Geneve: Gosse (NUK-4240); I–V del. Geneve: Bosquet et Socios 1733 (NUK-4049); 1741–1742 (NUK-4073); 1774. Vindobonae: Trattner (FSNM).
- Wolff, Christian. 1701. *Mathematischen Wissenschaften*. 4 Bande. Frankfurt: Renger (FSNM); 1746–1753. *(Der) Anfangs-Gründe aller Mathematischen Wissenschaften*. Halle und Magdeburg (NUK-4136).
- Wolff, Christian. 1746. *Vernüftige Gedanken von der Wirkungen der Natur, den Liebhabern der Wahrheit mitgetheilt. Fünfte Auflage*. Halle: Renger (NUK-8202; FSNM).

KJE IN KAKO DOVAJATI REAKTIVNI PLIN MED NAPRŠEVANJEM TANKIH SPOJINSKIH PLASTI?

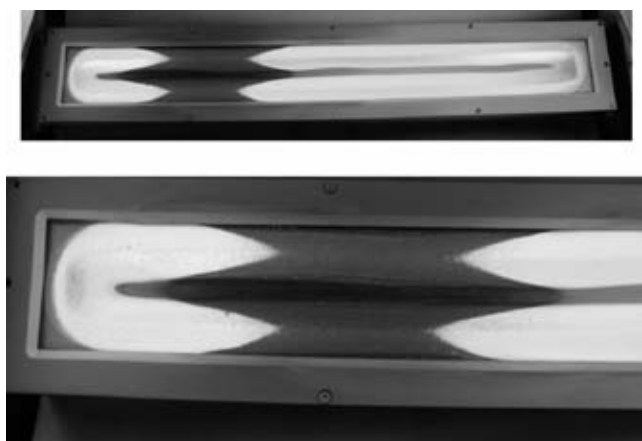
Peter Panjan, Miha Čekada, Matjaž Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Če želimo z reaktivnim naprševanjem pripraviti spojinsko plast (npr. kovinske nitride, okside ali karbide), moramo med procesom razprševanja kovinske tarče v vakuumsko posodo poleg inertnega plina uvajati tudi ustrezen reaktivni plin (npr. dušik pri naprševanju nitridnih plasti, kisik pri naprševanju oksidnih plasti, acetylen pri naprševanju karbidnih plasti). Proces reaktivnega naprševanja lahko poteka v dveh stabilnih režimih: a) v pogojih, ko ne pride do zastrupitve tarče, in b) v pogojih, ko pride do zastrupitve tarče.

O t. i. zastrupitvi kovinske tarče govorimo takrat, ko reakcijski produkti (nitridi, oksidi) nastajajo na površini tarče (slika 1), ki po zastrupitvi izgubi kovinske lastnosti. Pri izbrani hitrosti razprševanja tarče pride do zastrupitve tarče pri nekem kritičnem tlaku reaktivnega plina. Na površini tarče nastane dielektrična plast, ki je vzrok za drastično zmanjšanje hitrosti razprševanja in za nastanek prebojev. Delovanje naprav za reaktivno naprševanje je v bližini kritičnega tlaka reaktivnega plina nelinearno, saj se že pri majhnem povečanju tlaka hitrost naprševanja zmanjša za velikostni red.

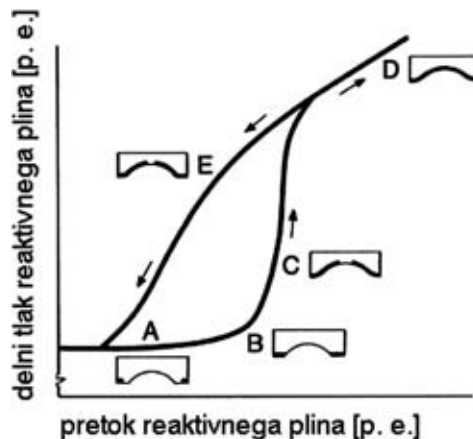
Za reaktivno naprševanje je značilna histerezna odvisnost delnega tlaka reaktivnega plina od njegovega pretoka. Ko pretok reaktivnega plina (npr. dušika) povečujemo (slika 2, področje A), se delni tlak reaktivnega plina ne povečuje, ker ves plin zreagira z atomi tarče, ki se kondenzirajo na podlagah in na steni vakuumске posode (geterski efekt). Ko pretok preseže



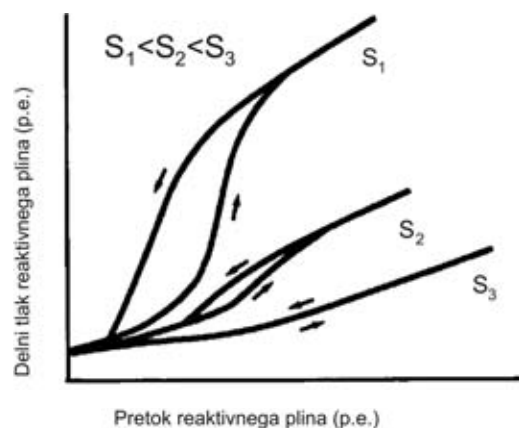
Slika 1: Primer zastrupitve tarče pri reaktivnem naprševanju AlN

neko kritično vrednost, delni tlak močno naraste (področje B–C), pri nadaljnjem povečevanju pretoka pa linearno narašča. Do prehoda iz režima A v B pride zaradi nastajanja spojin (npr. nitridov pri uvajanju dušika) na površini tarče, zato se zmanjša geterski učinek tistih razpršenih atomov tarče, ki se kondenzirajo na podlagah in notranjih stenah vakuumске posode. Porablja se le tisti del plina, ki zreagira s površino tarče, zato se delni tlak reaktivnega plina skokovito poveča do neke vrednosti in nato linerano narašča pri nadaljnjem povečevanju pretoka reaktivnega plina. Ko se tarča prekrije s spojinsko plastjo (reakcijskimi produkti), se hitrost naprševanja izrazito zmanjša (tudi za več kot 10-krat).

Če pretok reaktivnega plina zmanjšujemo, se delni tlak zmanjšuje (področje D), vse dokler se tarča v celoti ne očisti reakcijskih produktov. Plast s stehiometrično sestavo raste pri pretoku reaktivnega plina, kjer ima histerzna krivulja koleno. Pri kritični vrednosti pretoka reaktivnega plina se znatno spreminjajo tudi nekatere druge količine (npr. optična emisija atomov na površini tarče, razelektritveni tok in napekost), zato jih lahko v principu uporabimo pri nastavitvi delovanja sistema na delovno točko B. Histerezni odvisnosti delnega tlaka reaktivnega plina od pretoka se lahko izognemo, če povečamo črpalno hitrost (slika 3). Pokazalo se je, da bi morali povečati črpalno hitrost za faktor 10, kar bi bila draga oz. neekonomična rešitev.



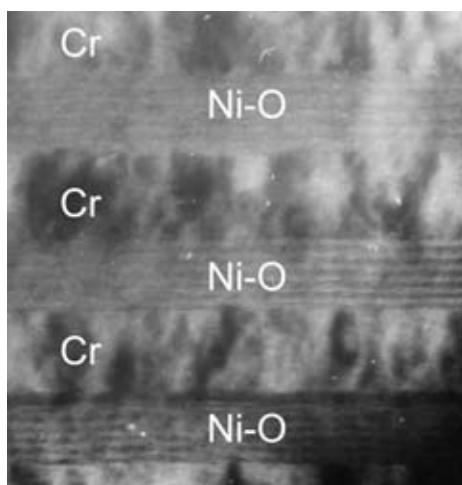
Slika 2: Delni tlak reaktivnega plina v odvisnosti od pretoka med reaktivnim naprševanjem iz kovinske tarče



Slika 3: Delni tlak reaktivnega plina v odvisnosti od pretoka med reaktivnim naprševanjem pri različnih črpalnih hitrostih S

Vzdrževanje konstantnih in optimalnih pogojev reaktivnega nanašanja tankih plasti je torej ključnega pomena, še zlasti v začetni fazi nanašanja. Pri tem je eno od pomembnih praktičnih vprašanj, kje in kako uvajati reaktivni plin, saj je od tega odvisno, ali bo proces reaktivnega nanašanja uspešen ali ne. Poglavitna težava je prav zastropitev tarče. Ob zastropitvi se hitrost nanašanja zmanjša, zato moramo čas nanašanja podaljšati, če želimo doseči enako debelino plasti kot pri nezastropitvi tarči. Dodaten problem je v tem, da se pri zastropitvi tarče zmanjša poraba reaktivnega plina, zato delni tlak naraste. V takšnih razmerah lahko nastane nadstehiometrična plast, ki ima drugačne lastnosti od plasti, ki smo jo želeli nanesti.

V praksi se uporabljajo zelo različne rešitve. Nekateri uvajajo reaktivni plin v bližino podlag, inertni (delovni) plin pa v bližini tarč. S tem naj bi nekako



Slika 4: Posnetek prereza večplastne strukture Cr/Ni-O, narejen s presevnim elektronskim mikroskopom. Plasti Ni-O so bile narejene z reaktivnim naprševanjem v naprševalniku Sputron. V tej napravi dovajamo reaktivni plin skozi dve kapilari, ki sta nasproti izhoda k difuzijski črpalki. Plasti Ni-O imajo plastno strukturo: svetle plasti so amorfne (oksidi), temne pa imajo kristalinično mikrostrukturo (podstehiometrična kovinska faza). Razliko v mikrostrukturi razlagamo z gradientom tlaka kisika v vakuumski posodi. Število plasti se ujema s številom obhodov nosilca.



Slika 5: Dovod reaktivnega plina preko razvoda

ločili reaktivni plin od tarče oz. preprečili, da bi difundiral nazaj proti tarči. Čeprav je razlaga na prvi pogled logična, pa v praksi drži le, kadar je razdalja med tarčo in podlago zares velika (pri čemer je seveda hitrost nanašanja majhna). V standardnih sistemih za PVD-nanašanje takšna "rešitev" ne pomaga.

Če reaktivni plin dovajamo točkovno z roba tarče ali celo iz luknje v sredini tarče, dobimo v rastoči tanki plasti gradient sestave. Če npr. uvajamo dušik z desne, bo imela plast na desni strani večji delež dušika. V takih primerih lahko pride tudi do zastropitve dela tarče, tedaj pa bomo dobili poleg gradienta sestave (slika 4) tudi gradient debeline.

Pravilna rešitev je uporaba razvoda (slika 5), s katerim reaktivni plin dovajamo kontinuirno v določenem področju. Najbolj se je izkazala rešitev, kjer razvod objema tarčo v razdalji temnega prostora. Tok reaktivnega plina nekako objame tok razpršenih delcev tarče in zagotovi enakomerno mešanje. Nevarnost zastropitve tarče je minimalna, saj so tako atomi reaktivnega plina kot razpršeni delci tarče usmerjeni stran od tarče. Da bi prišlo do reakcije na površini tarče, mora najprej priti do trka treh delcev: atoma tarče, plina in tretjega delca, vendar je verjetnost za tak trk minimalna.

V idealnem primeru naj bo tlak v celotnem razvodu enak, pri čemer število luknjic in njihov razmik vplivata na tlak v razvodu. Iz praktičnih izkušenj je optimalni premer luknjic 0,5 mm, njihov razmik pa 50 mm. Luknjice naj bodo enako velike in v enakih razmikih, usmerjene pa naj bodo proti podlagam. Pomembna je tudi dinamika pretoka, kako hitro dosežemo stacionarno stanje, kadar pride do spremembe (npr. povečanje pretoka). V neugodnih okoliščinah lahko pride do oscilacije med dvema skrajnima vrednostima, v takšnem primeru pa je kontrola procesa praktično onemogočena.

Pri zelo velikih tarčah, npr. pri prekrivanju arhitekturnih stekel, naletimo na dodatne komplikacije. Tam je uporaba razvodov za dodajanje plina nujna, pogosto je vzdolž ene tarče več ločenih sistemov, vsak od njih pa je z merilnikom parcialnega tlaka reaktivnega plina povezan v povratno zanko. Šele tako lahko zagotovimo enotno debelino in sestavo vzdolž celotne dolžine tarče, ki lahko v določenih aplikacijah dosega celo 4 m.

Osnovni poudarek tega prispevka je na tem, da je način dovajanja reaktivnega plina v PVD-postopkih pomemben tehnični problem. Najlažje ga rešimo z uporabo razvoda, ki obdaja tarčo in zagotavlja enakomeren pretok reaktivnega plina proti podlagam.

IN MEMORIAM

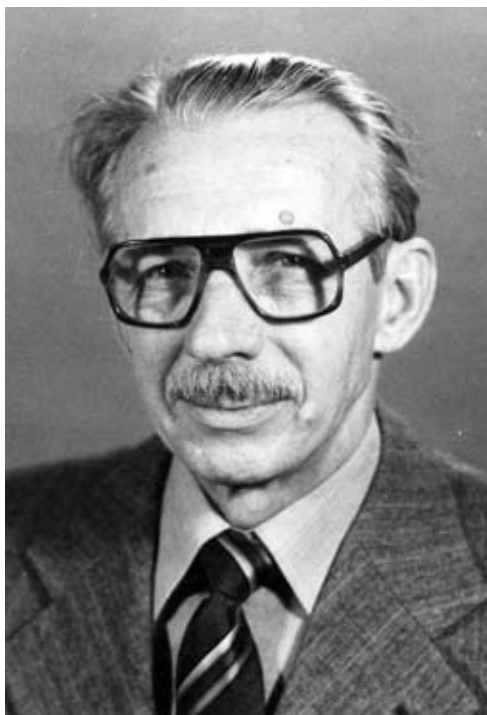
JOŽE PLANINC 1924–2008

Prvega avgusta smo se na ljubljanskih Žalah poslovili od našega dolgoletnega člana društva Jožeta Planinca.

Rodil se je 9. decembra 1924 v Črnomlju. Po končanem osnovnem šolanju je obiskoval letalsko šolo v Kruševcu v Srbiji in se ob začetku druge svetovne vojne vrnil domov v Črnomelj ter se izučil za mizarja. Septembra 1943, po kapitulaciji Italije, je odšel v partizane; najprej je bil v Belokranjskem odredu, nato v Kočevskem partizanskem odredu, pa v 9. in kasneje v 16. slovenski narodnoosvobodilni brigadi. Po uspešno opravljenem tečaju je bil radiotelegrafist v Bazi 20, kjer je dočkal osvoboditev.

Po vojni je začel študij elektrotehnike, po demobilizaciji pa se je zaposlil na Inštitutu za elektrovezve – IEV. Študij elektrotehnike je zavzeto nadaljeval, vendar mu zaradi družinskih in službenih obveznosti ni uspelo diplomirati. V tistih letih je intenzivno sodeloval pri nastajanju tovarne kondenzatorjev v Semiču. Tam se je spoznal tudi z vakuumsko tehnologijo impregniranja kondenzatorjev, pa tudi s konstruiranjem vakuumskih elementov in naprav, ki jih je razvijal za tovarno.

Ko je Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko (IEVT) prevzel zastopstvo in servis za nemškega proizvajalca vakuumске opreme Leybold-Heraeus, je iskal tudi primerne vakuumske strokovnjake za to delo. Brez dvoma je bila izbira Jožeta Planinca idealna: dobro je poznal vakuumsko tehniko in obvladal nemščino, ki se jo je naučil v rani mladosti pri sosedovih, utrdil pa jo je na 6-mesečni praksi leta 1955 ali 1956 pri nekem podjetju v Brillonu v Nemčiji. Z največjim užitkom je "seciral" pokvarjene vakuumske črpalke, ki so po njegovem posegu delovale kot nove. Diagnozo napak pri črpalkah je navadno podal že kar s poslušanjem njihovega delovanja. Večkrat mi je pripovedoval zanimive zgodbe s servisnih potovanj po Jugoslaviji. Tako je bil nekoč poklican v neko novo tovarno, ker popolnoma nove rotacijske črpalke niso in niso mogli spraviti v normalen tek; vsakič po zagonu so pregorele varovalke. Jože je takoj ugotovil, da je nekaj narobe z izpuhom črpalke, ki je bil z dolgo kovinsko cevjo napeljan v



neki drug prostor tovarne. Ko je odkril konec te izpušne cevi, je videl, da je v ustje cevi zabit lesen zamašek. Delavec v tistem oddelku mu je povedal, "da več tri dana puši iz cijevi" in jo je zato zabil. Še veliko zabavnih zgodb iz svojih potovanj mi je pripovedoval, ko sva skupaj bivala v istem laboratoriju. Povedal pa mi je tudi veliko strokovnih rešitev, ki jih je uporabil pri svojem delu. Svoje znanje je razdajal vsakemu, kar smo sodelavci zelo cenili in ga tudi zato še bolj spoštovali. Svojo "vakuumsko kariero" na IEVT-ju je končal z upokojitvijo v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, vendar je še vedno deloval na tem področju tudi po upokojitvi. Nikoli ni miroval: rad je mizaril, izdeloval je preproge in gobeline, v poznih letih pa je skrbel za bolno ženo.

Njegovo srce je obstalo 26. julija 2008 v 84. letu življenja.

Mnogi njegovi soborci iz vojnih let, sodelavci IEVT-ja ter člani slovenskega vakuumskega društva se ga bomo spoštljivo spominjali.

dr. Jože Gasperič

DRUŠTVENE NOVICE

12. ZDRUŽENA VAKUUMSKA KONFERENCA

V mestecu Balatonalmádi ob Blatnem jezeru na Madžarskem je bila med 21. in 26. septembrom 2008 12. združena vakuumška konferenca (12th Joint Vacuum Conference). Gre za tradicionalna srečanja raziskovalcev, inženirjev in uporabnikov vakuumske znanosti, tehnike in tehnologij, ki jo vsaki dve leti izmenično organizirajo vakuumska društva Slovenije, Hrvaške, Madžarske, Avstrije, Češke in Slovaške. Letos je bilo srečanje združeno z Evropsko vakuumško konferenco (10th European Vacuum Conference) in letnim srečanjem nemških vakuumistov (7th Annual Meeting of German Vacuum Society). Konferenca se je udeležilo 230 delegatov, ki so predstavili sodobne usmeritve na tradicionalnih področjih vakuumske znanosti, tehnike in tehnologij:

- Vakuumska znanost
- Znanost o površinah
- Uporabna znanost o površinah
- Inženirstvo površin
- Tanke plasti
- Plazemska znanost in tehnika
- Elektronski materiali in njihova obdelava
- Nanometriške strukture

Vabilu za udeležbo so se odzvali vrhunski raziskovalci in aktivni ali bivši visoki funkcionarji mednarodne vakuumske zveze IUVSTA (International Union for Vacuum Science, Technique and Applications), ki so imeli plenarna predavanja: J. Colligon (Manchester University, UK), R. J. Behm (Ulm University, D), F. Solmosy (University of Szeged, H), G. Rossi (TASC, CNR Trst, I), G. Rupperechter (Vienna University of

Technology, A), I. Samuelson (Lund University, S), C. Grovenor (Oxford University, UK) in T. Michely (Köln University, D). Poleg plenarnih predavanj smo imeli na srečanju tudi 15 vabljenih predavanj, 58 ustnih predstavitev in 138 posterjev.

Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije smo zastopali sodelavci z Instituta "Jožef Stefan", Instituta za materiale in tehnologije Univerze v Ljubljani in podjetij. Iz Slovenije je bilo na konferenci 16 udeležencev, kar je solidna udeležba in kaže na vitalnost vakuumske znanosti in aplikacij v Sloveniji. Vabljeni predavatelja iz Slovenije sta bila dr. Peter Panjan z Instituta "Jožef Stefan" in dr. Matjaž Godec z Inštituta za kovinske materiale in tehnologije. Ustne predstavitve so imeli naslednji Slovenci: dr. Bojan Zajc, doc. dr. Janez Kovač, prof. dr. Anton Zalar, Aleksander Drenik, dr. Vincenc Nemanič in dr. Miha Čekada.

Srečanje so odlično organizirali kolegi iz Madžarske vakuumske zveze ob pomoči članov drugih vakuumskih društev, ki redno sodelujejo pri organizaciji združenih vakuumskih konferenc. Slovenska člana mednarodnega znanstvenega odbora konference sta bila doc. dr. Miran Mozetič in dr. Janez Šetina, člana mednarodnega organizacijskega odbora pa doc. dr. Miha Čekada in dr. Matjaž Godec.

Naslednja združena vakuumška konferenca bo od 20. do 25. junija 2010 v mestecu Štrbské Pleso v slovaškem delu pogorja Tatre. Predsednik naslednje konference bo prof. dr. Marian Vesely s Slovaške tehniške univerze v Bratislavi.

doc. dr. Miran Mozetič



Slika 1: Slovenski udeleženci združene vakuumske konference (od leve proti desni): Janez Šetina, Miha Čekada, Barbara Šetina Batič, Drago Resnik, Ita Junkar, Alenka Vesel, Kristina Eleršič, Vincenc Nemanič, Miran Mozetič, Aleksander Drenik, Janez Kovač, Barbka Zalar, Peter Panjan, Matjaž Panjan, Anton Zalar, Gabor Gergely (madžarski kolega) in Andrej Pregelj



Slika 2: Organizatorja in staroste svetovne vakuumske zveze na otvoritveni svečanosti. Od leve proti desni so profesorji Sándor Bohátka (predsednik konference), Béla Pécz (predsednik znanstvenega odbora), József Gyulai, Hans Oechsner in John Colligon (častni predsedniki konference)

PentaLine™

A new generation of two-stage rotary vane pumps.

Flexible and ideal for all applications in the low- and medium vacuum range. Reliable under even the most punishing conditions.

- ▶ Pumping speeds up to 35 m³/h
- ▶ Ultimate pressure of down to 10⁻³ mbar
- ▶ 50% less energy consumption compared to ordinary rotary vane pumps
- ▶ Standby mode for longer service life
- ▶ Hermetically sealed, no oil leakage



PFEIFFER  **VACUUM**

SCAN d.o.o. Preddvor

Phone: +386 4 2750 200 · Fax: +386 4 2750 240 · scan@siol.net

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH

Phone: +43 1 894 17 04 · Fax: +43 1 894 17 07 · office@pfeiffer-vacuum.at

www.pfeiffer-vacuum.net